

ВЕКТОР НАУКИ

Тольяттинского
государственного
университета

Основан в 2008 г.

№ 2 (32-2)
2015

Ежеквартальный
научный журнал

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет»

Главный редактор

Криштал Михаил Михайлович, д.ф.-м.н., профессор

Заместители главного редактора:

Викарчук Анатолий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор

Коростелев Александр Алексеевич, д.п.н.

Хачатуров Рудольф Левонович, д.ю.н., профессор

Шайкин Александр Петрович, д.т.н., профессор

Ярыгин Анатолий Николаевич, д.п.н., профессор

Редакционная коллегия:

Безгина Ольга Анатольевна, к.и.н., доцент

Васильев Андрей Витальевич, д.т.н., профессор

Вахнина Вера Васильевна, д.т.н., профессор

Горина Лариса Николаевна, д.п.н., профессор

Ельцов Валерий Валентинович, д.т.н., доцент

Ерышев Валерий Алексеевич, д.т.н., доцент

Искосков Максим Олегович, к.т.н., доцент

Кабытов Петр Серафимович, д.и.н., профессор

Кудинов Сергей Иванович, д.псх.н., профессор

Липинский Дмитрий Анатольевич, д.ю.н., профессор

Лодатко Евгений Александрович, д.п.н., профессор

Малько Александр Васильевич, д.ю.н., профессор

Мальшев Владимир Ильич, к.т.н., доцент

Мельник Маргарита Викторовна, д.э.н., профессор

Мельников Борис Феликсович, д.ф.-м.н., профессор

Мерсон Дмитрий Львович, д.ф.-м.н., профессор

Никифорова Елена Владимировна, д.э.н., профессор

Остапенко Геннадий Иванович, д.х.н., профессор

Розенберг Геннадий Самуилович, д.б.н., профессор

Ройтбург Юрий Семенович, к.т.н., профессор

Талалов Сергей Владимирович, д.ф.-м.н., доцент

Цыбизов Юрий Ильич, д.т.н., профессор

Шаров Николай Федорович, д.филос.н., профессор

Щербакова Галина Ивановна, д.филол.н., доцент

Эткин Валерий Абрамович, д.т.н., профессор (Израиль)

Жданова Елена Юрьевна – ответственный секретарь

Входит в систему «Российский индекс научного цитирования» и перечень российских рецензируемых научных журналов.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-36741 от 1 июля 2009 г.).

Компьютерная верстка:
Н.А. Никитенко

Технический редактор:
Н.А. Никитенко

Адрес редакции: 445667,
Самарская обл., г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14
Тел./факс: (8482) 54-63-64
vektornaukitgu@yandex.ru
[http:// www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

Подписано в печать 30.06.2015.
Формат 60x84 1/8.
Печать оперативная.
Усл. п. л. 24,1.
Тираж 500 экз. Заказ 3-365-15.

Издательство Тольяттинского
государственного университета
445667, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ РЕДАКЦИИ	9
СОТРУДНИЧЕСТВО РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПЕРВОГО ВУЗА ТОЛЬЯТТИ С ОРГАНАМИ САМОУПРАВЛЕНИЯ И РУКОВОДИТЕЛЯМИ СТРОЕК ГОРОДА (1951–1971 ГГ.) Т.И. Адаевская.....	15
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕТРО-ГРАФИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ И КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ И.Ю. Амирджанова, В.Г. Виткалов.....	26
РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ Н.М. Бобровский, П.А. Мельников, И.Н. Бобровский, О.О. Левицких.....	32
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРОЧНЕНИИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина.....	38
ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ К.Я. Васькин, Н.В. Хрипунов.....	44
РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «СЕТЬ – ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КОМПЕНСАТОР – КОНТАКТНАЯ СВАРОЧНАЯ МАШИНА» Е.С. Глибин, А.А. Шевцов.....	50
ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ РАЗРЕШЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ А.В. Гордеев, Д.Л. Бородынкина.....	58
МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИКА ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ УЧЕБНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ЛАБОРАТОРИЙ Л.Н. Горина, Н.Е. Данилина, Т.Ю. Фрезе.....	64
ИЗУЧЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ НА ПРЕЦИЗИОННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ Б.М. Горшков, О.Ю. Ремнева.....	69
ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОЙ ТЕХНИКИ В СРЕДЕ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ГАЗА Ю.В. Казаков, А.В. Каплин, Н.А. Костюченко, С.А. Андреев.....	75
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ И ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ Е.С. Киселев, М.В. Назаров.....	81

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ М.М. Криштал, П.В. Ивашин, А.В. Полунин, Е.Д. Боргардт, А.Я. Твердохлебов.....	86
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗИРУЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ НА ТОЧНОСТЬ БАЗИРОВАНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИ СМЕННЫХ УЗЛОВ Д.Г. Левашкин.....	94
УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТКИ ПРИ ГЛУБИННОМ ПРОФИЛЬНОМ ШЛИФОВАНИИ В.Ф. Макаров, С.П. Никитин.....	100
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ШЕЙКИ ВАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ П.А. Мельников, А.Н. Пахоменко, А.А. Лукьянов.....	104
АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ С МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ПРИВОДОМ Р.В. Меркулов.....	112
ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев.....	117
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ШТАМПОСВАРНЫХ ОБЛЕГЧЕННЫХ КОРПУСОВ ЗАДЕЛКИ ЭЛЕКТРОКАБЕЛЯ С.В. Нескоромный, Е.Л. Стрижаков.....	123
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЗОН ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ П.А. Огин.....	130
ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ВЫЗОВЫ В СКОРОСТНОМ И УЛЬТРАСКОРОСТНОМ ШЛИФОВАНИИ А.В. Пилинский.....	136
ОСНОВЫ ВЫБОРА ЗАЩИТНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ М.В. Позднов, А.В. Прядилов.....	145
ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ R-C-VD ЦЕПочки НА ПРИМЕРЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ М.В. Позднов, А.В. Прядилов.....	150
РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ НА ОСНОВЕ ФАКТОРНОГО И КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА Е.Н. Почекуев, П.А. Путеев.....	155

ПОИСКОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ ДЛЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ Е.Н. Почекуев, П.Н. Шенбергер.....	161
СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ, МЕТОД «ФИКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР» И УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПОКРЫТИЯ И.К. Родионов, И.И. Родионов.....	166
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В.П. Сидоров, А.В. Мельзитдинова.....	171
ВЫБОР АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПО ПРИЖОГАМ ЗАКАЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Я.И. Солер, Д.Ю. Казимиров, В.Л. Нгуен.....	176
ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТОКАРНЫХ РЕЗЬБОВЫХ РЕЗЦОВ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ В.П. Табаков, Д.И. Сагитов.....	185
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ШЛИФОВАНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ А.Н. Унянин.....	191
НАШИ АВТОРЫ.....	196

CONTENT

FROM THE EDITOR	9
COOPERATION BETWEEN THE LEADERS OF THE FIRST TOGLIATTI HIGHER SCHOOL, SELF-GOVERNMENT INSTITUTIONS AND HEADS OF CONSTRUCTION SITES OF THE CITY (IN 1951-1971) T.I. Adaevskaya.....	15
CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF GEOMETRY-GRAPHICS CULTURE AND COMPETENCE OF FUTURE PROFESSIONALS I.Yu. Amirdzhanova, V.G. Vitkalov.....	26
DEVELOPMENT AND COMMERCIAL IMPLEMENTATION OF HIGH PERFORMANCE MANUFACTURING AND ENVIRONMENTALLY APPROPRIATE TECHNOLOGY OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF CARS PARTS N.M. Bobrovskiy, P.A. Melnikov, I.N. Bobrovskiy, O.O. Levitskiy.....	32
EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL PROCESSES WHEN STRENGTHENING THE METAL-CUTTING TOOLS IN LOW -TEMPERATURE PLASMA B.M. Brzhozovsky, V.V. Martynov, E.P. Zinina.....	38
PROCESS APPROACH TO THE ORGANIZATION OF INFORMATION SYSTEM FOR MATERIALS MACHINABILITY ESTIMATION K.Y. Vaskin, N.V. Khripunov.....	44
THE DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL OF THE «ELECTRIC NETWORK – SEMICONDUCTING COMPENSATOR – RESISTANCE WELDING MACHINE» SYSTEM E.S. Glibin, A.A. Shevtsov.....	50
EMPIRICAL TECHNIQUES FOR RESOLVING CONTRADICTIONS IN TECHNICAL PROBLEMS A.V. Gordeyev, D.L. Borodynkina.....	58
METHODOLOGY AND PRACTICE OF ORGANIZING AND CONDUCTING OF SAFETY MONITORING OF WORK TRAINING LABORATORIES L.N. Gorina, N.E. Danilina, T.Y. Freze.....	64
THE STUDY OF ACCURACY OF PROCESSING ON PRECISION PRODUCTION EQUIPMENT B.M. Gorskov, O.J. Remneva.....	69
THE TECHNOLOGY OF ARC WELDING OF SMALL-SIZE COMPONENTS OF NUCLEAR PLANTS UNDER THE SHIELDING GAS HIGH-PRESSURE Y.V. Kazakov, A.V. Kaplin, N.A. Kostyuchenko, S.A. Andreev.....	75
THE IMPROVEMENT OF QUALITY OF HARD-ALLOY TOOLS AND PARTS BY MEANS OF CREATION OF SPECIFIED LEVEL OF RESIDUAL STRESS IN THE SURFACE LAYER E.S. Kiselyov, M.V. Nazarov.....	81

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF MICRO-ARC OXIDATION TECHNOLOGY ON ALUMINUM-SILICON ALLOYS	86
M.M. Krishtal, P.V. Ivashin, A.V. Polunin, E.D. Borgardt, A.Y. Tverdohlebov.....	
SIMULATION OF INFLUENCE OF BASING HOLES RELATIVE POSITION ON THE ACCURACY OF LOCATION OF RMS AUTOMATICALLY CHANGEABLE UNITS	94
D.G. Levashkin.....	
QUALITY MANAGEMENT OF THE BLADES SURFACE LAYER UNDER DEEP PROFILE GRINDING	100
V.F. Makarov, S.P. Nikitin.....	
MATHEMATICAL MODEL OF FORMING OF MICRORELIEF OF SHAFT JOURNAL WHILE PROCESSING BY DIAMOND BURNISHING	104
P.A. Melnikov, A.N. Pahomenko, A.A. Lukyanov.....	
THE ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE PULSE WELDING WITH THE MAGNETIC PULSE DRIVE	112
R.V. Merkulov.....	
PRINCIPLES OF CREATING THE SYSTEM OF COMPUTER-AIDED DESIGN OF PRODUCTION OPERATIONS IN MULTIPRODUCT MANUFACTURING	117
S.G. Mitin, P.Y. Bochkaryov.....	
THE TECHNOLOGY OF PRODUCING OF STAMP-WELDED LIGHT WEIGHT CASES FOR ELECTRICAL CABLE SEALING	123
S.V. Nescoromniy, Y.L. Strizhakov.....	
THE STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF THE OVERLAP AREAS DURING THE LASER HARDENING OF STEELS AND IRONS	130
P.A. Ogin.....	
INNOVATIVE METHODS AND CHALLENGES IN HIGH SPEED AND ULTRA-HIGH-SPEED GRINDING	136
A.V. Pilinsky.....	
THE PRINCIPLES OF SELECTION OF THE PROTECTIVE VOLTAGE LIMITER USING THE EXAMPLE OF A CONSTANT VOLTAGE PULSE CONVERTER	145
M.V. Pozdnov, A.V. Pryadilov.....	
THE PRICIPLES OF SELECTION OF THE ELEMENTS OF PROTECTIVE R-C-VD CIRCUIT USING THE EXAMPLE OF A CONSTANT VOLTAGE PULSE CONVERTER	150
M.V. Pozdnov, A.V. Pryadilov.....	
CLASSIFICATION DEVELOPMENT OF CAD/CAM/CAE SYSTEMS FOR SHEET STAMPING BASED ON FACTOR AND CLUSTER ANALYSIS	155
E.N. Pochekuev, P.A. Puteev.....	

EXPLORATORY DEVELOPMENT OF THE STRUCTURES OF PROGRESSIVE SEPARATING DIES FOR SHEET STAMPING E.N. Pochekuev, P.N. Shenberger.....	161
WELDING DEFORMATIONS, «SLACK TEMPERATURES» METHOD AND THE STRENGTHENING OF FIXED COLUMNS OF ROOF STEEL TRUSSES I.K. Rodionov, I.I. Rodionov.....	166
THE RESEARCH OF TEMPERATURE DEVIATIONS IN WELDING PROCESS DURING THE DISTURBING ACTIONS V.P. Sidorov, A.V. Melzitdinova.....	171
SELECTION OF ABRASIVE WHEELS ACCORDING TO THE GRINDING BURNS OF HARDENED PARTS USING DIGITAL TECHNOLOGIES Ya.I. Soler, D.Yu. Kazimirov, V.L. Nguyen.....	176
ASSESSMENT OF THERMAL CONDITION OF TURNING SCREW TOOLS WITH ANTI-WEAR COATINGS V.P. Tabakov, D.I. Sagitov.....	185
THE STUDY OF TEMPERATURE FIELD WHEN GRINDING WITH ULTRASONIC ACTIVATION A.N. Unyanin.....	191
OUA AUTHORS.....	196

31 мая 2015 года исполнилось 100 лет со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, доктора технических наук, профессора Арона Наумовича Резникова – первого ректора Тольяттинского политехнического института, почетного гражданина города Тольятти. С 27 по 29 мая 2015 года в рамках мероприятий, посвященных этой дате, на базе Тольяттинского государственного университета прошла IV международная научно-практическая конференция «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Резниковские чтения).

Инициатором проведения этой и трех предыдущих конференций был заведующий кафедрой «Оборудование и технологии машиностроительного производства» ТГУ, профессор Владимир Ильич Малышев, скоропостижно скончавшийся незадолго до начала IV Чтений.

В IV Резниковских чтениях приняли участие свыше 300 ученых, инженерно-технических работников предприятий, аспирантов и студентов из 8 стран мира.

В этот выпуск журнала включены статьи, отобранные Программным комитетом конференции из почти 200 статей, представленных участниками конференции. Сопредседатель Программного комитета, главный редактор журнала, доктор физико-математических наук, профессор М.М. Криштал счел целесообразным открыть этот выпуск материалами, посвященными жизни и деятельности А.Н. Резникова и В.И. Малышева.



А.Н. Резников родился в местечке Толочин под Минском 31 мая 1915 года. Окончил в 1938 году Харьковский механико-машиностроительный институт. В 1945 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, а в 1957-м – на соискание ученой степени доктора технических наук. Кавалер ордена «Знак Почета» (1961) и медали «За доблестный труд в Великой Отечественной войне» (1945), заслуженный деятель науки и техники РСФСР (1990), почетный гражданин города Тольятти (1995).

Общественно значимые свойства личности А.Н. Резникова можно охарактеризовать тремя словами: ученый, педагог, организатор.

Ученый. Трудно переоценить вклад А.Н. Резникова в науку о резании материалов. В середине XX века развитие машиностроительного производства объективно потребовало создания учения о температурных полях и тепловых потоках в зоне резания – технологической теплофизики. Основы этой науки были заложены К. Триггером и Б. Чао (США), К. Готтвайном и Ф. Швердом (Германия) и отечественными учеными Н.Н. Рыкальным и А.Н. Резниковым. Последний создал стройную, логически безупречную теорию распространения теплоты в твердых, перемещающихся относительно друг друга телах – компонентах процесса резания: инструменте, заготовке и стружке. А.Н. Резников ввел в технологическую теплофизику понятие итоговых потоков теплоты через контактные площадки инструмента и показал, что существует корреляция между динамикой изнашивания инструмента и динамикой изменения итоговых потоков. А.Н. Резников предложил использовать метод функций Грина (в приложении к теплофизике – метод источников теплоты) для решения дифференциального уравнения теплопроводности и построения температурных полей в зоне резания при различных видах обработки – точении, фрезеровании, шлифо-

вании и др., а также при комбинированных методах обработки с введением в зону резания энергии ультразвуковых колебаний, плазменной струи, луча лазера и т. д.

Созданная А.Н. Резниковым универсальная теория теплофизики резания, актуальная и сегодня, позволила решить широкую гамму важных производственных задач, в т. ч. конструирования высокопроизводительного лезвийного и абразивного режущего инструмента, оптимизации режимов резания при работе алмазным инструментом, весьма чувствительным к перегреву, выбора целесообразных параметров плазменно-механической, лазерно-механической и других комбинированных и гибридных технологий обработки резанием.

Основные научные монографии А.Н. Резникова: «Теплообмен при резании и охлаждение инструментов» (М.: Машгиз, 1963), «Теплофизика резания» (М.: Машиностроение, 1969), «Абразивная и алмазная обработка материалов» (М.: Машиностроение, 1977), «Теплофизика процессов механической обработки материалов» (М.: Машиностроение, 1981), «Обработка металлов резанием с плазменным нагревом» (М.: Машиностроение, 1986). Общее число научных работ А.Н. Резникова – свыше 250, из них 38 – авторские свидетельства и патенты.

При непосредственном участии и под научным руководством А.Н. Резникова на базе Тольяттинского политехнического института в 1972 и 1988 годах были проведены Всесоюзные научно-технические конференции по теплофизике технологических процессов. В 2005–2011 годах на базе Тольяттинского государственного университета прошло три международных конференции «Теплофизические и технологические аспекты управления качеством в машиностроении» (Резниковские чтения), посвященные памяти А.Н. Резникова.

Педагог. После защиты кандидатской диссертации А.Н. Резников занимал должность доцента в Куйбышевском индустриальном (позднее политехническом) институте, а после защиты докторской диссертации – должность профессора в КПТИ, а с 1967 года – в Тольяттинском политехническом институте. Он читал лекционные курсы «Теория резания», «Режущие инструменты», «Тепловые процессы в технологических системах» и др. Будучи талантливым педагогом, А.Н. Резников читал лекции на высоком интеллектуальном и эмоциональном уровне, широко используя примеры из собственного производственного опыта. Практически ежегодно А.Н. Резников перерабатывал читаемые курсы, корректируя их в соответствии с новейшими достижениями науки и техники.

А.Н. Резников является автором учебника для вузов «Тепловые процессы в технологических системах» (М.: Машиностроение, 1990), который используется в учебном процессе Тольяттинского государственного университета в настоящее время.

В 1994 году, обобщив 50-летний опыт преподавания в высшей школе, А.Н. Резников написал брошюру «Беседы с молодыми преподавателями о подготовке и проведении занятий» (Тольятти: Изд-во ТПИ), которая стала настольной книгой для многих преподавателей вузов города и была переиздана в 2003 году по решению ученого совета ТГУ.

А.Н. Резников приглашался для чтения лекций по теплофизике резания и теории шлифования в вузы Венгрии (1972) и Польши (1975).

Педагогический талант А.Н. Резникова ярко проявился и в работе с аспирантами и соискателями. А.Н. Резников подготовил 59 кандидатов и 7 докторов наук из Тольятти, Куйбышева, Свердловска, Днепропетровска, Баку и ряда других городов СССР.

Организатор. Организаторские способности А.Н. Резникова проявились еще во время Великой Отечественной войны, когда он в эвакуации работал главным инженером учебно-производственных мастерских Казахского сельскохозяйственного института, которые в военное время были переориентированы на выпуск боеприпасов для фронта. Позднее он был назначен главным инженером Отдельной конструкторской группы Наркомата обороны СССР, занимавшейся разработкой новых конструкций бронетанковой техники.

С 1951 по 1960 год А.Н. Резников был деканом механического факультета Куйбышевского индустриального института, а с 1960 по 1967 год заведовал кафедрой «Резание и режущий инструмент» КИИ-КПТИ. На базе этой кафедры им была создана Отраслевая научно-производственная инструментальная лаборатория, в стенах которой были разработаны и испытаны новые конструкции режущих инструментов, применяющиеся на машиностроительных предприятиях России и в наши дни.

В 1967 году А.Н. Резников был назначен ректором созданного в Тольятти постановлением Правительства СССР политехнического института. Поскольку создавался новый вуз на базе филиала Куйбышевского политехнического института, то лекционные, лабораторные и вспомогательные помещения в основном уже имелись. Главное, чего не хватало, – это кадров высокой квалификации. А.Н. Резников привез с собой из Куйбышева целую группу своих учеников (кандидатов наук и аспирантов), пригласил для работы в ТПИ перспективных и энергичных специалистов с предприятий Тольятти и других городов. Буквально за 5-6 лет институт превратился в серьезное учебное заведение с высокой результативностью учебной и научно-исследовательской работы и в 1971 году был переведен Министерством образования РСФСР в группу вузов первой категории.

Первый ректор первого вуза города А.Н. Резников со всей присущей ему энергией возглавлял процесс создания и становления высшего профессионального образования в Тольятти – не только из-за занимаемой должности, а и в силу понимания важности своей роли в этом необходимом для молодого города деле. При его непосредственном участии были созданы научно-педагогические школы технологической теплофизики, физического материаловедения, сварки и пайки, обработки металлов давлением, которые обеспечили ТПИ – ТГУ высокий авторитет на всероссийской и международной аренах.

Л.А. Резников, кандидат технических наук, доцент



Трудно писать о нем в прошедшем времени. Вдвойне трудно потому, что нам довелось работать рука об руку почти 50 лет. Владимир Ильич Малышев был одним из немногих, кто прошел в ТГУ путь от рабочего до профессора, не пропустив ни одной ступени.

В.И. Малышев родился 1 июня 1948 года в селе Боровка Сергиевского района Куйбышевской области, а в Ставрополь-на-Волге (ныне Тольятти) приехал в 1955 году вместе с родителями, принятыми на строительство Волжской ГЭС. В 1963 году он окончил девятый класс средней трудовой политехнической школы № 25. Школа называлась «трудовой политехнической», потому что вместе с аттестатами выпускникам вручали свидетельства о получении рабочей профессии на одном из заводов города. В школе № 25 девушки учились на лаборантов на заводе синтетического каучука, а ребята на Волжском заводе цементного машиностроения осваивали профессию слесаря или токаря.

Выбрав токарное дело, Владимир и не представлял себе, что связывает с резанием материалов всю свою жизнь. После 9-го класса он перешел в вечернюю школу и стал работать токарем в инструментальном цехе «Волгоцеммаша».

В 1967 году только что созданному Тольяттинскому политехническому институту в числе других вузов и научно-исследовательских институтов правительством СССР было поручено подобрать отечественные аналоги режущим инструментам, которые предполагалось применять на строящемся Волжском автозаводе (сейчас бы сказали – обеспечить импортозамещение). Я в то время был аспирантом профессора А.Н. Резникова и участвовал в этой работе в группе абразивного инструмента, которую возглавлял завкафедрой резания материалов ТПИ В.И. Пилинский. Инструментом для плоского шлифования занималась бригада из трех че-

ловек (включая меня). Объем работы был большим, и Пилинский разрешил принять в бригаду еще одного человека – квалифицированного рабочего. Бывшие коллеги по работе на «Волгоцеммаше» порекомендовали мне Владимира как токаря-лекальщика. Я поначалу засомневался. Лекальщик – это «рабочая аристократия», а парню всего 19 лет. Но друзья показали мне выточное им изделие – три расположенных друг в друге шара с отверстиями, что у токарей считается высшим пилотажем, и это убедило меня.

Малышев начал работать в нашей бригаде, но вскоре, оценив его умение и изобретательность, начальство забрало его у меня «для общих нужд». Сказали, на время, но оказалось, что навсегда.

Вместе с С.В. Николаевым Малышев модернизировал круглошлифовальный станок, благодаря чему они впервые смогли на серийном станке, предназначенном для шлифования со скоростью круга 35 м/с, работать со скоростью 100 м/с и начать исследование скоростного шлифования, которому впоследствии Малышев посвятил большую часть своей почти 50-летней научной биографии. Им были разработаны специальные конструкции скоростных шлифовальных кругов, удостоенные дипломов международной и всесоюзных выставок.

Окончив в 1979 году вечернее отделение Тольяттинского политехнического института, В.И. Малышев стал работать инженером в научно-исследовательской группе кафедры «Резание материалов», а в 1983 году возглавил крупнейшую в ТПИ научно-исследовательскую лабораторию № 1, которой руководил почти 20 лет. Бывали времена, когда НИЛ-1 обеспечивала объем научно-исследовательских разработок больше, чем все остальные НИЛ ТПИ, вместе взятые. Пока Владимир Ильич является единственным в истории города представителем высшей школы, чей портрет был помещен на городскую Доску почета, да еще и два года подряд!

Технологам-машиностроителям известно, что в общих расходах на операции шлифования около 50 % составляют расходы на правку шлифовальных кругов алмазным инструментом. По предложению ВАЗа В.И. Малышев занялся этой проблемой. Им был разработан ряд технических решений, направленных на снижение расходов на правку круга. Наиболее значимым представляется замена в правящем инструменте натуральных алмазов существенно более дешевыми синтетическими. Такие инструменты прошли успешные испытания на ВАЗе и были внедрены в производство на многих шлифовальных операциях. Ощутимый эффект – повышение стойкости кругов в 2...4 раза – дало наложение на правящий инструмент ультразвуковых колебаний.

По этой тематике в 1986 году Малышев защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук (научный руководитель работы – профессор А.Н. Резников).

Успех вдохновил Владимира Ильича. Проанализировав физику процесса, он пришел к выводу, что ультразвуковые колебания могут применяться не только при правке, а и вообще при резании (в том числе лезвийным инструментом). Более того: а почему только ультразвук? Малышев пришел к выводу, что для повышения производительности процесса следует вводить в зону резания дополнительный источник энергии. Выяснив, что при совокупном действии основного и до-

полнительного источников суммарный эффект может существенно превосходить сумму эффектов от каждого из них, Малышев стал развивать новое для ТГУ научное направление – гибридные технологии.

Для повышения научного уровня образовательного процесса В.И. Малышев создал научно-образовательный центр «Эффективные технологии». Реализуя практико-ориентированный подход к подготовке инженеров, он организовал в инструментальном производстве ОАО «АВТОВАЗ» филиал кафедры «Резание, станки и инструменты» ТГУ, которую возглавил в 2004 году (с 2007 года кафедра носит название «Оборудование и технологии машиностроительного производства»).

Кафедре ОТМП в условиях жесткой конкуренции с кафедрами Аэрокосмического и Технического университетов Самары удалось выиграть грант Самарского инновационного фонда на 4 млн рублей, а затем еще несколько подобных грантов. В частности, региональным правительством кафедре было поручено провести анализ состояния и перспектив развития машиностроения в Самарской области. Успешное решение этой задачи способствовало существенному повышению престижа ТГУ среди вузов области.

На средства грантов кафедра приобрела современное станочное оборудование, которое стало использоваться в учебном процессе. Работы научно-образовательного центра «Эффективные технологии» удостоены

высоких наград на различных выставках, в том числе международных. Разработанная под руководством В.И. Малышева образовательная программа по технологии машиностроения первой в области получила аккредитацию Европейской ассоциации инженерного образования.

Владимир Ильич Малышев является автором свыше 200 научных публикаций и десятка монографий. Особо следует выделить его уникальный труд «Очерки истории науки о резании» (Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011) – первую книгу такого рода не только у нас в стране, но и вообще в мировом сообществе ученых-резальщиков. Он работал над ней более 20 лет, и не случайно она получила не только первую премию на всероссийском конкурсе, но и массу положительных отзывов. Причем не только из России, а и из-за рубежа: из Мичиганского университета (США), Высшей технической школы Аахена (ФРГ) и др.

Кафедра ОТМП возродила заложенную А.Н. Резниковым традицию проведения научных конференций по теплофизике технологических процессов. В 2005, 2008 и 2011 годах было проведено три международных конференции – Резниковские чтения, бессменным научным руководителем которых был В.И. Малышев. Очень активно он занимался и подготовкой IV Чтений, посвященных 100-летию его Учителя, первого ректора ТПИ А.Н. Резникова. Увы, закончить эту работу Владимир Ильич не успел...

А.В. Гордеев, кандидат технических наук, доцент

Т.И. Адаевская, кандидат исторических наук, доцент
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: первый вуз города Тольятти; директор Ставропольского филиала Куйбышевского индустриального института; первый ректор Тольяттинского политехнического института; образовательное пространство города Тольятти.

Аннотация: В статье представлены ранее неизвестные широкому кругу результаты исследования страниц истории Тольяттинского государственного университета (ТГУ), связанных с деятельностью руководителей вуза в первые два десятилетия его деятельности. Рассматривается период с его основания в 1951 году как вечернего филиала Куйбышевского индустриального института при Куйбышевгидрострое в городе Ставрополе-на-Волге до 1971 года, когда в Тольяттинском политехническом институте (ТолПИ) сформировались материально-техническая база, научно-педагогический коллектив, заложены основы для развития научных школ и направлений.

Впервые вводится в научный оборот полный список в четкой хронологической последовательности первых шести руководителей вуза: заведующие вечерним филиалом Куйбышевского индустриального института при Куйбышевгидрострое в г. Ставрополе-на-Волге Д.Е. Чуркин, В.Н. Николаев, директора филиала Куйбышевского индустриального института В.Н. Зубков, В.Л. Бондарев, Е.Ф. Винокуров, ректор Тольяттинского политехнического института А.Н. Резников. Выявлены особенности взаимодействия руководителей вуза, органов городского самоуправления и всесоюзных строек по расширению научных и учебно-педагогических задач и формированию единого городского образовательного пространства. Подробно рассматриваются два этапа развития вуза. Первоначальный период создания вечернего филиала КИИ при КГС до переноса города Ставрополя-на-Волге и первые годы в новом строящемся городе. Освещается действенная поддержка филиалу начальника управления строительства «Куйбышевгидрострой» И.В. Комзина, его преподавательская деятельность как профессора. Второй период, когда в Тольятти была создана самостоятельная высшая школа – Тольяттинский политехнический институт (ТолПИ). Появление первого самостоятельного вуза в Тольятти связано с именем профессора А.Н. Резникова, почетного гражданина города Тольятти. Рассматривается его эффективное сотрудничество с Волжским автомобильным заводом и другими заводами страны. Исследуются направления 12-летней деятельности ТолПИ, когда вуз не только расширился, но и стал научно-образовательным центром Поволжья.

Первый вуз города Тольятти был создан в «буднях великих строек» и несколько раз преобразован, согласно масштабным государственным планам индустриальных преобразований страны.

29 января 1951 г. – открыт вечерний филиал Куйбышевского индустриального института (КИИ – ныне Самарский государственный технический университет) при Куйбышевгидрострое в городе Ставрополе-на-Волге.

1964 г. – Ставропольский филиал КИИ переименован в Тольяттинский филиал Куйбышевского индустриального института, т. к. город Ставрополь-на-Волге переименован в город Тольятти.

8 октября 1967 г. – создан Тольяттинский политехнический институт (ТолПИ) на базе Тольяттинского филиала Куйбышевского политехнического института.

8 декабря 1987 г. – создан Тольяттинский филиал Самарского государственного педагогического института (СГПИ – ныне Поволжская государственная социально-гуманитарная академия) [1, с. 158].

29 мая 2001 г. – создан Тольяттинский государственный университет (ТГУ) на базе двух вузов – Тольяттинского политехнического института (ТолПИ) и Тольяттинского филиала Самарского государственного педагогического университета (ТФ СамГПУ).

При изучении этапов формирования университетского коллектива, способного решать сложнейшие задачи, удалось восстановить соответствующие фактические сведения о руководителях вуза и его учредителях, руководителях органов городского самоуправления и всесоюзных строек, данные о расширении материаль-

ной базы, особенности развития учебного процесса, специфики формирования научных школ. Были привлечены данные областных, муниципальных и личных архивов. Особую благодарность выражаем ректору Тольяттинского государственного университета профессору М.М. Кришталу за помощь в реставрации документально точной хронологии описываемых событий; заведующей музеем Т.А. Якимовой и сотрудникам музея Тольяттинского государственного университета, собравшим обширную коллекцию фотодокументов, архивных данных, воспоминаний сотрудников. Большую помощь в подборе документов оказала заместитель начальника Управления делами (руководитель архива) ТГУ Н.В. Шпомер.

Формирование, становление, расширение и развитие Тольяттинского государственного университета – результат многолетнего взаимодействия органов городского самоуправления, строителей всесоюзных строек и коллектива первого вуза на территории города Тольятти. Рассмотрим наиболее значимые этапы эффективного взаимодействия за двадцатилетний период с 1951 по 1971 г.

Строительство ГЭС на Волге начиналось с учетом опыта первых социалистических строек. Возводить и осваивать мощности предстояло высококвалифицированным специалистам. Обучать их инженерным специальностям было решено в ближайшем от строительства городе Ставрополе-на-Волге. На страницах своей книги «Это и есть счастье» об идее создания института вспоминал Иван Васильевич Комзин, возглавлявший строительство Куйбышевской ГЭС на

Волге: «Два дня вместе с секретарем райкома А. Краснушкиным ходим по городу, выбираем подходящие помещения. Выбор, надо сказать, довольно трудный. Соляной лабаз приспособили для управления, а еще одно помещение нашли для вечернего гидротехникума, которого, кстати говоря, еще не было даже на бумаге. Однако мы уже подумывали о филиале Куйбышевского индустриального института. Нет, не рано было заботиться об этом. Надо непременно сразу же заложить гнездо, чтобы вывести своих орлят гидростроительства. Иначе не осилим великую программу» [2, с. 69].

Иван Васильевич Комзин (рис. 1) – Герой Социалистического Труда. Заслуженный строитель РСФСР. Генерал-майор военно-строительных войск СССР в отставке. Начальник управления строительства «Куйбышевгидрострой» с 1950 по 1959 г. (рис. 2). С 1950 по 1952 год также руководил Кунеевским исправительно-трудовым лагерем.



Рис. 1. Иван Васильевич Комзин.
Начальник управления строительства
«Куйбышевгидрострой» с 1950 по 1959 г.



Рис. 2. Строительство Волжской ГЭС.
Фотография из музея Тольяттинского
государственного университета

Старожилы города Ставрополя-на-Волге вспоминали, как в аэропорт, находившийся на месте парка в Центральном районе Тольятти, регулярно прилетал всего один самолет с единственным пассажиром – И.В. Комзиным. Обладал недюжинной работоспособностью и организаторским талантом. Скромнен в быту, дерзновенный и устремленный к профессиональному успеху. О масштабе легендарной личности свидетельствуют отдельные факты его биографии. Под руководством И.В. Комзина Куйбышевгидростроем в Тольятти построены завод «Волгоцеммаш», Тольяттинский электротехнический завод. Отчитываться ему о строительстве приходилось лично И.В. Сталину, а затем Н.С. Хрущеву. Руководил вводом в эксплуатацию более 30 крупных заводов, среди них несколько уникальных строек века. Профессор МИСИ им. В.В. Куйбышева (1965–1983 гг.). С 1968 года директор Всесоюзного научно-исследовательского института организации и управления в строительстве. С 1977 года почетный доктор Лейпцигской высшей технической школы. Избирался депутатом Ставропольского и Куйбышевского областного Советов депутатов трудящихся, депутатом Верховного Совета РСФСР от Куйбышевской области. Автор книг «Я верю в мечту», «Свет Асуана», «Записки советского энергетика», «Это и есть счастье». Примечательно, что ученое звание профессора И.В. Комзин получил в Ставрополе-на-Волге, в вузе, созданном при его ходатайстве и активном участии.

Оба учебных заведения в г. Ставрополе-на-Волге – техникум и институт – были созданы в первый год строительства Куйбышевгидростроя. По приказу Министра высшего образования СССР № 168 от 29 января 1951 года при Куйбышевгидрострое был открыт вечерний филиал Куйбышевского индустриального института имени В.В. Куйбышева (КИИ) [3, с. 19]. КИИ – ныне Самарский государственный технический университет, один из старейших вузов Поволжья. Его история началась с Указа «Об учреждении в городе Самаре политехнического института» в июле 1914 г., подписанного последним российским императором Николаем II.

В советский период руководители вуза процедуру выборов на конференции коллектива или на ученом совете не проходили. Кандидатуры руководителей после сложной процедуры согласования в органах самоуправления, министерстве образования СССР и ректорате головного вуза назначались на должность руководителя института.

По приказу директора КИИ Н.П. Воскобойникова № 116 от 24 июля 1951 г. начальником вечернего филиала Куйбышевского индустриального института при Куйбышевгидрострое назначен инженер Дмитрий Ефимович Чуркин, старший преподаватель кафедры «Общая и неорганическая химия», в порядке перевода из Куйбышевского авиационного института. Он руководил филиалом 1951/1952 учебный год [4, с. 19]. В последующие годы Д.Е. Чуркин периодически командировался в Ставрополь-на-Волге, где читал лекции в качестве преподавателя с почасовой оплатой на кафедре «Общая и неорганическая химия». Постоянным его местом жительства был г. Куйбышев.

Открытие первого вуза в провинциальном городке стало событием. В 50-е годы XX столетия Ставрополь-на-Волге в летний день можно было пешком пересечь

по пыльным узким улочкам за 40 минут [5, с. 3]. В городе насчитывалось пять десятков улиц, переулков и закоулков. На некоторых улицах – деревянные тротуары со скрипом. Весной и дождливой осенью на улицах города была непролазная грязь, по улицам не только не пройти, но и не проехать, как вспоминают старожилы. Над одноэтажным городом возвышались собор и церковь да пожарная каланча. Двухэтажные дома встречались редко [6, с. 143]. На десяти небольших предприятиях города трудились 750 человек. К началу 1951 г. в Ставрополе-на-Волге проживали 11 896 жителей. Тихий, дачный, курортный городок, один из центров кумысосоления, оживал лишь с летним приездом отдохнувших. Два техникума, 4 школы, 3 библиотеки, 3 детских сада, курортный зал с театральной сценой, клуб, стадион – такова была небогатая инфраструктура городка [7, с. 44]. Специалистов с высшим образованием в Ставрополе-на-Волге проживало единицы, в основном со средним и неполным средним образованием. Большая часть населения обладала начальным образованием. Встречались малограмотные и неграмотные горожане. Население занималось огородничеством, рыболовством, сдавало летом дачи отдохнувшим из Москвы, Ленинграда и других городов.

Грандиозное строительство изменило размеренную жизнь города и судьбу его жителей. Открытие вуза при Куйбышевгидрострое было своевременным решением. На стройку по вербовке МВД (сразу после Волга-Донского канала, Цимлянкой ГЭС и других завершенных строек ГУЛАГа), по партийно-комсомольскому призыву, зачастую и по зову сердца прибывали и прибывали новые труженики. Предстояло решить сложнейшую задачу: организовать жизнь вольнонаемных рабочих. Многие бывшие заключенные Кунеевского лагеря выбирали Ставрополь-на-Волге для постоянного места жительства. Теперь в Ставрополе-на-Волге молодежь могла получить высшее образование и престижную в годы бурного индустриального строительства профессию инженера. В каких аудиториях разместить студентов, где найти мебель, на каком транспорте доберутся до места учебы? Эти вопросы предстояло решать руководству молодого вуза, города, строительства ГЭС. Решено было строить специальное здание вечернего отделения Ставропольского филиала Куйбышевского индустриального института на месте старого рынка, где находилась артель «Заря», мучные склады, кинотеатр «Буревестник».

При поддержке городских властей было найдено временное решение: вечернее отделение Ставропольского филиала КИИ разместили в одном из деревянных складов на берегу реки Волги. Мария Георгиевна Иванова, один из партийных работников Ставрополя-на-Волге, вспоминала: «Помещение деревянного склада на берегу Волги приспособили для чтения лекций первым студентам вечернего филиала Куйбышевского индустриального института. Прорубили окна, завезли доски, очистили помещение. Молодежь после работы на стройке шла еще и на строительство института в вечернее время». [8, с. 2]. В этом помещении студенты учились первый учебный 1951/1952 г. (рис. 3).

Желающих учиться было немало. В архивных источниках ТГУ отмечается, что первых студентов в 1951/1952 учебном году было 150 человек. Они обу-

чались по двум специальностям – «Строительство гидросооружений» и «Электрические станции и системы» [9, с. 2]. Отработав смену, рабочие спешили на вечерние лекции с 18 до 22 часов. Читали лекции и в выходные дни. Занятия проводили преподаватели Куйбышевского индустриального института. Подбор преподавателей оказался очень сложным процессом. Лекции вели преподаватели-совместители с мизерной почасовой оплатой труда. Их привозили на грузовиках для вахтовых рабочих (вахтовках) по плохой дороге. Отчитав лекции залпом, преподаватели возвращались в г. Куйбышев. На такую работу соглашались альтруисты и энтузиасты.



Рис. 3. Деревянный склад. Первое помещение вечернего филиала Куйбышевского индустриального института в г. Ставрополе-на-Волге (строение не сохранилось до наших дней). Фотография из архива Тольяттинского краеведческого музея

В первый учебный год было сделано немало, но планировалась более значительная организация учебного процесса. Весной возникла угроза затопления приспособленного под занятия студентов здания бывшего склада. Вечерний филиал КИИ разместили в портгороде Ставрополя-на-Волге школе № 2. После работы студенты добирались в институт на вахтовках и, размещаясь в школьных классах, слушали лекции.

В начале 1952/1953 учебного года на должность исполняющего обязанности заведующего вечерним филиалом Куйбышевского индустриального института в г. Ставрополе-на-Волге по совместительству назначен Виктор Корнеевич Николаев, старший преподаватель кафедры «Графика» КИИ [10, с. 19], проработавший на этой должности один учебный год.

Впоследствии В.К. Николаев свой потенциал управленца реализовал в КИИ, где работал заместителем декана механического факультета и периодически командировался в Ставрополь-на-Волге для чтения лекций и проведения экзаменов по начертательной геометрии и графике. В 1959 г. обучался в годичной аспирантуре Московского автомеханического института.

На 1952/1953 учебный год в связи с задержкой строительства учебного здания [11, с. 19] вечерний филиал КИИ временно разместили в небольшом двухэтажном здании из красного кирпича дореволюционной

постройки (дом купца В.Н. Климушкина), где размещалось управление Куйбышевгидростроя в Ставрополе-на-Волге (рис. 4).



Рис. 4. Начало XX в. Дом купца Н.А. Климушкина. Вечерний филиал КИИ размещался в здании управления Куйбышевгидростроя в г. Ставрополе-на-Волге (строение до наших дней не сохранилось). Фотография из архива Тольяттинского краеведческого музея

Строительство социально значимых объектов в инфраструктуре города едва поспевало за грандиозными преобразованиями, привлекавшими молодежь на все-союзные стройки. Возведение крупнейшей в Европе Куйбышевской электростанции и ведущих в мировой химической индустрии предприятий в короткие сроки изменило как численность населения, так и атмосферу городской жизни, диктовало спрос на качественное образование.

В феврале 1952 г. был рассмотрен и согласован Генеральный план застройки нового Ставрополя-на-Волге, разработанный коллективом Ленинградского филиала института «Гипрогор» (руководитель проекта архитектор Ю.М. Киловатов). План предусматривал строительство города с населением 40 тысяч человек. В январе 1953 г. Ю.М. Киловатову было дано указание переделать этот проект застройки на новый – с расчетом на 100 тысяч ставропольчан [12, с. 45].

В 1953–1954 годы город Ставрополь-на-Волге был перенесен на подготовленную площадку, а историческая его территория была затоплена, что соответствовало поэтапному созданию Куйбышевского водохранилища перед ГЭС. На тех же салазках из труб, используемых в ходе строительства для перевозки грузов, переносили отдельные дома на новые улицы нового города. Затопленными оказались два городских кладбища. Прах умерших ставропольчан перенесли на Баныкинское кладбище. Под водой оказалось и кладбище при Кунеевском лагере.

Начиналось бурное строительство нового города. Руководство города и строительства КГС особо рассматривало вопрос о развитии возможностей для подготовки инженеров. В 1953 г. по рекомендации И.В. Комзина заведующим вечерним отделением, впоследствии директором филиала Куйбышевского индустриального института при КГС в г. Ставрополе-на-Волге назначен кандидат технических наук, доцент Ва-

сильи Никанорович Зубков (рис. 5). 47-летний ученый-практик имел значительный опыт. Уроженец Рязанской губернии, окончил церковно-приходскую школу, затем двухклассное начальное училище. Трудовую деятельность начал с 11 лет. В 1935 г. окончил Московский институт инженеров транспорта, работал на железной дороге в Москве, в Воркуте. Прошел трудовой путь от рабочего до главного инженера и технического эксперта научно-технического совета Министерства путей сообщения СССР по научным работам и новой технике. Одновременно преподавал 7 дисциплин строительного профиля в Московском институте инженеров транспорта. В годы Великой Отечественной войны работал на железнодорожном транспорте, имел научные разработки в области восстановления насыпей, по результатам которых защитил кандидатскую диссертацию. В 1949–1951 гг. преподавал в Хабаровском институте инженеров железнодорожного транспорта, заведовал кафедрой «Путь и путевое хозяйство». В своей биографии В.Н. Зубков писал: «Мною разработано три весьма важных изобретения, по одному из которых (оборонного значения) меня лично в Кремле принимал И.В. Сталин» [13, с. 2].

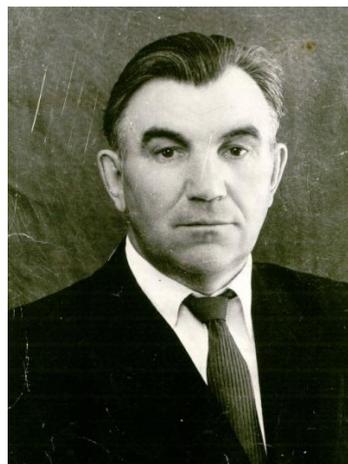


Рис. 5. Василий Никанорович Зубков. Директор Ставропольского филиала КИИ с 1953 по 1963 г.

В 1951–1952 гг. В.Н. Зубков находился в заключении по политической статье. Вероятно, попал туда по так называемому спецзаказу, гулаговской схеме мобилизации специалистов необходимой квалификации. Как профессионал в области железобетонных сооружений, назначен начальником производственно-технического отдела на строительстве Цимлянского гидроузла Волго-Донского канала. Был бесконвойным заключенным: приходил в лагерь только ночевать, отмечаясь на вечерней и утренней поверке. После окончания строительства Цимлянского гидроузла Василий Никанорович освобожден досрочно с объявлением благодарности за добросовестный труд. С 1952 г. В.Н. Зубков трудился на строительстве Куйбышевской ГЭС и с энтузиазмом воспринял идею создания для строителей гидростанции и жителей города института и стал одним из первых преподавателей вечернего филиала КИИ при КГС.

Совмещал работу на должности директора филиала с заведованием кафедрой «Гидростроительные дисциплины», с должностью декана механического факультета (с 1961 года). В автобиографии (1958 г.) он писал, что являлся автором более 50 научно-технических работ. Удачное сочетание опыта строителя и педагогической практики позволило ему успешно руководить филиалом несколько лет.

В 1953 г. при активной помощи городских властей и руководителей Куйбышевгидростроя было завершено строительство здания для вечернего филиала КИИ на улице Гидростроевской, дом 17 (рис. 6). Новые светлые аудитории студенты занимали только вечером. Поэтому в дневное время в здании размещалось управление КГС. (В наши дни в здании размещается факультет информационно-технического сервиса ПВГУС.)



*Рис. 6. 1953 г. Вечерний филиал КИИ
в г. Ставрополе-на-Волге.
Фотография из музея Тольяттинского
государственного университета*

В 1955 году вечернее отделение КИИ перешло в специально построенные для него учебные корпуса – три двухэтажных здания: 2 учебных и одно общежитие по улице Мира, дома 5, 7, 9. Приступили к созданию своей лабораторной базы. В 1953/1954 учебном году количество студентов выросло до 650 человек [14, с. 3].

Вместе с И.В. Комзиным Василий Никанорович Зубков подбирал кадры преподавателей, добивался расширения штатов, открывал две новые специальности: инженер-механик, инженер-сварщик. Необходимо было создать стабильный коллектив преподавателей, проживающих в Ставрополе. Проблема с педагогическими кадрами в городе была очень острой. В 1954 году приняты на работу 8 первых штатных преподавателей, разместившихся в отдельных комнатах общежития. Причем до 1955 года единственным штатным преподавателем – кандидатом наук был только В.Н. Зубков. И ни одного штатного доктора наук в преподавательском коллективе не работало. Предстояло найти баланс при формировании коллектива, формируя его из теоретиков и практиков. В числе первых преподавателей – главный инженер строительства Н.В. Разин; главный

энергетик И.А. Никулин, другие руководители и специалисты стройки в Жигулях. Спецкурсы первым студентам – молодым строителям гидроузла и города – читали приглашенные столичные профессора с мировыми именами.

Активной педагогической деятельностью в вечернем филиале Куйбышевского индустриального института в г. Ставрополе-на-Волге занимался начальник Управления строительства «Куйбышевгидрострой» И.В. Комзин. Его лекции пользовались большой популярностью среди студенчества и научных работников. Участвовал в обсуждении дипломных проектов и их защитах. В 1956 г. И.В. Комзин, как председатель государственной комиссии, вручал первые дипломы в торжественной обстановке в недавно построенном клубе «40 лет ВЛКСМ» 45 молодым специалистам – инженерам-гидротехникам и энергетикам.

Результаты работы в вечернем филиале КИИ Иван Васильевич Комзин обсудил даже с Н.С. Хрущевым. На страницах книги «Это и есть счастье» вспоминал этот разговор:

«– Кто там учится? Дети ваши?»

Отвечаю, что учатся и дети, но главным образом взрослые строители...

– Вечерами учатся?

– Вечерами... После трудного рабочего дня.

– Подвижники.

Но я еще не успел рассказать Никите Сергеевичу, как эти люди, отработав восемь часов в стужу, мороз, должны еще с немалым трудом добраться до института – добрый десяток километров до него, а с транспортом очень плохо, так что надо еще повисеть на ветру на подножке автобуса или вскочить в кузов грузовика. А сколько их шагает пешком по обочинам дорог, этих энтузиастов труда и ученья!»

Подвижниками были и преподаватели, и руководители института, стройки, города. «Товарищ Комзин возглавляет и сам активно участвует в большой научной работе КИИ по обобщению опыта строительства Куйбышевского Гидроузла», – отмечал в письме директор КИИ Е.В. Совкин председателю ВАК СССР и просил его личного вмешательства и поддержки И.В. Комзина. В 1957 году И.В. Комзин получил ученое звание профессора [15, с. 148].

В конце 1950-х годов педагогический коллектив филиала расширился. В его состав вошли молодые преподаватели А.Э. Лившиц, П.М. Шаронов, Н.В. Гусев, З.С. Колобаева, Ю.А. Кустов.

Направление эффективного руководителя И.В. Комзина на очередное строительство лишило директора вечернего филиала КИИ в г. Ставрополе-на-Волге В.Н. Зубкова ощутимой поддержки. На заседаниях ученого совета КИИ неоднократно отмечались в его деятельности «существенные недостатки»: упущения в учебно-методической работе, плохое укомплектование библиотеки учебниками, пособиями и иностранной литературой, частая смена преподавателей по ряду дисциплин, редкое обсуждение лекций на методических совещаниях после взаимопосещений. Проверки были и со «стороны партийного контроля» [16, с. 12]. Отметив отдельные недостатки в работе вечернего филиала КИИ в г. Ставрополе-на-Волге, Городской комитет КПСС сделал главный вывод: постановка учебной работы

в филиале в основном соответствует требованиям гидростроителей, стремящихся повысить свое инженерное образование. В свою очередь, В.Н. Зубков отмечал: «Практически вечерний филиал КИИ в г. Ставрополе-на-Волге не получает ни методической, ни материальной, ни научной помощи от КИИ. Таким образом, филиал живет своей обособленной жизнью».

В 1961 году в филиале КИИ в г. Ставрополе-на-Волге стали обучать первых студентов по очной форме обучения. Год спустя по инициативе В.Н. Зубкова в городской администрации был поставлен вопрос о необходимости строительства студенческого городка. При поддержке городских и партийных властей добился выделения средств на его проектирование. В результате огромных усилий была выделена площадь более 20 тыс. кв. м и началось строительство первого учебного корпуса – ныне Главный корпус университета ул. Белорусская, 14). Проект студенческого городка предусматривал строительство 2 зданий учебного корпуса по 60 тыс. куб. м, 3 зданий лабораторных корпусов по 22 тыс. куб. м, 4 зданий общежитий на 400 мест и несколько жилых домов. Пока на месте будущего главного корпуса Тольяттинского государственного университета, на улице Белорусской, колосилось большое поле, засеянное просом. Строительство главного корпуса и всего студенческого городка было начато в 1962 году и продолжалось несколько лет.

В.Н. Зубков неоднократно избирался депутатом Ставропольского городского совета депутатов трудящихся. Награжден медалью «За трудовую доблесть» (1952), орденом «Знак Почета» (1958), удостоен звания почетного железнодорожника СССР. В 1962 году ему удалось добиться «самостоятельного баланса» от КИИ, но использовать его для большей самостоятельности филиала он не успел.

В июле 1963 года В.Н. Зубков был освобожден от должности директора филиала КИИ при КГС, продолжал трудиться в вузе на должностях заведующего кафедрой «Организация строительных и спецработ», декана механического факультета филиала. В октябре 1963 года В.Н. Зубков переведен на работу в город Куйбышев, впоследствии переехал в Киев.

Подобрать нового директора филиала КИИ при КГС в г. Ставрополе-на-Волге оказалось делом непростым. С 1963 по 1964 г. исполняющим обязанности директора филиала Куйбышевского индустриального института при КГС работал старший преподаватель кафедры «Общетеоретические дисциплины» КИИ Василий Лазаревич Бондарев (рис. 7). Он руководил вузом в сложный год завершения строительства главного корпуса филиала (рис. 8). В декабре 1964 года по улице Белорусской, дом 14 построено здание, ставшее визитной карточкой первого вуза города.

26 февраля 1964 года директором филиала Куйбышевского индустриального института в г. Тольятти и председателем ученого совета назначен доцент кафедры «Механико-машиностроительные дисциплины» КИИ Евгений Федорович Винокуров (рис. 9). Руководил филиалом три года. Е.Ф. Винокуров учился в Куйбышевском индустриальном институте по направлению завода «Волгоцеммаш», в котором начинал трудовую деятельность рабочим. Закончил вуз в 1948 году. В студенческие годы выделился как партийный активист

и профсоюзный организатор. После окончания вуза трудился инженером, впоследствии – главным инженером завода «Волгоцеммаш».



Рис. 7. Василий Лазаревич Бондарев. Исполняющий обязанности директора филиала КИИ при КГС в г. Ставрополе-на-Волге с 1963 по 1964 г.



Рис. 8. Тольятти. Главный корпус студенческого городка Филиала КИИ в Ставрополе-на-Волге, построенный в 1964 г. на улице Белорусской, дом 14. Фотография из архива и музея Тольяттинского государственного университета



Рис. 9. Евгений Федорович Винокуров. Директор филиала КИИ при КГС в г. Тольятти с 1964 по 1967 г.

Е.Ф. Винокуров преподавал в Ставропольском филиале КИИ с 1963 года, был назначен деканом

механического факультета (рис. 10), одновременно заведовал кафедрой «Механико-машиностроительные дисциплины». В августе 1964 года произошло важное событие: филиал КИИ в г. Тольятти был «переведен на самостоятельный баланс», что давало право директору самостоятельно осуществлять прием-увольнение сотрудников, зачислять и отчислять студентов. Появилась своя печать, бланки, самостоятельный баланс.

Однако проблема привлечения на преподавательскую работу специалистов, имеющих ученые степени и звания, оставалась в Тольяттинском филиале КИИ нерешенной. В 1967 году Е.В. Винокуров переведен на другую должность в город Куйбышев.



Рис. 10. 1967 г. Государственный экзамен. Фотография из музея Тольяттинского государственного университета

27 октября 1966 года приказом министра высшего и среднего образования РСФСР В.Н. Елютина «Об обеспечении строительства Волжского автомобильного завода кадрами специалистов» № 619 было принято решение: организовать в 1967 году на базе Тольяттинского филиала Куйбышевского политехнического института организован Тольяттинский политехнический институт [17, с. 1870]. Срочно потребовались инженеры – машиностроители, способные перенять опыт итальянских специалистов и самостоятельно продолжать работать на заводе.

В 1967 году ректором Тольяттинского политехнического института назначен Арон Наумович Резников (рис. 11), доктор технических наук, профессор. Среди штатных преподавателей института появился первый доктор наук. Особого внимания заслуживают биографические факты и портретные штрихи первого ректора Тольяттинского политехнического института, определившего стратегию развития вуза на длительный отрезок времени. Вузом был осуществлен значительный качественный скачок, адекватный отраслевому изменению в промышленности страны. Городу Тольятти было суждено стать столицей отечественного автопрома.

А.Н. Резников родился в 1915 г. в городке Толочин Минской губернии в семье студента Варшавского политехнического института. В 1938 г. закончил с отличием Харьковский механико-машиностроительный институт. Трудовая биография Арона Наумовича Резникова началась с должности инженера-технолога на заводе текстильного машиностроения. В 1939 г. он поступил в аспирантуру Харьковского механико-машиностроительного института. В годы Великой Отечествен-

ной войны работал в Алма-Ате, где преподавал и руководил работами для обороны страны. В марте 1944 года для окончания аспирантуры перевелся в Куйбышевский индустриальный институт, где и защитил кандидатскую диссертацию (1945 г.), в 1959 году – докторскую диссертацию. В период с 1944 по 1967 г. работал в Куйбышевском индустриальном институте, где 9 лет возглавлял механико-технологический факультет и превратил его в один из сильнейших в регионе. Одновременно заведовал кафедрой «Резание и режущие инструменты» Куйбышевского политехнического института.



Рис. 11. 1967 г. Арон Наумович Резников. Ректор Тольяттинского политехнического института с 1967 по 1979 г.

В 1967 году Арон Наумович возглавил Тольяттинский политехнический институт. От нового назначения сначала отказывался, не желая переезжать из Куйбышева. Но решению обкома КПСС пришлось подчиниться [18, с. 33]. А.Н. Резников в период с 1964 по 1967 г. являлся членом Куйбышевского Горкома КПСС и председателем комиссии по новой технике Горкома. С 1967 г. стал членом Тольяттинского горкома КПСС, председателем технико-экономического совета при ГК КПСС. Участвовал в планировании деятельности Тольяттинского политехнического института (рис. 12). В отличие от своих предшественников, возглавлявших вуз, инженеров-практиков, А.Н. Резников, стал ректором, будучи уже зрелым ученым. Сумел наладить конструктивные отношения с директором Волжского автомобильного завода В.Н. Поляковым (рис. 13, 14), руководством города и области. Да и на прежнем месте работы в КИИ его вспоминали как одного из самых грамотных и умелых руководителей, человека высокой культуры и такта.

Одним из первых приказов ректора А.Н. Резникова был приказ о составе ученого совета Тольяттинского политехнического института. В него вошли 40 членов совета, в том числе «представители Волжского автомобильного завода» [19, с. 96]. Он пригласил на работу своих учеников, которые стали первыми проректорами, деканами и заведующими кафедрами. За 12 лет его руководства в молодом вузе было создано 13 новых

кафедр, в том числе кафедра пайки, разворачивались масштабные научные исследования, создавались академические традиции.



Рис. 12. 1968 г. Обсуждение перспектив развития ТолПИ. Ректор ТолПИ А.Н. Резников, министр высшего образования СССР В.П. Елютин, секретарь Куйбышевского обкома КПСС Н.Н. Панов, проректор по науке ТолПИ В.И. Столбов. Фотография из музея Тольяттинского государственного университета



Рис. 13. 1968 г. А.Н. Резников и директор ВАЗа В.Н. Поляков обсуждают результаты испытаний станка для сверления бетона, сконструированного учеными ТолПИ

Были приглашены перспективные ученые из других ведущих вузов страны. Выделились руководители научных школ и ведущие исследователи по научным направлениям (М.А. Криштал, Ж.С. Рава, В.И. Столбов, А.Э. Лившиц, Б.Н. Перевезенцев, С.П. Коршунов, О.И. Драчев, В.В. Ивашин и другие). Отдельные кадровые решения требовали от ректора гражданского мужества. Принять на работу поссорившегося с руководителем обкома КПСС г. Тулы профессора М.А. Криштала, отбывшего наказание в исправительно-трудовом лагере на строительстве ГЭС профессора Ж.С. Раву решились бы не многие руководители.



Рис. 14. 1972 г. В.Н. Поляков и А.Н. Резников. Подписание договора о сотрудничестве ВАЗа и ТолПИ. Фотография из музея Тольяттинского государственного университета

Под руководством А.Н. Резникова Тольяттинский политехнический институт стал авторитетным высшим учебным заведением с высоким научным потенциалом. Одновременно он возглавлял кафедру «Резание, станки и инструмент». Через 10 лет в ТолПИ работали семь докторов и 151 кандидат наук, число студентов возросло в 2,5 раза. Приглашенные преподаватели, по ходатайству ректора перед городской администрацией, получили отдельные квартиры в Тольятти. Радость сотрудников, празднующих новоселье, юбилеи, защиты диссертаций, разделял весь коллектив института (рис. 15).



Рис. 15. 1975 г. А.П. Абрамов и профессор М.А. Криштал поздравляют с юбилеем ректора ТолПИ А.Н. Резникова

Подготовка специалистов велась на 5 факультетах. Построены здания автомобильного факультета, столовой на 530 мест (рис. 16), двух общежитий, работал детский сад и летний лагерь «Политехник». В распоряжении студентов было 70 лабораторий, библиотека на 300 тыс. томов.

Особое внимание уделялось внеучебной работе студентов. Концертные выступления самостоятельных студенческих коллективов пользовались успехом у населения города.

Профессор А.Н. Резников – ученый с мировым именем, специалист в области резания материалов и технологии машиностроения, внесший огромный вклад

в становление и развитие теории тепловых процессов при резании материалов лезвийными, абразивно-алмазными режущими инструментами. Им создано новое направление в теории механической обработки материалов – теплофизика резания. Был научным руководителем научно-исследовательской межкафедральной лаборатории № 1 ТолПИ (начальник лаборатории В.И. Малышев), объединявшей ученых нескольких кафедр в один коллектив для выполнения сложнейших научных задач и опытно-конструкторских работ по заказам АВТОВАЗа, Волгоцеммаша, ТЭЗа и других предприятий г. Тольятти. География научных контактов была обширной: Москва, Ленинград, Куйбышев, Вильнюс, Киев, Свердловск, Ташкент, Баку, Ульяновск, Пермь, Одесса, Горький, Саратов, Свердловск, Челябинск.



Рис. 16. В 1973 г. построено здание студенческой столовой по улице Баныкина. Фотография из музея Тольяттинского государственного университета

А.Н. Резников освещал результаты своих исследований на лекциях в Венгрии и Польше. Результаты его научных исследований отражены более чем в 240 работах, в том числе в 11 монографиях, 15 книгах, 30 авторских свидетельствах. Многие статьи опубликованы за рубежом. В последние годы своей жизни написал книгу «Эскизы прошлого в проекции на настоящее», а также брошюру «Советы молодому преподавателю». Как педагог, он считал, что нужно воспитывать похвалой – она окрыляет – и советовал в меру использовать юмор. Профессор Резников известен и как активный организатор науки, он руководил рядом Всесоюзных конференций по теплофизике технологических процессов, являлся членом ряда научно-методических и научных советов при ГКНТ СССР, АН СССР и Госкомитета по народному образованию СССР.

Значителен вклад Арона Наумовича в подготовку молодых ученых. Учениками профессора А.Н. Резникова стали В.И. Малышев, Е.Я. Седыкин, О.Б. Федосеев, В.В. Щипанов, А.М. Маханов, А.В. Гордеев, В.Г. Виткалов, С.М. Бобровский, Я.И. Барац, Г.Г. Яшин, В.В. Басов, Б.И. Питкалов, А.В. Щипанов, А.В. Пилинский, С.В. Николаев, Б.Г. Яновский, А.Н. Пахоменко, Т.Г. Караченцева и др.

О своей работе в должности ректора А.Н. Резников отмечал: «Задание, которое я получил в 1967 году –

преобразовать провинциальный филиал в самостоятельный вуз, в основном выполнено» [20, с. 3]. В 1971 году, всего лишь через четыре года после организации, Тольяттинский политехнический институт переведен в первую категорию вузов СССР, что означало автоматическое повышение заработной платы преподавателей. Это стало реальной оценкой успешной работы коллектива вуза.

Визитной карточкой Тольяттинского политехнического института стали его выпускники, ставшие успешными людьми и добившиеся значимых результатов на производстве, в науке и общественной жизни города и страны (рис. 17).



Рис. 17. 2001 г. На юбилее Л.А. Резникова: И.В. Касилов, Л.А. Резников, С.Ф. Жилкин, В.И. Столбов

А.Н. Резников основал, возглавил и развил научную школу по теплофизике механической обработки, был первым в Тольятти награжденным государственной наградой «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР» (1990 г.) в нашем городе, депутатом городского совета в 1968–1979 гг. Почетный профессор Тольяттинского политехнического института. Ученый награжден орденом «Знак Почета» (1961), медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне» (1946), «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина» (1970), «Ветеран труда» (1977). Удостоен звания «Почетный гражданин города Тольятти» (1995) [22, с. 9].

В 1979 году шестидесятичетырехлетний профессор А.Н. Резников переведен с должности ректора на работу в качестве заведующего кафедрой «Резание, станки и инструмент», в связи с тем, как написал Арон Наумович в анкете, что трудно сочетать научную работу с административной. Профессор продолжил активную научную деятельность [21, с. 429].

Ректором ТолПИ был назначен кандидат технических наук, проректор по науке Владимир Иванович Столбов, приехавший в г. Тольятти по приглашению А.Н. Резникова из Куйбышевского филиала НИАТ. Молодого и перспективного ученого наставляли в обкоме партии: «Ваша деятельность должна способствовать улучшению советского автопрома». Эти слова В.И. Столбов принял как приказ. И старался выполнять, работая 12 лет проректором по науке и 22 года – ректором Тольяттинского политехнического института.

Первые руководители вуза внесли огромный вклад в формирование академической культуры общения,

традиций в г. Тольятти, создание университетского образовательного пространства – новой образовательной структуры, призванной стать интеллектуальным и культурным центром городского социума. Им приходилось принимать судьбоносные решения, взаимодействовать с городской администрацией, находить компромисс с партийным руководством области и города, брать на себя ответственность, рисковать. И в результате вуз не только расширялся, но и повышал статус: вечерний филиал института – институт – УНИВЕРСИТЕТ!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адаевская Т.И., Плеханов И.П., Прыскина Е.А., Семашкин А.А., Чичканова Т.А., Ямашев В.М. История развития системы образования Поволжья. Самара: Самарский госпедуниверситет, 1997. 168 с.
- Комзин И.В. Это и есть счастье. М.: Молодая гвардия, 1959. 288 с.
- СССР. Министерство высшего образования. Приказ № 169 от 29.01.1951 // Архив Тольяттинского государственного университета.
- Куйбышевский индустриальный институт. Директор. Приказ № 181 от 26.08.1952. // Архив Тольяттинского государственного университета. Оп.1. Ед. хр.1. С. 19.
- Адаевская Т.И. Демографический феномен Тольятти во второй половине XX столетия // ELPIT-2013. PROCEEDINGS. Т. 3. Тольятти: ТГУ, 2013. С. 3–8.
- Адаевская Т.И., Цветкова И.В. Особенности процессов формирования населения г.о. Тольятти // Инновации как фактор развития промышленного города. Тольятти: Волжский университет им. В.Н. Татищева, 2013. С. 126–128.
- Рассказ Ивановой Марии Георгиевны // Архив музея Тольяттинского государственного университета. Оп. 1. Д. 1. 3 с.
- Справка о вечернем факультете Куйбышевского индустриального института при Куйбышевгидрострое по состоянию на 1 февраля 1959 г. // Архив Тольяттинского государственного университета. Оп. 1-н. Д. 44. 8 с.
- Приложение к приказу по КИИ им. В.В. Куйбышева № 21 от 8 февраля 1951 г. // Архив Тольяттинского государственного университета.
- Приказ начальника Управления строительства Куйбышевской гидроэлектростанции МВД СССР № 525 от 4 августа 1952 года // Архив Тольяттинского государственного университета.
- Исторические хроники Ставрополя-Тольятти. Самара: Агни, 2007. 296 с.
- Автобиография В.Н. Зубкова // Архив музея Тольяттинского государственного университета. Оп. 1. Д. 1. Л. 80.
- Историческая справка // Архив Тольяттинского государственного университета. Оп. 1. Д. 39. Ед. хр. 10. 150 с.
- Приказ директора КИИ № 275 от 21.05.1957 // Архив Тольяттинского государственного университета.
- Справка Ставропольского ГК КПСС // Архив Тольяттинского государственного университета. Оп. 1. Д. 40. 20 с.
- Ямашев В.М. Отраслевое развитие города Тольятти во второй половине XX века. Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. 194 с.
- Вавилина О.А. Первый ректор. Тольятти: Атриум, 2005. 242 с.
- Архив музея Тольяттинского государственного университета. Оп. 1. Д. 1. Л. 96.
- Мальшев В.И. В науке он шел по стопам отца // Alma mater. 1999. № 7. С. 80.
- Резников А.Н. Эскизы прошлого в проекции на настоящее. Самара: Корпорация «Федоров», 1998. 440 с.
- Профессора Тольяттинского государственного университета. Тольятти: ТГУ, 2003. 191 с.

REFERENCES

- Adaevskaya T.I., Plekhanov I.P., Prysikina E.A., Semashkin A.A., Chichkanova T.A., Yamashev V.M. *Istoriya razvitiya sistemi obrazovaniya Povolzhya* [The history of development of the Volga region educational system]. Samara, Samarsky gos. ped. universitet publ., 1997, 168 p.
- Komzin I.V. *Eto i est' schastye* [This is happiness]. Molodaya gvardiya publ., 1959, 288 p.
- USSR. Ministry of Higher Education. Order no. 169 of January 29, 1951. *Archives of Togliatti State University*.
- Kuibyshevskiy industrialniy institut. Order no. 181 of August 26, 1952. *Archives of Togliatti State University*. Series 1. Item 1. P. 19.
- Adaevskaya T.I. Demographic phenomenon of Togliatti in the second half of the 20th century. *ELPIT-2013. PROCEEDINGS*. Tolyatti, TGU publ., 2013, vol. 3, pp. 3–8.
- Adaevskaya T.I., Tsetkova I.V. Peculiarities of formation of Togliatti population. *Innovatsii kak faktor razvitiya promishlennogo goroda*. Tolyatti, Volzhskiy universitet im. V.N. Tatishcheva, 2013, pp. 126–128.
- The story of Ivanova Mariya. *Archives of Togliatti State University*. Series 1. File 1. 3 p.
- Statement of the evening faculty of the Kuibyshev Industrial Institute at Kuibyshevhydrostroy on the 1st of February 1959. *Archives of Togliatti State University*. Series 1. File 44. 8 p.
- Appendix to the Order for KII named after V.V. Kuibyshev no. 21 of February 8, 1951. *Archives of Togliatti State University*.
- Order of the head of construction of the Kuibyshev hydroelectric station of the Ministry of Internal Affairs of the USSR no. 525 of August 4, 1952. *Archives of Togliatti State University*.
- Istoricheskie khroniki Stavropolya-Togliatti* [Historical records of Stavropol-upon-Volga – Togliatti]. Samara, Agni publ., 2007, 296 p.
- V.N. Zubkov Autobiography. *Archives of Togliatti State University*. Series 1. File 1. Item 80.
- Historical note. *Archives of Togliatti State University*. Series 1. File 39. Item 10. 150 p.
- Director's order of KII no. 275 of May 21, 1957. *Archives of Togliatti State University*.
- Statement of Stavropolski city committee of the Communist party of the USSR. *Archives of Togliatti State University*.
- Yamashev V.M. *Otraslevoe razvitie goroda Togliatti vo vtoroy polovine XX veka* [Industrial development of

- the city of Togliatti in the second half of the 20th century]. Samara, Samarskiy nauchniy tsentr RAN publ., 2014, 1943 p.
17. Vavilina O.A. *Perviy rektor* [The first rector]. Tolyatti, Atrium publ., 2005, 242 p.
18. *Archives of Togliatti State University*.
19. Malyshev V.I. In science, he followed the footsteps of his father. *Alma mater*, 1999, no. 7, p. 80.
20. Reznikov A.N. *Eskizi proshlogo v proektsii na nastoyashchee* [Sketches of the past in projections on the present]. Samara, Federov publ., 1998, 440 p.
21. *Professora Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Professors of Togliatti State University]. Tolyatti, TGU publ., 2003, 191 p.

COOPERATION BETWEEN THE LEADERS OF THE FIRST TOGLIATTI HIGHER SCHOOL, SELF-GOVERNMENT INSTITUTIONS AND HEADS OF CONSTRUCTION SITES OF THE CITY (IN 1951-1971)

© 2015

T.I. Adaevskaya, candidate of historical sciences, Associate Professor
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: the first higher school of Togliatti; director of the Stavropolsky branch of the Kuibyshev Industrial Institute; the first rector of Togliatti Polytechnic Institute; educational network of Togliatti.

Abstract: The article presents a wide range of previously unknown pages of the history of Togliatti State University (TSU) related to the activities of the university leaders in the first two decades of the high school activity. The paper covers the period from its founding in 1951 as a branch of the evening school of the Kuibyshev Industrial Institute of Kuibyshevhydrostroy in Stavropol-on-Volga till 1971, when Togliatti Polytechnic Institute (TPI) had got material and technical resources, scientific and pedagogical staff, and foundations for the development of scientific schools.

For the first time, the article presents in its scientific consideration the relevant biographical information – in its chronological sequence – about all six leaders of the higher school: the heads of the evening department of the Stavropolsky branch of Kuibyshev Industrial Institute of Kuibyshevhydrostroy D.E. Churkin and V.N. Nikolayev, the directors of the Stavropolsky branch of Kuibyshev Industrial Institute V.N. Zubkov, V.L. Bondarev and E.F. Vinokurov, the rector of Togliatti Polytechnic Institute A.N. Reznikov. The author reveals the peculiarities of the interaction of the university leaders, the city administration and construction projects aimed at expanding the scientific, educational and pedagogical tasks and creating a common educational network of the city. Two phases of development of the university are considered in details: first, the initial period of establishment of the evening school of KII of KHS before the city of Stavropol-on-Volga had been transferred, and the early years of the new city under construction. The research reports the effective support provided to the branch by the head of "Kuibyshevhydrostroy" I.V. Komzin, and his teaching activity as a professor.

The second period is when an independent higher school was created in Togliatti – Togliatti Polytechnic Institute (TPI). The creation of the first independent university in Togliatti is connected with the name of Professor A.N. Reznikov, an honorary citizen of the city of Togliatti. The article considers its effective cooperation with the Volga automobile factory and other factories of the country; studies the basic activities of 12-year history of TPI when the higher school was not only expanding, but also became a scientific and educational center of the Volga region.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ГЕОМЕТРО-ГРАФИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ И КОМПЕТЕНТНОСТИ БУДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

© 2015

И.Ю. Амирджанова, ассистент кафедры «Дизайн и инженерная графика»
В.Г. Виткалов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Дизайн и инженерная графика»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: графическая культура и компетентность; визуально-образный графический язык; 3D-моделирование.

Аннотация: Рассматривается современное состояние развития геометро-графической культуры и компетентности будущих специалистов, учитывая быстрое развитие информационных технологий, которое привело к трансформации содержания инженерного труда и вызвало изменение требований к подготовке будущих инженеров и оценке их профессиональных качеств, то есть изменение компетентности будущих специалистов. Определяется интегрирующее понятие «графическая культура», включающее современные знания и умения в области инженерной и компьютерной графики и способность к творческой деятельности, а реализация принципа графической культуры невозможна без знания визуально-образного графического языка профессионального общения, который является международным языком профессионального технического общения инженеров, понятным без вербального сопровождения. Анализируется традиционная геометро-графическая подготовка в технических вузах, которую обеспечивают две дисциплины – начертательная геометрия и инженерная графика и современная графическая подготовка, включающая 3D-моделирование, которое, в свою очередь, повышает производительность и качество моделирования, его вариативность и наглядность. Делается вывод о том, что графическое образование является необходимой составляющей содержания общего высшего образования и только в следующей совокупности: научная дисциплина – начертательная геометрия с ее модельной идеологией и практическая дисциплина – инженерная графика как графическое документирование, поддержанные компьютерными технологиями, обеспечат получение студентами компетенций не только в предметной области инженерной графики, но и по общеинженерным и специальным дисциплинам, вплоть до практического использования на производстве, а следовательно, повысят их графическую культуру, которая обуславливается высокой степенью развития личности.

Инженерное образование в России является ключевым фактором социально-экономического развития государства. Современные требования к выпускникам вуза предполагают у них наличие инициативности, способности принимать самостоятельные решения, творческой, профессиональной, в том числе графической, грамотности, умения видеть перспективы развития производства и генерировать идеи, находить пути их реализации и планировать собственную деятельность [1].

Использование новых технологий позволит ускорить обучение студентов и облегчить труд инженеров, но для использования компьютерных технологий необходимо не только знать компьютер и его возможности, но также иметь высокий уровень знаний непосредственно по изучаемым предметам, в число которых входят геометро-графические дисциплины [2].

Инженерное образование предусматривает серьезную графическую подготовку будущих специалистов, качество которой призваны обеспечить общепрофессиональные дисциплины начертательная геометрия, инженерная и компьютерная графика, которые способствуют развитию пространственного воображения, творческого и конструктивного мышления специалиста, а также воспитанию профессиональной и графической культуры обучающихся [3].

Для многих людей понятие «образованность» утратило свой первоначальный смысл становления личности, превратилось в «информированность». Хорошие графические навыки не существуют без знаний и гармонии в мыслях, общей образованности, начитанности и логики. Под графической образованностью следует понимать наличие широкого кругозора графических

знаний, умений и навыков. Оценивать качество образования следует по уровню полученных знаний и сформированных личных качеств молодого специалиста, по его графической культуре.

Графическая культура – это совокупность достижений человечества в области разработки и освоения графических способов передачи информации. Если рассматривать ее как элемент общей культуры инженера, графическая культура характеризуется высоким уровнем знаний, умений и навыков в области визуализации, пониманием механизмов эффективного использования графических отображений для решения профессиональных задач, умением интерпретировать и оперативно отображать результаты на приемлемом эстетическом уровне [4].

Формирование графической культуры будущих инженеров неотделимо от развития их пространственного мышления. Это единый процесс становления образного, логического, абстрактного и творческого мышления вспомогательными средствами учебных дисциплин и путем решения разноплановых задач.

Профессиональная графическая компетентность инженера предполагает уровень осознанного применения графических знаний, умений и навыков, опирающийся на знания функциональных и конструктивных особенностей технических объектов, опыт графической профессионально ориентированной деятельности, свободную ориентацию в среде графических информационных технологий, отношение к профессиональной деятельности и определенным инженерным задачам [5].

В последнее время заметно расширяются задачи, решаемые методами начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графики, а следовательно,

возросла значимость графических дисциплин в инженерном образовании. Графические изображения являются одним из главных средств познания окружающего мира, инструментом творческого и пространственного мышления личности. Поэтому методика преподавания этих дисциплин стала предметом особого внимания на семинарах и конференциях, посвященных проблемам высшего профессионального образования [6].

В условиях массовых коммуникаций, необходимости уплотнения громадного объема информации и возможностей, предоставляемых современными информационными технологиями, для инженера графическая культура становится необходимой составляющей высшего образования. Знание инженерной и компьютерной графики становится определяющим при подборе специалиста для работы, а также для продолжения образования.

Реализация принципа графической культуры инженера невозможна без знания визуально-образного геометрического языка. За многовековую историю был выработан графический язык делового общения, изучение которого как синтетического, имеющего собственную основу, важно, так как он является общепризнанным международным языком профессионального технического общения, понятным без вербального сопровождения. Язык графики является уникальным в коммуникативном процессе, разрешая без помощи слов проблему понимания. С его помощью часто осуществляется отображение информации в различных областях современного знания, он точен, нагляден и лаконичен. Визуальная образованность позволяет наглядно отображать любые объекты и процессы.

Из всего многообразия знаковых систем и языков, созданных мировой культурой, графический язык является уникальным в представлении научно-технической информации, что позволило ему стать профессионально ориентированным языком в инжиниринге [7].

Этот язык – древнейший из языков мира. Он универсален: любая визуализация информации об объектах, процессах и явлениях в любой области человеческих знаний осуществляется средствами графического языка, алфавитом которого является визуальный ряд графических фигур – точек, отрезков прямых и дуг плоских кривых линий. Это международный язык общения, точный, наглядный и лаконичный.

В профессиональном плане язык графики необходим инженерам как международный язык профессионального технического общения, понятный без вербального сопровождения. В социальном плане владение графическим языком играет коммуникативную роль, разрешая без помощи слов проблему понимания. Визуальная образованность позволяет наглядно отображать любые объекты и процессы. В личностном плане геометро-графическая грамотность способствует развитию творческого мышления, что дает дополнительный шанс к достижению успеха в мире конкуренции [8].

Базовая геометро-графическая подготовка должна осуществляться в рамках единого целостного фундаментального курса, состоящего из нескольких разделов, плавно переходящих один в другой в соответствии с логикой развития визуально-образного графического языка и имеющих единую цель, предмет и методологию изучения на протяжении всего периода обучения [9].

Традиционно геометро-графическую подготовку в технических институтах обеспечивают две дисциплины: начертательная геометрия и инженерная графика.

Начертательная геометрия развивает пространственное представление и воображение, конструктивно-геометрическое мышление, способности к анализу, синтезу и преобразованию пространственных форм на основе графических моделей пространства, реализуемых в виде чертежей. Инженерная графика дает навыки чтения и выполнения эскизов и чертежей деталей, составления и чтения конструкторской документации.

Непременным требованием инженерного образования является умение будущего специалиста представить свою идею в виде чертежа, но чертеж – это последняя стадия конструкторской работы, а рождающаяся в сознании человека новая идея, возникшая неожиданно, требует немедленного графического закрепления. В этом случае наиболее простой, удобной и быстрой фиксацией творческой мысли оказывается рисунок, являющийся не только быстрым и информативным способом графического изображения, но и мощным способом становления образного мышления и своеобразным способом познания действительности.

С развитием вычислительной техники в инженерную графику стали включать практические занятия по компьютерной графике, которые проводились в специализированных классах на компьютерах с предустановленным программным обеспечением.

Геометро-графические дисциплины являлись частью общепрофессиональных дисциплин и обеспечивали начальную профессиональную подготовку студентов.

Профессиональная подготовка студентов в техническом университете ставит перед геометро-графическим образованием такие основные цели: интеллектуально развивать студентов, формируя качества мышления, которые характерны для геометро-графической деятельности в выбранной специальности и необходимы человеку для полноценной жизни в обществе; передавать конкретные геометро-графические знания, умения и навыки, которые необходимы для изучения смежных дисциплин, для применения в профессиональной деятельности, для продолжения непрерывного образования; формировать представления об идеях и методах геометро-графического моделирования как форме описания и познания действительности; воспитывать личность в процессе освоения дисциплин геометро-графического цикла [10].

В настоящее время в высшем техническом профессиональном образовании успешно развивается инновационная стратегия комплексной информатизации геометрической и графической подготовки, разработанная Научно-методическим советом по начертательной геометрии, инженерной и компьютерной графике Министерства образования и науки Российской Федерации [11].

Главной чертой современной графической подготовки является 3D-моделирование. Оно значительно повышает производительность и качество моделирования, его вариативность и наглядность. На всех стадиях жизненного цикла изделий присутствуют информационные модели, в число которых входят 3D геометрические модели. Современное производство предполагает, что над созданием нового изделия могут одновременно работать дизайнеры, инженеры, экономисты и т. д.

В этой связи основополагающей является трехмерная геометрическая модель – математическое описание структуры изделия и геометрических характеристик его элементов. Электронным воплощением геометрической модели становится электронная модель. По существу, электронная модель представляет набор данных, однозначно определяющих форму, структуру и размеры изделия. При необходимости 3D-модель преобразовывается в 2D-модель, то есть чертеж изделия. Именно электронная модель играет роль первоисточника для всех этапов жизненного цикла изделия, хранится в базе данных проекта и обеспечивает решение инженерных задач при проектировании, производстве, эксплуатации и утилизации.

Таким образом, в курс геометро-графических дисциплин технического университета входят следующие дисциплины: фундаментальная – начертательная геометрия (теория геометрического моделирования); прикладная – инженерная графика; технологическая – компьютерная графика.

Начертательная геометрия является наукой о построении конструктивных моделей пространств, то есть таких моделей, в которых, в отличие от аналитических моделей, элементы пространства отображаются графическими образами [12]. Основная задача начертательной геометрии – разработка теории, методики, алгоритмов построения геометрических моделей объектов, явлений, технологических процессов, то есть создание теории геометрического моделирования. В начертательной геометрии моделирование объекта решается прямой задачей: по данному объекту и аппарату проецирования получить модель. Конструирование объекта решается обратной задачей: по данной модели и аппарату проецирования сконструировать объект. Наличие конструктивной взаимосвязи объектов и моделей позволяет изучать свойства оригиналов по их моделям. Современная начертательная геометрия с ядром – теорией геометрического моделирования – позволяет упорядочить имеющиеся методы изображений и осуществлять направленный поиск моделей с наперед заданными свойствами для тех или иных областей приложений.

Студенты первого курса не готовы сразу приступить к изучению компьютерной графики, поскольку еще не имеют достаточных знаний по формообразованию, оформлению изображений. Основная задача учебной дисциплины «Инженерная графика» – построение и оформление изображений в соответствии с ГОСТами, а также создание технической документации.

Инженерная графика – одна из немногих учебных дисциплин, которая идеально интегрируется в компьютерные технологии и предполагает возможность широкого использования интерактивных дидактических средств, автоматизированных обучающих систем, мультимедийных средств представления информации, тестового контроля.

Учебная дисциплина «Компьютерная графика» включает в себя стандарты по созданию электронных конструкторских и технологических документов, терминологию, классификацию и структуру модели. Основная задача дисциплины – построение 3D геометрических моделей и оформление технической документации в системах автоматизированного проектирования (САПР). Анализ способов создания твердотельных мо-

делей в современных САПР, таких как КОМПАС, AutoCAD, Inventor, Solid Works, T-FLEX, Pro/Engineer, CATIA и т. д., позволяет говорить о возможности создания единого алгоритма твердотельного моделирования в зависимости от геометрии детали. С этим алгоритмом необходимо ознакомить студентов уже на младших курсах. Обучение инструментальной среде организовано в виде аудиторных занятий в компьютерных классах. Каждый студент обеспечен учебным пособием и комплектом аудиторных и домашних заданий. Это позволяет студентам прорабатывать самостоятельно материал, полученный на занятиях, а на последующих занятиях разбирать возникшие вопросы.

Тенденции развития геометро-графической подготовки в соответствии с ФГОС ВПО: геометро-графическая подготовка входит в профессиональный цикл основной образовательной программы бакалавриата и специалитета.

Главная цель модернизации графической подготовки – существенный рост качества обучения без увеличения количества учебных часов, а стратегически новым подходом к информатизации геометро-графической подготовки становится обеспечение требований информационной поддержки PLM-технологий – управления жизненного цикла изделий. Поскольку геометро-графическая подготовка является начальной и базовой в системе высшего профессионального образования, ее основная задача – создание информационно-графической основы для внедрения методов Product Lifecycle Management (PLM) в общеинженерные и специальные дисциплины на всех этапах обучения, включая курсовое и дипломное проектирование. Важность этого направления подтверждается разработкой и принятием новых стандартов ЕСКД [13]: ГОСТ 2.051 «Электронные документы. Общие положения»; ГОСТ 2.052 «Электронная модель изделия. Общие положения»; ГОСТ 2.053 «Электронная структура изделия. Общие положения»; ГОСТ 2.511 «Правила передачи электронных конструкторских документов. Общие положения»; ГОСТ 2.512 «Правила выполнения пакета данных для передачи электронных документов. Общие положения»; ГОСТ 2.611 «Электронный каталог изделий. Общие положения»; ГОСТ 2.612 «Электронный формуляр. Общие положения».

Современный уровень развития трехмерной параметрической компьютерной графики, используемой в системах автоматизированного проектирования, принципиально изменил сферу проектно-конструкторской деятельности и ее проявление в графическом документировании [14]. Параметрическая база данных, представленных в форме трехмерных моделей, становится источником готовых моделей типовых конструкций деталей и узлов. Гибкость и простота изменения геометрических параметров облегчают моделирование в системах автоматизированного проектирования, а возможность выполнения сборки и разборки соединений исключает случайные ошибки. Принципиально изменяется процесс разработки чертежей по трехмерным моделям деталей и моделям сборочных единиц. Таким образом, преподавание геометро-графических дисциплин должно сосредоточиться, главным образом, на геометрическом моделировании и графическом документировании.

Область геометрического моделирования обеспечивается начертательной геометрией с ее модельной идеологией. Под моделью понимается материальный или идеальный объект, который рассматривается для изучения исходного объекта (оригинала) и отражает наиболее важные свойства, качества или параметры оригинала [15].

Моделирование – это построение моделей объектов (предметов, явлений, процессов), существующих в действительности, то есть замена реального объекта его подходящей копией для исследования этих объектов познания.

Геометрическая модель – приближенное представление какого-либо множества объектов, явлений внешнего мира в виде совокупности геометрических многообразий и отношений между ними для получения новых знаний об оригинале. В геометрической модели могут отображаться элементы разной размерности (в каких-либо сочетаниях и отношениях между собой), имеющие свою внутреннюю структуру. Геометрические модели включают и количественные отношения элементов модели. Это количественные характеристики геометрических фигур, полученные в результате измерений. Это функциональные зависимости между параметрами модели и их аналитические обобщения, связанные с производными, интегралами и т. д. Это алгебраические выражения, направленные на численную реализацию количественных и качественных закономерностей свойств модели, а следовательно, и реально моделируемого объекта [16].

Для визуализации геометрических моделей используются идеализированные геометрические объекты (точка, линия, плоскость и т. д.), которые, в отличие от реальных объектов, обладают набором только наиболее существенных свойств (геометрическая точка имеет только координаты, но не имеет размеров, геометрическая линия не имеет ширины, геометрическая плоскость – толщины и т. п.). Графическая визуализация геометрических моделей представляет собой визуально воспринимаемый образ идеализированных геометрических объектов, составляющих геометрическую модель.

Геометрическая модель – это идеальная форма существования реального объекта, то есть, прежде чем конструировать какое-либо изображение, необходимо вначале заменить объект реального пространства на геометрический объект, называемый оригиналом, поскольку в реальном мире мы не всегда оперируем точками, плоскостями и т. п. Другими словами, сначала нужно сконструировать модель реального пространства, а затем построить его изображение – геометрическую модель. Таким образом, геометрическая модель является общим случаем моделей реальных объектов [17], поскольку позволяет получать различные модели, выходящие за рамки реальных объектов. Такие модели находят применение для отображения процессов и явлений в различных сферах нашей действительности.

Область графического документирования обеспечивается учебной дисциплиной «Инженерная графика», которая должна включать в себя освоение инженерных языков графического представления информации, прежде всего о геометрических свойствах изделий, обеспечивающих организацию и управление разработкой и эксплуатацией технических систем.

Основная цель дисциплины – развитие системного мышления, подготовка к решению прикладных задач геометрического моделирования средствами традиционной и компьютерной технологий, а также обучение основам графического документирования при решении задач разработки конструкторской документации [18].

Выпускник технического университета должен быть всесторонне графически грамотным. Одним из средств, повышающих графическую культуру, является рисунок. Именно технический рисунок предоставляет студентам знания, приемы и правила для выполнения объемных изображений с натуры и по ортогональному чертежу. Выполнение эскизов как реализация графической мысли тоже остается за традиционными средствами инженерной графики [19].

Именно в таком представлении: научная дисциплина – начертательная геометрия с ее модельной идеологией и практическая дисциплина – инженерная графика как графическое документирование, геометро-графические дисциплины, поддержанные компьютерными технологиями, обеспечат получение студентами компетенций не только в предметной области инженерной графики, но и по общеинженерным и специальным дисциплинам, вплоть до практического использования на производстве, и повысят их графическую культуру [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кустов Ю.А., Лившиц Ю.А., Стацук С.В. Формирование социально-культурной компетентности будущих специалистов как педагогическая проблема // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2013. Т. 2. № 4. С. 118–124.
2. Писканова Е.А., Петрова В.В. Совершенствование геометро-графической подготовки как основа формирования проектного мышления студентов-дизайнеров // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 11-4. С. 37–38.
3. Амирджанова И.Ю., Трёхсвоякова Э.Б. Подготовка будущих специалистов на основе сквозного общеинженерного курса // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 7-4. С. 68–69.
4. Рукавишников В.А. Геометро-графическая подготовка инженера: роль и место в системе образования // Образование и наука. 2009. № 5. С. 32–37.
5. Грачева С.В., Живоглядова И.А., Варенцова Т.А. Некоторые составляющие учебной оснастки для качественного обучения графическим дисциплинам // Актуальные проблемы современной геометро-графической подготовки. Пенза, 2014. С. 31–34.
6. Грачёва С.В., Живоглядова И.А. Формирование конструкторских качеств в процессе изучения графических дисциплин // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 5-6. С. 64–66.
7. Гузненков В.Н. Применение информационных технологий в графических дисциплинах технического университета // Интеграция образования. 2013. № 1. С. 86–89.
8. Шангина Е.И. Геометро-графическая подготовка студентов в техническом университете // Информатика и образование. 2010. № 4. С. 122–124.
9. Амирджанова И.Ю. Высшее образование как источник раскрытия внутренних потенциалов человека //

- Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 5-6. С. 20–22.
10. Амирджанова И.Ю. Начертательная геометрия как наука геометрического моделирования // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении. Краматорск, 2014. С. 241–251.
 11. Петрова В.В., Варенцова Т.А. Роль графического образования в творческом развитии студента и инженера // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 5-6. С. 62–64.
 12. Гузненков В.Н., Якунин В.И. Геометро-графическая подготовка как интегрирующий фактор образовательного процесса // Образование и общество. 2014. № 2. С. 26–28.
 13. Якунин В.И., Сидорук Р.М., Райкин Л.И., Соснина О.А. Инновационная стратегия комплексной информатизации геометрической и графической подготовки в высшем техническом профессиональном образовании на современном этапе // Научно-методические проблемы графической подготовки в техническом вузе на современном этапе. Астрахань, 2010. С. 228–235.
 14. Грачева С.В. Совершенствование процесса обучения начертательной геометрии с использованием учебного пособия развивающего типа : дис. ... канд. пед. наук. Тольятти, 2006. 234 с.
 15. Кустов Ю.А., Стацук С.В. Профессиональная социализация молодежи как педагогическая проблема // Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева. 2013. № 1. С. 97–101.
 16. Якунин В.И., Гузненков В.Н. Геометрическое моделирование как обобщение методов прикладной геометрии и ее разделов // Интеграл. 2012. № 5. С. 120–121.
 17. Гузненков В.Н. Геометро-графическая подготовка в техническом университете // Российский научный журнал. 2013. № 6. С. 159–166.
 18. Иванов Г.С. Перспективы начертательной геометрии как учебной дисциплины // Геометрия и графика. 2013. Т. 1. № 1. С. 26–27.
 19. Шангина Е.И., Шангин Г.А., Якунин В.И. Формирование содержания геометро-графического образования в аспекте информационно-когнитивного подхода // Информатика и образование. 2011. № 11. С. 74–77.
 20. Амирджанова И.Ю. Подготовка специалистов, владеющих визуально-образным графическим языком и современными технологиями геометрического моделирования, как педагогическая проблема // Актуальные проблемы современной геометро-графической подготовки. Пенза, 2014. С. 3–6.
- REFERENCES**
1. Kustov Yu.A., Lifshits Y.A., Statsuk S.V. Formation of social and cultural competence of future specialists as pedagogical problem. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva*, 2013, vol. 2, no. 4, pp. 118–124.
 2. Piskanova E.A., Petrova V.V. Improving geometric-graphic training as the basis of design thinking students-designers. *Mezhdunarodniy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2014, no. 11-4, pp. 37–38.
 3. Amirdzhanova I.Yu., Trekhsvoyakova E.B. Training of future specialists on the basis of general-engineering comprehensive course. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologiy*, 2015, no. 7-4, pp. 68–69.
 4. Rukavishnikov V.A. Geometry and graphical engineer training: part and place in educational system. *Obrazovanie i nauka*, 2009, no. 5, pp. 32–37.
 5. Gracheva S.V., Zhivoglyadova I.A., Varentsova T.A. Some components of training tools for quality graphic disciplines teaching. *Aktualnie problemi sovremennoy geometro-graficheskoy podgotovki*. Penza, 2014, pp. 31–34.
 6. Gracheva S.V., Zhivoglyadova I.A. Development of engineering qualities in the process of learning graphic disciplines. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki*, 2014, no. 5-6, pp. 64–66.
 7. Guznenkov V.N. Application of Information Technologies in Graphical Disciplines of Technical University. *Integratsiya obrazovaniya*, 2013, no. 1, pp. 86–89.
 8. Shangina E.I. Geometry-graphics training of students in technical college. *Informatika i obrazovanie*, 2010, no. 4, pp. 122–124.
 9. Amirdzhanova I.Yu. Higher education as the resource for discovery of individual inner potentials. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki*, 2014, no. 5-6, pp. 20–22.
 10. Amirdzhanova I.Yu. Perspective geometry as the science of geometrical simulation. *Problemi proektirovaniya i avtomatizatsii v mashinostroyeni*. Kramatorsk, 2014, pp. 241–251.
 11. Petrova V.V., Varentsova T.A. Role of graphic education in the creative development of a student and an engineer. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki*, 2014, no. 5-6, pp. 62–64.
 12. Guznenkov V.N., Yakunin V.I. Geometry-graphics training as the integrating factor of educational process. *Obrazovanie i obshchestvo*, 2014, no. 2, pp. 26–28.
 13. Yakunin V.I., Sidoruk R.M., Raykin L.I., Sosnina O.A. Innovative strategy of complex computerization of geometric and graphical training in high technical professional education at the present stage. *Nauchno-metodicheskie problemi graficheskoy podgotovki v tekhnicheskoye vuz na sovremennom etape*. Astrakhan, 2010, pp. 228–235.
 14. Gracheva S.V. *Sovershenstvovanie protsessa obucheniya nachertatelnoy geometrii s ispolzovaniem uchebnogo posobiya razvivayushchego tipa*. Diss. kand. ped. nauk [Improvement of the process of perspective geometry teaching using the educational aids of developmental type]. Tolyatti, 2006, 234 p.
 15. Kustov Yu.A., Statsuk S.V. Professional socialization of young people as a pedagogical problem. *Vestnik Volzhskogo universiteta im. V.N. Tatishcheva*, 2013, no. 1, pp. 97–101.
 16. Yakunin V.I., Guznenkov V.N. Geometrical simulation as the generalization of methods of applied geometry and its branches. *Integral*, 2012, no. 5, pp. 120–121.
 17. Guznenkov V.N. Geometric-Graphic Preparation of the Technical University. *Rossiyskiy nauchniy zhurnal*, 2013, no. 6, pp. 159–166.
 18. Ivanov G.S. Descriptive geometry prospects as educational subject. *Geometriya i grafika*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 26–27.
 19. Shangina E.I., Shanguin G.A., Yakunin V.I. Forming content of geometry-graphic education in aspect of infor-

- mation-cognitive approach. *Informatika i obrazovanie*, 2011, no. 11, pp. 74–77.
20. Amirdzhanova I.Yu. Training of specialists mastering visual graphic language and modern technologies of geomet-

rical simulation as a pedagogical problem. *Aktualnie problemi sovremennoy geometro-graficheskoy podgotovki*. Penza, 2014, pp. 3–6.

CURRENT STATE OF DEVELOPMENT OF GEOMETRY-GRAPHICS CULTURE AND COMPETENCE OF FUTURE PROFESSIONALS

© 2015

I.Yu. Amirdzhanova, assistant of the Department «Design and Engineering Graphics»

V.G. Vitkalov, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Design and Engineering Graphics»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: graphics culture and competence; visual graphical language; 3D modeling.

Abstract: The article considers the current state of development of geometry-graphics culture and competence of future professionals taking into account the rapid development of information technologies which led to the transformation of content of engineering effort and the change of requirement for the future engineers training and assessment of their professional qualities, i.e. change of the competence of future professionals. The authors define the integral notion “graphics culture” which includes modern knowledge and skills in the field of engineering and computer graphics and the ability for creative activity as the implementation of graphics culture principle is impossible without knowing of visual graphical language of professional communication which is the international language of professional technical communication of engineers, understandable without verbal support. The authors analyze the classical geometry-graphics training in technical colleges which are supported by two disciplines – perspective geometry and engineering graphics and modern graphics training including 3D modeling which improves the performance and quality of modeling, its variability and visualization. The article includes the conclusion that the graphics education is the necessary component of content of general higher education and only being represented in the following conjunction: scientific discipline – perspective geometry and its modeling ideology and practical discipline – engineering graphics as graphical documenting supported by computer technologies, can provide the students for acquiring of competences not only in the sphere of engineering graphics but also in general-engineering and special disciplines up to the practical use at the production site, and, consequently, will improve their graphics culture which is determined by the high degree of personal development.

РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЯ

© 2015

Н.М. Бобровский, доктор технических наук,
профессор кафедры «Оборудование и технология машиностроительного производства»
П.А. Мельников, кандидат технических наук, директор института Химии и инженерной экологии
И.Н. Бобровский, кандидат технических наук,
начальник лаборатории НИЧ НИЛ-7 «Автомобильные технологии»
О.О. Левицких, ведущий экономист лаборатории НИЛ-7
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: поверхностно-пластическое деформирование; выглаживание; безсожевая обработка; СОТС; автокомпонент.

Аннотация: Рассмотрен зарубежный и отечественный опыт разработки технологий сухой обработки. Приведены результаты внедрения технологий сухой обработки (резание, точение, фрезерование, сверление) на промышленные фирмы Германии. Проведен анализ потребления СОТС в ОАО «АВТОВАЗ», описано негативное влияние СОТС на организм человека, а также окружающую среду. Приведены возможные пути попадания компонентов СОТС в атмосферу и почву. СОТС в большинстве случаев проектирования технологических процессов рассматривается как обязательный постоянный компонент. Описаны три основные задачи СОТС – охлаждение, смазка, удаление стружки, неотъемлемые для стабильного протекания процесса.

Описано влияние исключения СОТС из процесса обработки. Выполнено сравнение микрорельефа с базовой и предлагаемой технологиями обработки. Разработана феноменологическая модель изнашивания инструмента из поликристаллического материала с гомогенной структурой при поверхностном пластическом деформировании. Для реализации стохастического характера воздействия шероховатости инструмента на процесс изнашивания был разработан алгоритм формирования микрогеометрии поверхности инструмента. При решении задачи автоматизации определения площади износа рабочей поверхности инструмента были разработаны алгоритмы расчета и программа IZNOSOMER. Система имеет развитые возможности по созданию пользовательского интерфейса, широкий набор функций, методов и свойств, необходимых при решении прикладных расчетно-вычислительных и инженерных задач. Полученные технические решения основаны исключительно на использовании отечественной технологии и инструмента и позволяют отказаться от закупок импортного оборудования стоимостью до 1 миллиона евро за единицу, увеличив загрузку машиностроительных предприятий Российской Федерации. Безсожевая технология исключает источник пожарной опасности от масляных СОТС, загрязнение окружающей среды и нанесение вреда здоровью человека.

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроительное производство ежегодно потребляет десятки тысяч тонн смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), необходимых для процессов механической обработки деталей машин.

В целях экологической безопасности производства и ожидаемого экономического эффекта начиная с 90-х годов прошлого века многие фирмы Европы совместно с институтами активно занимаются разработкой теоретических основ и практических способов механической обработки без применения СОТС. В Германии с весны 1994 г. по 2002 г. осуществлялся крупный проект «Сухая обработка», охватывающий фундаментальные научные разработки, разработку и оптимизацию технологий в отношении инструмента, оборудования и процесса для обработки различных материалов. Проект реализовывался под эгидой Федерального Министерства по обучению, науке, научным исследованиям и технологии. В проекте участвовали 24 фирмы (Даймлер Крайслер, Гюринг, Хюллер Хиль, Мапал и т. д.), институты и инновационно-технологические центры, распределенные по пяти группам, каждой из которых руководил представитель промышленной фирмы. Исследовались такие направления, как сухое резание, точение, фрезерование, сверление, технологии сухой обработки в целом – поверхностно-пластическое деформирование не исследовалось.

Две проектные группы внедрили разработки в серийное производство уже в декабре 1996 г. Это фрезерование алюминия на фирме «ДАСА» в г. Аугебурге и сухое сверление на фирме «ХДМ», фирма «Хюллер-Хилле» разработала обрабатывающий центр для сухой обработки моторных деталей (головка блока).

На заводе фирмы «БМВ» в г. Штеере на новой автоматической линии в условиях сухой обработки проводилось растачивание отверстий 6-цилиндрового алюминиевого блока. Анализ затрат показал экономию затрат в размере 17 %, возникшую в первую очередь за счет снижения капиталовложений и эксплуатационных расходов. Глубокое сверление внедрено на фирме «Даймлер-Бенц». На заводах фирмы «БОШ» в 1999–2000 гг. планировалось внедрение сухой обработки. В г. Нюнберге – изготовление корпуса дроссельного механизма систем впрыска (1100 дет./день). В г. Хомбурге – расточка и фрезеровка корпуса гидравлических клапанов из литья (28000 шт./год). В г. Фойербаче – процесс глубокого сверления по стали (4000 дет./сутки), то же на фирме «Мерседес-Бенц».

Фирмами «БМВ», «Даймлер-Бенц» и институтом ISF университета г. Дортмунда был разработан перечень требований к станку, работающему по технологии сухой обработки, для крупносерийного производства. Эти требования реализованы в фрезервальном станке «Шпехт 500-т» фирмы «Хюллер-Хилле».

В механосборочном производстве ОАО «АВТОВАЗ» работает 356 единиц металлообрабатывающего оборудования, которое использует около 2 тысяч тонн пожароопасных масляных СОТС в год. Из них 60 % составляют безвозвратные потери. Эти жидкости имеют малую температуру вспышки, создают опасность возгорания, ухудшают условия труда, вызывают профессиональные заболевания; наносят вред окружающей среде.

Работы отечественных исследователей подтверждают тот факт, что аэрозоли нефтяных масел могут привести к поражению организма вплоть до липоидной пневмонии, пары углеводородов обладают наркотическим действием, триэтанолламин вызывает дерматиты, нитрид натрия способствует нарушению газового обмена в организме человека и поражению мышц сердца, хлорсодержащие присадки могут вызвать поражение печени и почек, трихлорэтан – источник выделения фосгена и т. д.

В результате использования смазочно-охлаждающих средств загрязнение атмосферы происходит не только в процессе эксплуатации, но и в результате испарения и сжигания отработавших смазочных масел. Однако главную опасность представляет их просачивание в грунт и попадание в грунтовые воды.

Несмотря на постоянное совершенствование технологии механической обработки, инструментов и оборудования, на сегодняшний день СОТС в большинстве случаев проектирования технологических процессов рассматривается как обязательный постоянный компонент. Три основные задачи СОТС – охлаждение, смазка, удаление стружки – кажутся неотъемлемыми для стабильного протекания процесса. Полный и широкий отказ от СОТС снял бы многие проблемы.

В глазах общественности и потребителя корпоративная политика современного промышленного предприятия не приемлема без ее усилий, направленных на сохранение экобиобаланса, а постоянное ужесточение требований законодательства к охране окружающей среды создает необходимость в поиске более экологически чистых процессов обработки в машиностроении.

В период с 2001 по 2012 годы сотрудниками Тольяттинского государственного университета были разработаны: научные основы технологии безсожевой обработки поверхностным пластическим деформированием поверхностей деталей машин; математические модели процесса; алгоритмы расчета режимов, подтвержденные свидетельствами о регистрации алгоритмов; технологические ограничения процесса; способы обработки; конструкции инструментов и устройств, реализованные в производстве, защищенные патентами. По результатам работы опубликовано более 100 статей, представлено 50 докладов на всероссийских и международных конференциях, получено 8 патентов на изобретение и 2 свидетельства о регистрации алгоритмов и программ, подготовлены к защите докторская и три кандидатские диссертации. Методы обработки поверхностно-пластическим деформированием (ППД) непрерывно развиваются [1–13], как и сопутствующие им технологии [14–17].

Разработана феноменологическая модель изнашивания инструмента из поликристаллического материала с гомогенной структурой при поверхностном пластическом деформировании. Для реализации стохастическо-

го характера воздействия шероховатости инструмента на процесс изнашивания был разработан алгоритм формирования микрогеометрии поверхности инструмента. При решении задачи автоматизации определения площади износа рабочей поверхности инструмента были разработаны алгоритмы расчета и программа IZNOSOMER. Система имеет развитые возможности по созданию пользовательского интерфейса, широкий набор функций, методов и свойств, необходимых при решении прикладных расчетно-вычислительных и инженерных задач.

При построении модели были разработаны и зарегистрированы алгоритмы: «Алгоритм моделирования поверхности с заданными параметрами шероховатости» № Госрегистрации 50200400310, № ОФАП 3344; «Алгоритм решения систем нелинейных уравнений численным методом» Отраслевая регистрация № Госрегистрации 50200200165, № ОФАП 1906 [18].

Получены зависимости для определения контактной температуры при обработке ППД без применения СОТС с учетом теплофизических характеристик материалов, скорости обработки, количества циклов нагружения, применяемой технологической схемы обработки [19].

Результаты теоретического исследования подтверждены результатами экспериментальных работ в лабораторных условиях и в условиях опытного производства. Качество поверхности деталей, обработанных без СОТС, оказалось не хуже, а зачастую лучше, чем после обработки по традиционной технологии [20].

Обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований позволило разработать и внедрить высокопроизводительный способ обработки поверхностным пластическим деформированием широким самоустанавливающимся инструментом без использования СОТС в массовое производство. При данном способе обработки очаг деформации в направлении, перпендикулярном перемещению инструмента, равен ширине обрабатываемой поверхности [21; 22].

К настоящему времени с использованием технологии безсожевой обработки выпущено более 15 миллионов деталей. Проводится работа по расширению номенклатуры деталей, обработанных по предложенной технологии.

Для реализации процесса обработки ППД без использования СОТС предложены и используются специальные конструкции инструмента с рабочей поверхностью из отечественных сверхтвердых материалов.

Представлен внешний вид станков для безсожевой обработки ППД (рис. 1, 2).

Использование разработанной технологии обработки сальниковых шеек деталей автомобиля также позволило снизить количество дефектов «течь сальника» в 3 раза в период гарантийной эксплуатации автомобиля. При полировании по традиционной технологии поверхность (рис. 3) только после длительной приработки приобретает рельеф, требуемый для работы в паре с манжетой, при поверхностном пластическом деформировании необходимый микрорельеф получается сразу после обработки (рис. 4).

Экономический эффект от внедрения технологии в производство можно оценить с помощью следующей структурной формулы:



Рис. 1. Внешний вид станка для обработки ППД без использования СОТС вала первичного коробки передач автомобиля LADA



Рис. 2. Внешний вид станка для высокопроизводительной обработки широким выглаживанием вала коленчатого двигателя автомобиля LADA

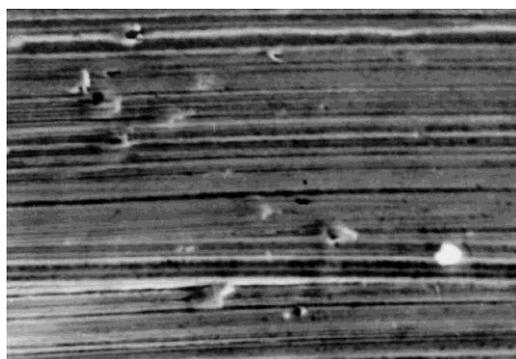


Рис. 3. Поверхность детали после полирования, обработана на станке фирмы «Нагель», Германия



Рис. 4. Поверхность, обработанная по технологии безсожевого поверхностного пластического деформирования

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{ИМП} + \mathcal{E}_{ПОЖ} + \mathcal{E}_{ЗДОР} + \mathcal{E}_{ЗАГР} + \mathcal{E}_{СОЖ},$$

где $\mathcal{E}_{ИМП}$ – экономический эффект от отказа закупки импортного оборудования; $\mathcal{E}_{ПОЖ}$ – экономический эффект от снижения пожароопасности; $\mathcal{E}_{ЗДОР}$ – экономический эффект от снижения затрат, связанных с реабилитацией рабочих, получивших профзаболевания вследствие контактирования с СОЖ в процессе трудовой деятельности; $\mathcal{E}_{ЗАГР}$ – экономический эффект от снижения затрат, связанных с устранением вредного воздействия СОЖ на экологию окружающей среды; $\mathcal{E}_{СОЖ}$ – экономический эффект от снижения затрат, связанных с закупкой, хранением и рекуперацией СОЖ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммарный экономический эффект от внедрения разработанной технологии в производство свыше 1,5 миллиарда рублей.

Инновационная технология безсожевого поверхностного пластического деформирования не имеет аналогов применения в массовом производстве в РФ и за рубежом. Это единственный процесс безсожевой обработки, использующий отечественный инструмент и технологию, внедренный в массовое производство в России.

Полученные технические решения основаны исключительно на использовании отечественной технологии и инструмента и позволяют отказаться от закупок импортного оборудования стоимостью до 1 миллиона евро за единицу, увеличив загрузку машиностроительных предприятий Российской Федерации. Безсожевая технология исключает источник пожароопасности от масляных СОТС, загрязнение окружающей среды и нанесение вреда здоровью человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
- Брондз Л.Д., Воронов В.Ф. Влияние поверхностного упрочнения на шероховатость высокопрочных сталей при повышенных температурах испытания // Поверхностный наклеп высокопрочных материалов. М.: ОНТИ-ВИАМ, 1971. С. 213–221.
- Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. М.: Машиностроение, 1985. 152 с.
- Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 299 с.
- Ардашинков Б.Н., Витенберг Ю.Р. Исследование влияния шероховатости и наклепа на износостойкость // Технологические методы повышения качества поверхности деталей машин. Л., 1978. С. 162–167.
- Баландин В.М., Гурьев А.В. Влияние поверхностного пластического деформирования на износостойкость нормализованной стали // Труды Волгоградского политехнического института. 1975. № 7. С. 9–17.
- Вейцман М.Г., Вайнштейн В.Г. Упрочнение титановых сплавов поверхностным пластическим деформированием // Вестник машиностроения. 1975. № 9. С. 73–75.
- Дубенко В.В. Обработка деталей алмазным выглаживанием // Машиностроитель. 1974. № 34. С. 36–37.
- Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
- Торбило В.М. Силовое выглаживание // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. Пермь, 1983. С. 57–60.
- Грановский Э.Г. Измерение износа алмазных выглаживателей // Известия вузов. 1968. № 11. С. 128–131.
- Малышев В.И., Селиванов А.С. Автоматизированная система управления процессом ультразвукового выглаживания на станке с ЧПУ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 1. С. 70–73.
- Малышев В.И., Селиванов А.С. Анализ развития пластической деформации в поверхностном слое при ультразвуковом алмазном выглаживании // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4-1. С. 233–236.
- Захаров О.В. Стабильность силового замыкания контакта при бесцентровом шлифовании на неподвижных опорах // СТИН. 2011. № 7. С. 8–10.
- Малышев В.И., Селиванов А.С. Анализ развития пластической деформации в поверхностном слое при ультразвуковом алмазном выглаживании // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4-1. С. 233–236.
- Малышев В.И., Селиванов А.С., Петрова А.С. Физические особенности пластической деформации поверхностного слоя при механической обработке в ультразвуковом поле // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: междунар. научно-практ. конф. Т. 7, вып. 3. Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. С. 36–43.
- Горшков Б.М., Ремнева О.Ю., Вылегжанин Д.В., Самохина Н.С. Опыт-экспериментальная установка для оценки эффективности повышения точности координатно-расточных станков // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2. С. 121–124.
- Бобровский Н.М. Разработка и освоение технологии выглаживания без применения смазочно-охлаждающих технических сред // Известия Самарского научного центра РАН. 2008. № S10. С. 236–242.
- Бобровский Н.М., Мельников П.А., Бобровский И.Н., Ежелев А.В., Лукьянов А.А. Исследование влияния режимов обработки на шероховатость поверхности закаленных валов в условиях массового производства // Современные проблемы науки и образования. 2011. № 5. С. 40.
- Бобровский Н.М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Тольятти: ТГУ, 2008. 170 с.
- Бобровский Н.М., Мельников П.А., Бобровский И.Н., Ежелев А.В., Лукьянов А.А. Технологическое обеспечение трибологических свойств сальниковых

шек деталей машин // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 340–343.

22. Официальный сайт малого инновационного предприятия “Техномаш+”. URL: tehnomasch.ru (дата обращения: 30.09.2013).

REFERENCES

1. Balter M.A. *Uprochnenie detaley mashin* [Strengthening of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978, 184 p.
2. Brondz L.D., Voronov V.F. Influence of surface strengthening on roughness of high-resistance steels under the elevated temperatures. *Poverkhnostniy naklep visokoprochnikh materialov*. Moscow, ONTI-VIAM publ., 1971, pp. 213–221.
3. Rykovsky B.P., Smirnov V.A., Shchetinin G.M. *Mestnoe uprochnenie detaley poverkhnostnim naklepom* [Local parts strengthening using the surface cold working]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 152 p.
4. Smelyansky V.M. *Mekhanika uprochneniya detaley poverkhnostnim plasticheskim deformirovaniem* [Mechanics of parts strengthening with the surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002, 299 p.
5. Ardashnikov B.N., Bitenberg Yu.R. Study of the influence of roughness and cold working on the wear resistance. *Tekhnologicheskie metody povsheniya kachestva poverkhnosti detaley mashin*. Leningrad, 1978, pp. 162–167.
6. Balandin V.M., Guryev A.V. Influence of surface plastic deformation on the normalized steel wear resistance. *Trudi Volgogradskogo politekhnicheskogo instituta*, 1975, no. 7, pp. 9–17.
7. Veytsman M.G., Vaynshteyn V.G. Strengthening of titanium alloys with the surface plastic deformation. *Vestnik mashinostroeniya*, 1975, no. 9, pp. 73–75.
8. Dubenko V.V. Treatment of parts with the diamond smoothing. *Mashinostroitel'*, 1974, no. 34, pp. 36–37.
9. Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnim plasticheskim deformirovaniem* [Finishing-strengthening treatment with the surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978, 152 p.
10. Torbilo V.M. Force smoothing. *Sovershenstvovanie protsessov abrazivno-almaznoy i uprochnyayushchey tekhnologii v mashinostroenii*. Perm', 1983, pp. 57–60.
11. Granovsky E.G. Diamond smoothers wear sensing. *Izvestiya vuzov*, 1968, no. 11, pp. 128–131.
12. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Automated control system of ultrasonic peening on the machine tool with numerical programmed control. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 70–73.
13. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Analysis of plastic deformation on the surface in the process of ultrasonic diamond burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra RAN*, 2010, vol. 12, no. 4-1, pp. 233–236.
14. Zakharov O.V. Constancy of contact force closure during the centerless grinding on immovable supports. *STIN*, 2011, no. 7, pp. 8–10.
15. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Analysis of plastic deformation on the surface in the process of ultrasonic diamond burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra RAN*, 2010, vol. 12, no. 4-1, pp. 233–236.
16. Malyshev V.I., Selivanov A.S., Petrova A.A. Physical characteristics of plastic deformation of the surface layer during the mechanical treatment in ultrasonic field. *Materiali mezhdunar. konf. "Nauchnie issledovaniya i ikh prakticheskoe primenenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya"*. Odessa, Kuprienko publ., 2012, vol. 7, no. 3, pp. 36–43.
17. Gorshkov B.M., Remneva O.J., Vilegzanin D.V., Samokhina N.S. Skolled-experimental installation for the estimation the efficiency of increase the accuracy of coordinate boring machine tools. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 121–124.
18. Bobrovskiy N.M. Design and development of technology smoothing without the use of lubricating-cooling technological media. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra RAN*, 2008, no. S10, pp. 236–242.
19. Bobrovskiy N.M., Melnikov P.A., Bobrovskiy I.N., Egelev A.V., Lukjanov A.A. Research of influence of processing modes on the roughness of the tempered surface shaft in the mass production conditions. *Sovremennye problemi nauki i obrazovaniya*, 2011, no. 5, p. 40.
20. Bobrovskiy N.M. *Razrabotka nauchnikh osnov protsessa obrabotki detaley poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem bez primeneniya smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostey* [Development of scientific foundations of the process of treatment of parts with the surface-plastic deformation without using of lubricating-cooling fluids]. Tolyatti, TGU publ., 2008, 170 p.
21. Bobrovskiy I.N., Melnikov P.A., Bobrovskiy N.M., Egelev A.V., Lukjanov A.A. Technological support of tribological properties of machines details omental nedks. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 1-2, pp. 340–343.
22. Official website of Small Innovative Enterprise “Technomash+”. URL: tehnomasch.ru (дата обращения: 30.09.2013).

**DEVELOPMENT AND COMMERCIAL IMPLEMENTATION OF HIGH PERFORMANCE
MANUFACTURING AND ENVIRONMENTALLY APPROPRIATE TECHNOLOGY
OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION OF CARS PARTS**

© 2015

N.M. Bobrovskiy, Doctor of Engineering,

Professor of the Department «Equipment and machinery production technology»

P.A. Melnikov, candidate of technical sciences, the Director of Chemistry and Engineering Ecology Institute

I.N. Bobrovskiy, candidate of technical sciences, Head of SRD SRL-7 laboratory «Automobile technologies»

O.O. Levitskih, chief economist of SRL-7 laboratory

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: surface plastic deformation; smoothening; treatment without cooling-lubricating fluids; lubricoolant; auto part.

Abstract: The article covers the foreign and domestic experience in development of dry processing technologies. The authors give the results of the introduction of dry processing technologies (cutting, turning, milling, drilling) on the manufacturing companies in Germany. The article presents the analysis of lubricoolants consumption carried out at the JSC "AVTOVAZ", and describes the negative impact of lubricoolants on the human organism and the environment. Possible pathways of lubricoolants components to the atmosphere and soil are described.

Lubricoolants, in most cases of technological process engineering, are considered to be the obligatory components. The authors described three basic missions of lubricoolants: cooling, lubrication, and chip clearance that are essential for steady process behaviour.

The article describes the influence of lubricoolants deletion from the treatment process. The authors compared the microrelief with the base and the proposed processing technologies and developed the phenomenological model of wear of tools made of polycrystalline material with a homogeneous structure when processed by surface plastic deformation. To exercise the stochastic nature of impact of tool roughness on its wear process, the algorithm of tool surface microgeometry forming was developed. While solving the problem of automation of determining the area of tool work surface wear the calculation algorithms and IZNOSOMER software were developed. The system has the advanced capabilities to create a user interface, a wide range of functions, methods, and properties necessary for solving applied computational and engineering challenges. The solutions obtained are based on the use of domestic technology and tools only, and allow rejecting the purchase of import equipment at the cost of up to EUR 1 million per unit, by increasing the loading of machine-building enterprises of the Russian Federation. Processing without lubricoolants technology eliminates the fire hazard from oil lubricoolants, environmental pollution and harm to human health.

Б.М. Бржозовский, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»

В.В. Мартынов, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»

Е.П. Зинина, доктор технических наук,
доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»
Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов (Россия)

Ключевые слова: металлорежущий инструмент; упрочнение; низкотемпературная плазма; тепловые процессы; термопара; лаговая температура; ток смещения.

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментального исследования тепловых процессов при упрочнении металлорежущего инструмента в низкотемпературной плазме комбинированного разряда на установке «Хром».

На первом и втором этапах исследования было определено влияние подводимой в зону обработки СВЧ-мощности на прохождение температурного фронта в системе «плазма – инструмент – держатель» в ходе процессов нагрева и охлаждения инструмента и формирование значений температуры в корпусе держателя инструмента вне зоны плазменного воздействия, т. е. лаговой температуры.

Результаты выполнения первого этапа позволили установить, что приращение лаговой температуры определяется степенью протекания амбиполярных процессов как вблизи нижней границы плазмы (на низких уровнях подводимой СВЧ-мощности), так и во всем дрейфовом пространстве (на высоких уровнях подводимой СВЧ-мощности).

Результаты выполнения второго этапа показали, что преобладание в начальной стадии нагрева тенденции распространения больших потоков тепла, подводимого из плазмы, в объем инструмента может привести к перегреву и отпуску инструментальной матрицы. Причиной является «запирание» тепла в зоне нагрева, поскольку к этому моменту еще не сформировался канал его отвода через конвективное излучение и на массивные теплоемкие элементы (держатель и хвостовик инструмента), скорость распространения которого значительно выше скорости распространения фронта температуры.

На третьем этапе при исследовании влияния скорости изменения температуры на физико-механические свойства инструмента, сформированные в процессе его изготовления, было установлено, что изменение скорости роста температуры и времени отключения плазмы может существенно изменить эксплуатационную надежность инструмента.

В целом результаты исследования позволили показать, что для получения воспроизводимых результатов упрочнения, удовлетворяющих критериям создания на поверхности рабочей части инструмента слоя с заданными структурой и физико-механическими свойствами, процессом распространения потока тепла в зоне плазменной обработки необходимо управлять.

Развитие и совершенствование методов поверхностной обработки режущего инструмента, направленной на повышение его износостойкости, является актуальной задачей теории и практики резания металлов. Разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, направленных на повышение твердости и износостойкости [1–12]. Значительная часть из них – это методы обработки с применением концентрированных потоков энергий [13–21], в частности низкотемпературной плазмы комбинированного разряда пониженного давления [21], которые позволяют формировать на поверхности рабочей части инструмента износостойкий модифицированный слой.

Основная технологическая задача модифицирующего воздействия плазмы, генерируемой непосредственно у поверхности инструмента, заключается в создании такого температурного режима, который обеспечит сохранение исходных свойств сердцевины и повышение твердости поверхностного слоя с заданной структурой и физико-механическими свойствами, сформированными в процессе изготовления инструмента.

Исследование тепловых процессов выполнялось в три этапа с помощью термопары, расположенной в корпусе

держателя инструмента вне зоны плазменного воздействия (рис. 1), т. е. в качестве объекта исследования выступала лаговая температура, значения которой ежесекундно регистрировались автоматической системой на базе модуля ADAM-4018 с точностью 0,1 °С. На первом этапе исследование выполнялось на образце при его обработке в установке для низкотемпературного плазменного упрочнения «Хром» [21] на различных сочетаниях параметров технологического режима: подаваемом на образец потенциале смещения +190 В и анодных токах магнетрона от 5 до 90 мА с шагом 5 мА, что соответствовало интервалу подводимой в рабочую камеру установки СВЧ-мощности от 10 до 150 Вт. В процессе исследования регистрировались также ток смещения $I_{\text{смещ}}$ посредством микромилливольтамперметра М-62 (класс точности 0,2) и эмиссионные спектры плазмы посредством USB-спектрометра Ocean Optics QE 65000 фирмы Ocean Optics (США) в интервале длин волн 400–900 нм с точностью 1 нм.

Сопоставление изменений приращения лаговой температуры (т. е. скорости ее изменения ΔT в течение 10 с), тока смещения $I_{\text{смещ}}$ и интенсивностей спектральных линий в коротковолновой части эмиссионного

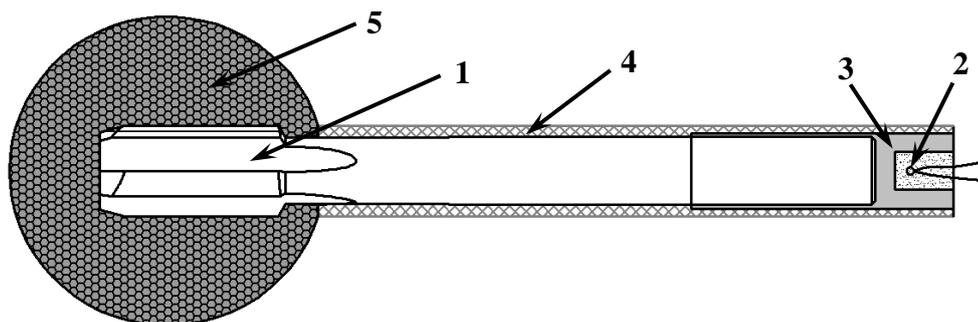


Рис. 1. Схема расположения термопары (2) при обработке инструмента (1) в низкотемпературной плазме комбинированного разряда (5):
3 – держатель инструмента; 4 – слой защитной изоляции

спектра плазмы в зависимости от уровня подводимой СВЧ-мощности позволило установить следующее:

- увеличение концентрации электронов вблизи нижней границы плазмы выше критического значения приводит к увеличению тока смещения, изменению скоростей ионизации и рекомбинации и как следствие этих процессов – к снижению приращения лаговой температуры;

- образование пологих характеристик тока смещения и интенсивностей спектральных линий в интервале анодного тока магнетрона от 30 до 45 мА связано с усилением ионизационно-рекомбинационных процессов в дрейфовом пространстве плазмы, что приводит к обеднению ее нижней границы электронной составляющей;

- приращение лаговой температуры за период регистрации сигнала термопары носит нелинейный, затухающий характер;

- изменение приращения лаговой температуры имеет различные (в том числе нулевые) значения, что свидетельствует об изменении механизма доставки заряженных частиц на поверхность, проявляющемся в образовании перегибов на кривых тока смещения и интенсивностей спектральных линий;

- усиление кулоновского взаимодействия заряженных частиц во всем объеме плазмы (диапазон анодного тока магнетрона от 50 до 70 мА) ведет к усилению амбиполярных процессов, что снижает ее неидеальность;

- повышение концентрации электронов до уровня начала формирования амбиполярных процессов во всем объеме плазмы приводит к существенной компенсации пространственного заряда, что проявляется в снижении величины тока смещения $I_{\text{смещ}}$, формировании куполообразной характеристики на графиках интенсивностей спектральных линий во всем диапазоне длин волн эмиссионного спектра, значительному росту приращения температуры и, соответственно, температуры при изменении уровня подводимой СВЧ-мощности в диапазоне анодного тока магнетрона от 75 до 85 мА. Дальнейшее увеличение мощности приводит к нарушению квазинейтральности, снижению приращения температуры, повышению тока смещения, снижению интенсивности спектральных линий, т. е. нарушению протекания амбиполярных процессов в плазме.

Таким образом, приращение лаговой температуры определяется степенью протекания амбиполярных процессов как вблизи нижней границы плазмы (на низких уровнях подводимой СВЧ-мощности), так и во всем дрейфовом пространстве (на высоких уровнях подводимой СВЧ-мощности).

На втором этапе исследования определялись особенности прохождения температурного фронта в системе «плазма – инструмент – держатель». С этой целью был проведен имитационный эксперимент, в котором в качестве источника тепла использовалось пламя спиртовки в желтой зоне с температурой 800 °С. Для регистрации теплового излучения на инструменте использовался тепловизор модели FLIR.

Расшифровка записей тепловизора при нагреве метчика М10 в течение 400 с и его последующего охлаждения позволила получить данные о распространении фронта температуры при нагреве инструмента (рис. 2), а также данные о ходе процессов нагрева и охлаждения, позволившие реконструировать траекторию изменения температуры (рис. 3).

Анализ экспериментальных данных позволил установить следующее.

1. В начальной стадии преобладает тенденция распространения тепла в объем инструмента (рис. 2).

2. Максимального значения температура на поверхности инструмента достигает в течение первых 100–120 с (рис. 3). Предположительно именно в этот период может произойти перегрев и отпуск инструментальной матрицы. Причиной являются большие потоки тепла, подводимого из плазмы, которое будет запереться в зоне нагрева, поскольку в этот момент времени еще не сформировался канал его отвода через конвективное излучение и на массивные теплоемкие элементы (держатель и хвостовик инструмента).

3. Скорость распространения фронта конвективного излучения по длине инструмента значительно выше скорости распространения фронта температуры.

4. Снижение скорости распространения фронта температуры связано с усилением влияния конвективного излучения.

5. Точка перегиба, расположенная на расстоянии 43 мм от начала инструмента в зоне нагрева, присутствует на обоих графиках. Изменение скорости распространения

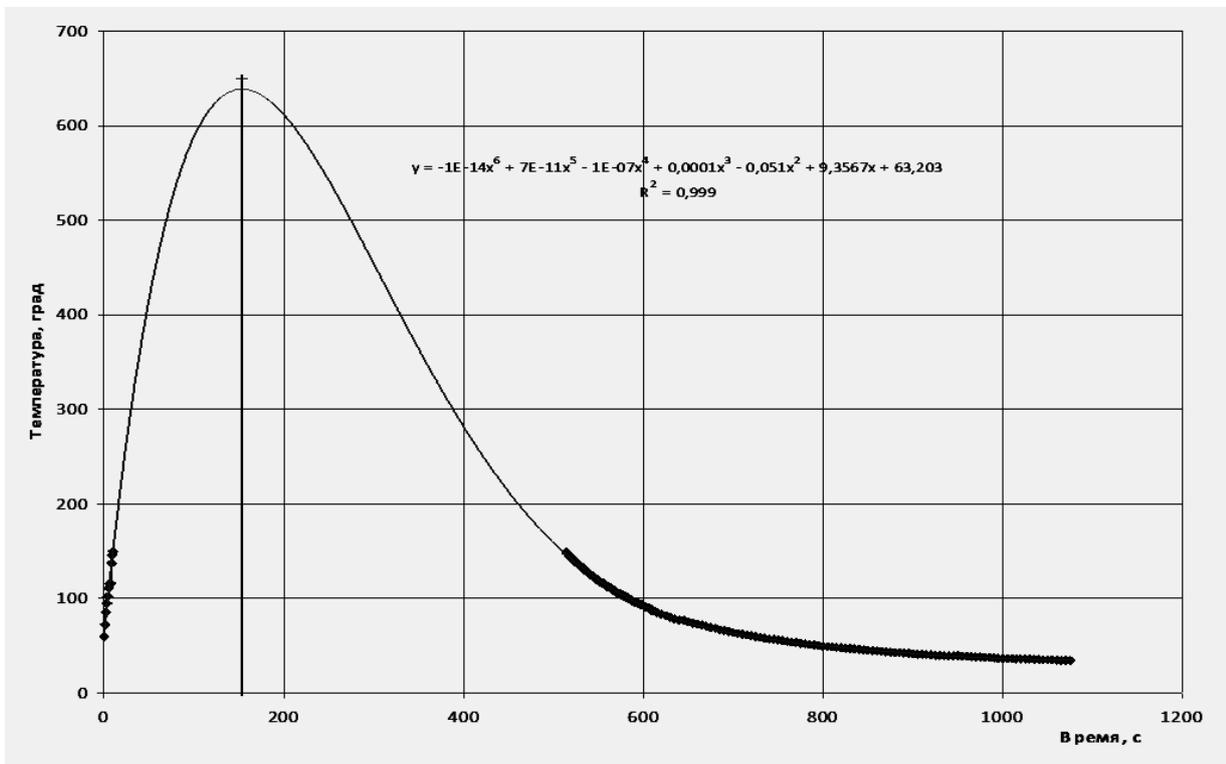
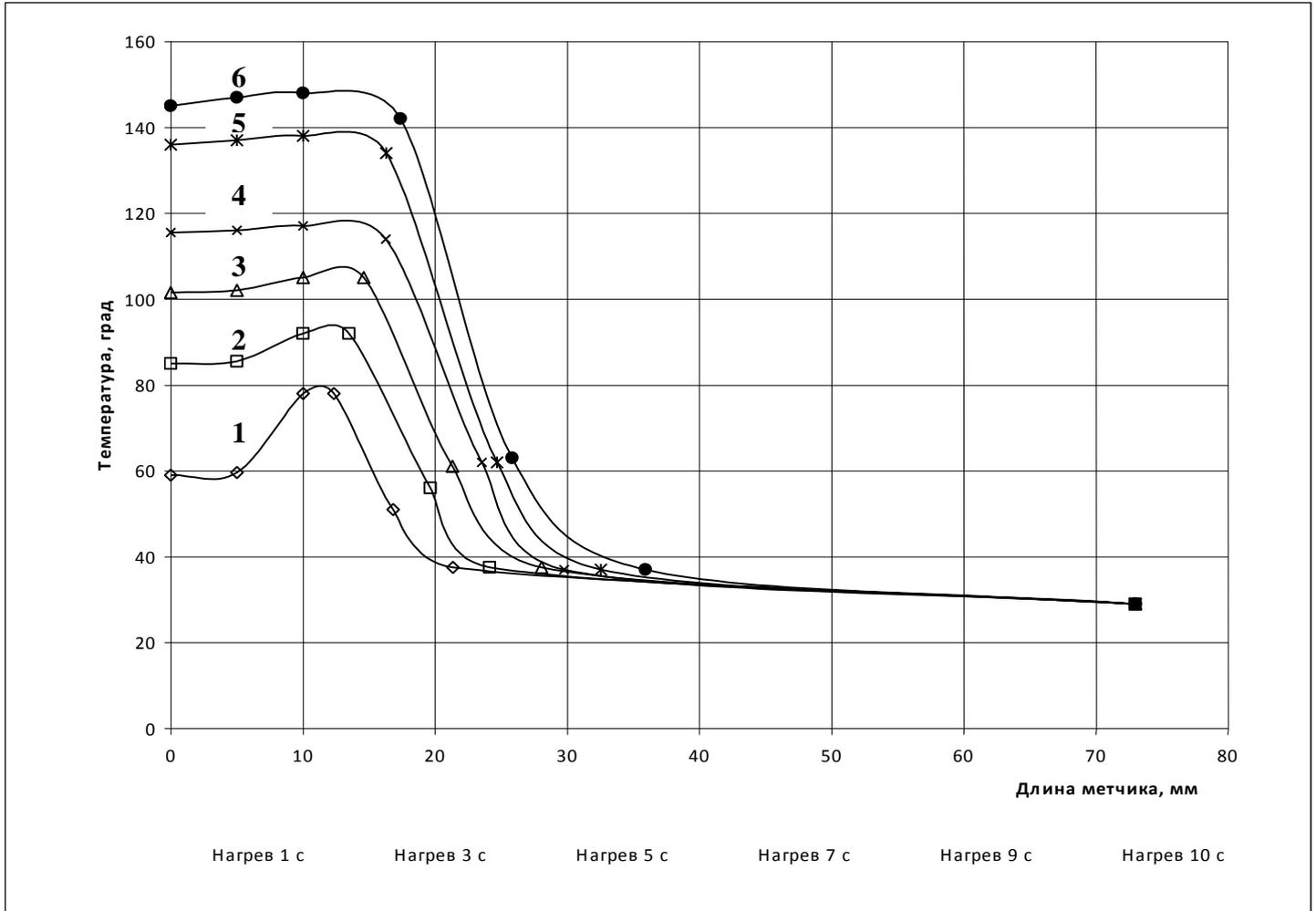


Рис. 3. Изменение температуры в ходе эксперимента (реконструкция)

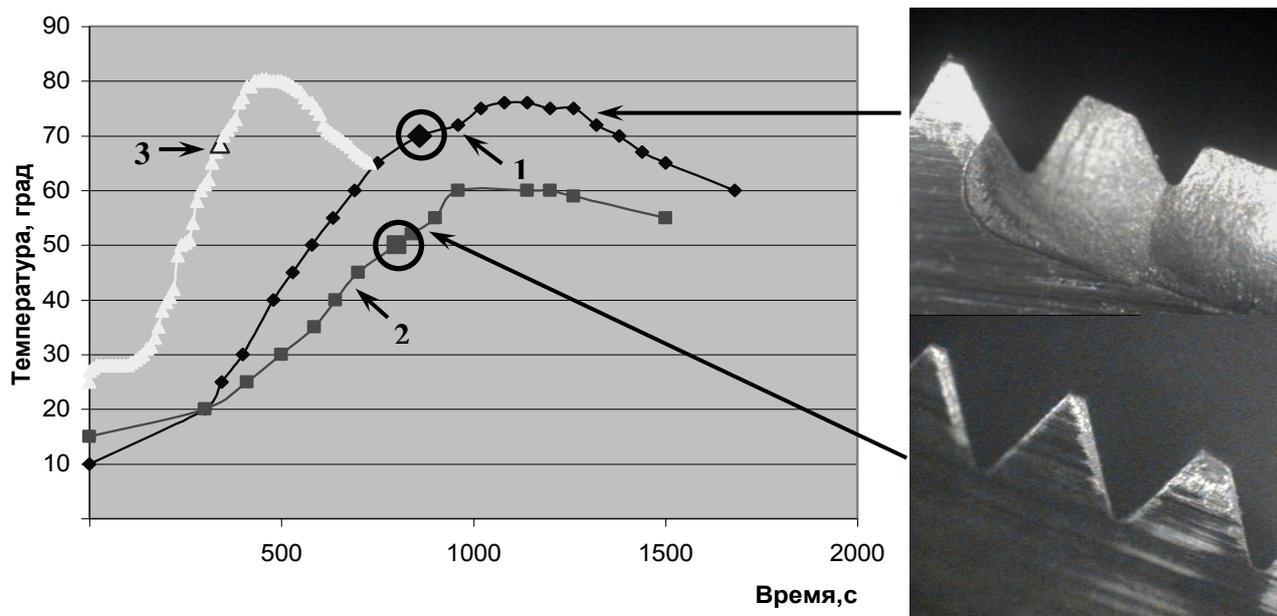


Рис. 4. Графики изменения температуры при обработке метчиков $M12 \times 1,25$ мм в низкотемпературной плазме комбинированного разряда с длиной зоны обработки 25 мм (1) и 20 мм (2) и в пламени спиртовки с длиной зоны обработки 20 мм (3); О – окончание воздействия плазмы

фронта конвективного излучения возможно связано с изменением теплоемкости материала хвостовика инструмента.

На третьем этапе исследования было выполнено сравнение температуры при обработке реального инструмента при одинаковых технологических режимах, но разной площади поверхности обработки (рис. 4). Результаты показали, что увеличение скорости изменения температуры может сказаться на изменении исходных физико-механических свойств сердцевины инструмента, сформированных в процессе его изготовления (это видно на приведенных на рис. 4 photographs состоянии режущих кромок). Анализ графиков на рис. 4 показал, что при плазменной обработке: по окончании воздействия плазмы наблюдается различный характер хода кривых температуры: плавное возрастание на 7–12 градусов и последующее убывание (метчик 1), стабилизация в течение 2–3 минут и последующее плавное охлаждение (метчик 2); изменение скорости роста температуры и времени отключения плазмы может существенно изменить эксплуатационную надежность инструмента.

В целом результаты выполненного исследования позволяют сделать вывод о том, что передача и распространение потока тепла в поверхностном слое зависят от условий генерации низкотемпературной плазмы и определяют характер протекающих при этом процессов как вблизи ее нижней границы, так и во всем дрейфовом пространстве. В связи с этим для формирования износостойкого модифицированного слоя процесс упрочнения необходимо рассматривать как совокупность двух последовательных фаз: нагрева инструмента скомпенсированным потоком плазмы до температур формирования тонкого слоя расплава на поверхности элементов структуры его рабочей части в результате эффективной передачи энергии поверхностным атомам; охлаждения инструмента при пониженном давлении для фиксации сформированного расплава.

Продолжительность процесса упрочнения в общем случае является величиной переменной и определяется в пространстве его вход/выходных параметров согласованием их значений между собой по критерию обеспечения целенаправленного распространения потока тепла в поверхностном слое. Для получения же воспроизводимых результатов упрочнения, удовлетворяющих критериям создания на поверхности рабочей части инструмента слоя с заданными структурной и физико-механическими свойствами, необходимо управлять процессом распространения потока тепла в зоне плазменной обработки. Представленные в статье материалы показывают, что возможности практической реализации такого управления имеются.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
2. Лашманов В.И. Повышение износостойкости инструмента // ПРОИнструмент. 2002. № 18. С. 16–18.
3. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Ким В.А., Мокрицкий Б.Я., Алтухова В.В., Киричек А.В. Научные технологии упрочнения инструмента // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 6. С. 19–24.
4. Котков Ю.К., Наумов А.Г. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей // Физика трибологических систем: сб. ст. Иваново: Иванов. хим.-техн. ин-т, 1988. С. 94–98.
5. Боровушкин И.В. Повышение стойкости режущего инструмента ионно-плазменным напылением // Станки и инструменты деревообрабатывающих производств: межвуз. сб. науч. тр. Л.: Ленинград. лесотехнич. академия, 1988. С. 30–33.

6. Повышение стойкости режущего инструмента путем изменения адгезионно-прочностных свойств износостойкого покрытия / В.П. Табаков [и др.] // Станки и инструмент. 1990. № 3. С. 22–23.
7. Мигранов М.Ш. Исследование износостойких покрытий для режущего инструмента с нанокристаллической структурой // Известия вузов. Машиностроение. 2005. № 1. С. 56–62.
8. Верещака А.С., Терентьев И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.
9. Смольников Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструментов в соляных ваннах. М.: Машиностроение, 1989. 148 с.
10. Разработка и внедрение технологии химико-термической обработки деталей и инструмента в условиях тлеющего разряда: отчет о НИР № ГР 80005837; инв. № 02840 035457. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1983. 106 с.
11. Блинков И.В., Волхонский А.О., Аникин В.Н., Скрылева Е.А. Мультислойные наноструктурные покрытия TiAlN/ZrNbN/CrN, полученные методом Arc-PVD, для режущего твердосплавного инструмента // СТИИ. 2012. № 5. С. 18–24.
12. Курочкин А.В. Технологические особенности многофункциональных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента // Вестник РГГА. 2010. № 3. С. 166–172.
13. Плазмохимическое упрочнение инструментальных сплавов / В.Б. Тригуб [и др.] // Разработка, производство и применение инструментальных материалов: сб. докл. VI республик. семинара. Киев: Ин-т проблем материаловедения им. И.Н. Францевича АН УССР, 1990. С. 45–46.
14. Бровер Г.И., Шульга А.А., Русин П.И. Особенности лазерной и электронно-лучевой обработки инструментальных сталей // Электронная обработка материалов. 1989. № 1. С. 15–18.
15. Латышев В.Н., Наумов А.Г., Новиков В.В., Суханов Р.С., Шварев Е.А. Повышение стойкости быстрорежущего инструмента ионно-лазерным поверхностным упрочнением // Станки и инструмент. 2005. № 6. С. 17–20.
16. Дашкевич И.П., Княжевская Г.С., Томашевич Ю.Г. Плазменное упрочнение металлообрабатывающего инструмента и штамповой оснастки // Новая высокочастотная техника для машиностроительного производства: сб. науч. тр. М.: ВНИИЭТО, 1988. С. 32–37.
17. Ли И.П., Рухляда Н.Я. Создание поверхностных структур с заданными свойствами с помощью концентрированных потоков частиц // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 1. С. 61–65.
18. Иванов Ю.Ф., Колубаева Ю.А., Филимонов С.Ю., Овчаренко В.Е. Электронно-пучковая модификация плазменных металлокерамических покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 12. С. 17–22.
19. Погребняк А.Д., Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Легачев А.Е. Модификация свойств металлов под действием мощных ионных пучков // Известия ВУЗов. Физика. 1987. № 1. С. 52–55.
20. Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 176 с.

REFERENCES

1. Grigoryev S.N. *Metodi povisheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Methods of cutting tool hardening]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2009, 368 p.
2. Lashmanov V.I. Tool wear resistance increase. *PROinstrument*, 2002, no. 18, pp. 16–18.
3. Vereshchaka A.S., Grigor'ev S.N., Kim V.A., Mokritskiy B.Ya., Altukhova V.V., Kirichek A.V. Science intensive technologies of tool hardening. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2013, no. 6, pp. 19–24.
4. Kotkov Yu.K., Naumov A.G. Increase of wear resistance of high-speed steel tool. *Fizika tribologicheskikh sistem*. Ivanovo, Ivanovskiy khimiko-tehnologicheskyy institut publ., 1988, pp. 94–98.
5. Borovushkin I.V. Hardening of cutting tool using ion-plasma sputtering. *Stanki i instrumenti derevoobrativayushchikh proizvodstv*. Leningrad, Leningradskaya lesotekhnicheskaya akademiya publ., 1988, pp. 30–33.
6. Tabakov V.P. et al. Hardening of cutting tool by changing the adhesive strength properties of wear-resistant coating. *Stanki i instrument*, 1990, no. 3, pp. 22–23.
7. Miganov M.Sh. Study of wear-resistant coatings for cutting tool with nanocrystal structure. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2005, no. 1, pp. 56–62.
8. Vereshchaka A.S., Terentyev I.P. *Rezhushchii instrumenti s iznosostoykimi pokrytyami* [Cutting tools with wear-resistant coatings]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986, 192 p.
9. Smolnikov E.A. *Termicheskaya i khimiko-termicheskaya obrabotka instrumentov v solyanikh vannakh* [Thermal and thermo-chemical processing of tools in salt-bath]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989, 148 p.
10. Development and implementation of technology of thermo-chemical processing of details and tool in the terms of glow discharge: research report № GR 80005837; inv. № 02840 035457. Moscow, MVTU im. N.E. Bauman publ., 1983, 106 p.
11. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Anikin V.N., Skryleva E.A. Multi-layer nano-structural TiAlN/ZrNbN/CrN coatings produced using the Arc-PVD method for hard-metal cutting tool. *STIN*, 2012, no. 5, pp. 18–24.
12. Kurochkin A.V. Technological characteristics of multi-purpose nano-structured coatings for cutting tool. *Vestnik RGATA*, 2010, no. 3, pp. 166–172.
13. Trigub V.B. et al. Plasma-chemical strengthening of tool alloys. *Sbornik dokladov VI respublikanskogo seminaru "Razrabotka, proizvodstvo i primenenie instrumentalnykh materialov"*. Kiev, 1990, pp. 45–46.
14. Brover G.I., Shulga A.A., Rusin P.I. Special aspects of laser and electron-beam treatment of tool steels. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1989, no. 1, pp. 15–18.
15. Latishev V.N. et al. Hardening of high-speed cutting tool using the nano-laser surface strengthening. *STIN*, 2005, no. 6, pp. 17–20.

16. Dashkevich I.P., Knyazhevskaya G.S., Tomashevich Yu.G. Plasma strengthening of metal working tool and die tooling. *Novaya vysokochastotnaya tekhnika dlya mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Moscow, VNIIEТО, 1988, pp. 32–37.
17. Lee I.P., Rukhlyada N.Ya. Producing the surface structures with the help of concentrated flows of particles. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2005, no. 1, pp. 61–65.
18. Ivanov Yu.F., Ovcharenko V.E., Kolubaeva Yu.A., Filimonov S.Yu. Electron beams modification of plasma metal-ceramic coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2008, no. 12, pp. 17–22.
19. Pogrebnyak A.D., Remnev G.E., Chistyakov S.A., Legachev A.E. Modification of the properties of metals by high-power ion beams. *Russian physics journal*, 1987, vol. 30, no. 1, pp. 39–48.
20. Uglov V.V. et al. Plasma-immersion nitrogen implantation into high-speed cutting steel. Phase composition and mechanical properties. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1999, no. 5, pp. 18–25.
21. Brzhozovsky B.M., Martinov V.V., Zinina E.P. *Uprochnenie rezhushchego instrumenta vozdeystviem nizkotemperaturnoy plazmi kombinirovannogo razryada* [Cutting tool strengthening by influence of low-temperature combined discharge plasma]. Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnichesky universitet publ., 2009, 176 p.

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL PROCESSES WHEN STRENGTHENING THE METAL-CUTTING TOOLS IN LOW-TEMPERATURE PLASMA

© 2015

B.M. Brzhozovsky, Doctor of Engineering, Professor,

Professor of the Department of Design of engineering and technological complexes

V.V. Martynov, Doctor of Engineering, Professor,

Professor of the Department of Design of engineering and technological complexes

E.P. Zinina, Doctor of Engineering,

assistant professor of the Department of Design of engineering and technological complexes

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov (Russia)

Keywords: metal-cutting tool; strengthening; low-temperature plasma; thermal processes; thermocouple; lagged temperature; bias current.

Abstract: The article gives the results of experimental study of thermal processes when strengthening the metal-cutting tool in low-temperature plasma of combined discharge using the “Chrom” plant.

The first and the second stages of study identified the influence of fed to the processing zone SHF-power on the passage of temperature front in the “plasma – tool – holder” system in the process of tool heating and cooling and the forming of temperature values in the tool holder body out of the zone of plasma influence, i.e. lagged temperature.

The results of the first stage of study made it possible to identify that the lagged temperature increment depends on the degree of the ambipolar process reaction both near the plasma low bound (on the low levels of fed SHF-power) and within the whole drift space (on the high levels of fed SHF-power).

The results of the second stage showed that the domination of tendency to propagation of large flows of heat fed from plasma to the tool space at the initial stages may lead to the over-heating and tool base tempering. The reason is the “closing” of heat in the heating zone which propagation velocity is notably higher than the temperature front propagation velocity. It caused by the fact that, for this moment, the channel for heat rejection through convective emission and to the massive heat elements (tool holder and tail end) is not formed yet.

During the third stage, while studying the influence of temperature rate of change on the tool physical and mechanical properties formed in the process of its production, the authors revealed that the change of temperature increase rate and plasma turn-off time may change considerably the tool service reliability.

In the whole, the results of research made it possible to display that the process of heat flow propagation in the plasma treatment zone should be controlled to get the reproducible strengthening results complying with the criteria of creation of a course with a specified structure and physical and mechanical properties on the tool working part surface.

**ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ПРОГНОЗА ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ**

© 2015

К.Я. Васькин, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)***Н.В. Хрипунов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика в экономике»*Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти (Россия)*

Ключевые слова: информационная система; обрабатываемость материалов; акустическая эмиссия; цифровая обработка сигнала; процессное моделирование.

Аннотация: Системный подход широко применяется при модернизации бизнес-процессов, организационной структуры, корпоративного документооборота и экономических информационных систем. Использование приемов системного анализа при внедрении результатов технических исследований в настоящее время недостаточно освещено, поэтому направление работы, связанное с применением нотации IDEF0 к описанию системы, разрабатываемой по результатам научных исследований в области резания металлов, является актуальным.

Работа посвящена применению методов системного анализа при освоении результатов исследований оценивания интенсивности изнашивания металлорежущего инструмента по акустической эмиссии процесса резания. Использован анализ процессов в нотации IDEF0 для описания проектируемой информационной системы прогнозирования обрабатываемости материалов.

Построена контекстная диаграмма, содержащая внешние взаимодействия анализируемой системы. Внутренние взаимодействия анализируемой системы на верхнем уровне декомпозиции отражены на диаграмме декомпозиции первого уровня. Выполнена структуризация функций системы и необходимых для функционирования системы ресурсов в рамках входных, выходных, поддерживающих и регламентирующих параметров процессов. Предложены приемы прогнозирования обрабатываемости, основанные на использовании визуальных и численных представлений информации и применении современных технологий обработки слабоструктурированной информации.

В результате работы показано, что использование анализа процессов по методологии IDEF0 является эффективным средством, позволяющим на этапе внедрения результатов исследований структурировать информационные взаимодействия в рамках входных, выходных, управляющих и поддерживающих параметров процессов на различных уровнях детализации системы. Применение методов системного анализа к описанию системы прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии позволило определить основные требования к информационной системе, конкретизация которых возможна в рамках принятой методологии при переходе на низшие уровни декомпозиции в описании процессов системы.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие машиностроительного предприятия связано с постоянным снижением производственных расходов, немалую часть которых составляют затраты на материалы, применяемые для изготовления деталей двигателя и трансмиссии. Новый материал, например конструкционная сталь, в первую очередь проверяется на удовлетворение конструкторских требований – для надежной работы детали в узле. Отличие в технологических характеристиках (обрабатываемость резанием) нового материала – величина вторичная и оценивается по соответствию механических свойств, структуры и химического состава, что недостаточно точно. Наиболее точно обрабатываемость может быть оценена в условиях действующего производства, но подобные испытания сопряжены с риском перерасхода инструмента, повышения трудоемкости и брака. И когда заготовка из нового материала с неудовлетворительной обрабатываемостью находится в обрабатывающих линиях основного производства, уже не время для подстройки технологического процесса, оптимизации условий обработки и других мероприятий. Традиционно для оценки обрабатываемости в лабораторных условиях применяли испытания с оценкой величины износа режущего инструмента – подобные испытания весьма затратны по трудоемкости и материалу.

Оценка обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии широко представлена в исследованиях [1–19]

и обладает, по сравнению со стойкостными испытаниями, такими достоинствами, как возможность проведения в лабораторных условиях при незначительном расходе инструмента, материала и машинного времени. Практическое же использование сдерживается тем, что оценка обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии предусматривает оперирование разнородными информационными потоками, такими как потоковые сигналы датчиков, результаты ранее проведенных испытаний, режим обработки и др. В подобных случаях при разработке информационной системы целесообразно применение процессного подхода и методологии IDEF0.

Цель работы – выполнить процессный анализ [20] системы оценки обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии на базе методологии IDEF0.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ

В состав исследуемой системы (рис. 1) входят технологическое оборудование, измерительное оборудование, подсистема компьютерной регистрации сигнала, подсистема цифровой обработки сигнала, система анализа и прогноза обрабатываемости. Работа информационной системы состоит в том, чтобы на основе обработки и анализа данных о кратковременном процессе резания материала дать прогноз обрабатываемости (или обратную величину – интенсивность изнашивания) при обработке. При этом в системе реализованы следующие основные функции: регистрация акустического сигнала,

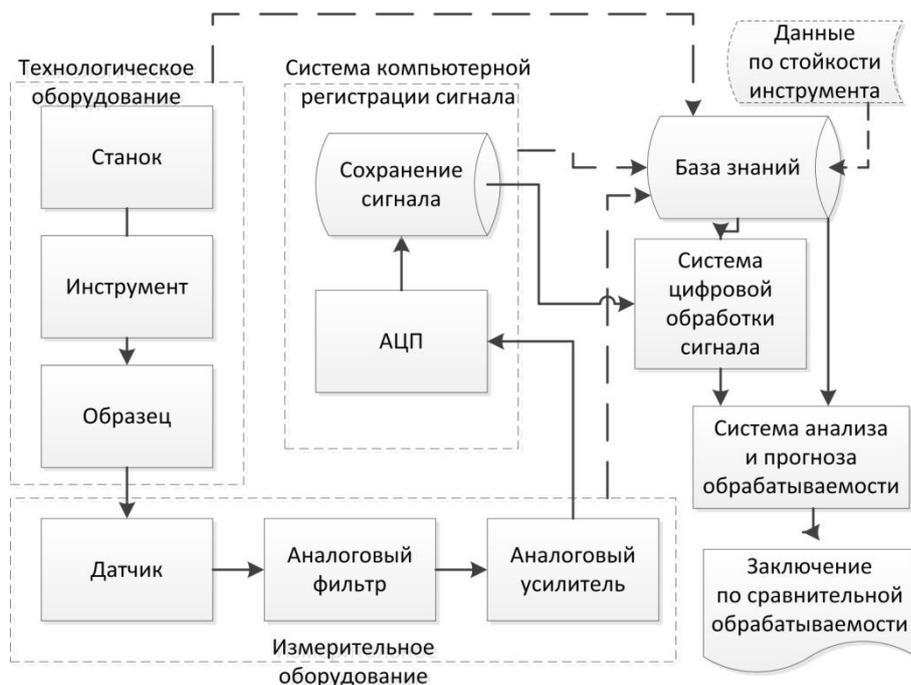


Рис. 1. Общая схема системы прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии

обработка акустического сигнала с получением количественных и качественных характеристик, прогнозирование сравнительной обрабатываемости материалов на основе анализа количественных и качественных характеристик, регистрация реальных параметров обрабатываемости в базе знаний.

Для процессного описания использовано свободно распространяемое программное обеспечение RAMUS Educations, поддерживающее методологию IDEFO.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Контекстная диаграмма процесса прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии (рисунок 2) описывает систему как единый процесс на уровне взаимодействия системы с окружением. Входом системы служат образцы материала и документация на образцы. Выходом системы являются заключения об обрабатываемости. Процесс поддерживается персоналом и оборудованием исследовательской лаборатории

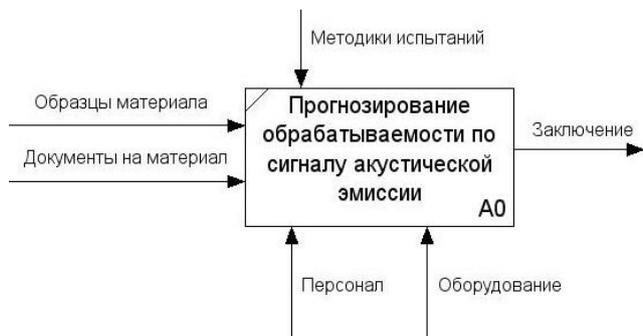


Рис. 2. Диаграмма процессного анализа прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии (контекстная диаграмма)

и регламентируется утвержденными на уровне предприятия методиками проведения испытаний при прогнозировании обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии.

Диаграмма декомпозиции процесса прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии (рисунок 3) описывает систему как совокупность четырех подсистем: генерация сигнала (процесс A1), обработка сигнала (процесс A2), сохранение информации (процесс A3) и анализа данных (процесс A4). При понижении уровня декомпозиции наряду с разложением процесса на подпроцессы конкретизируются входные, выходные, поддерживающие и регламентирующие параметры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Графическое представление системы прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии позволяет более четко структурировать функции системы и необходимые для функционирования системы ресурсы. Процесс генерации сигнала (A1) выполняется в унифицированных условиях испытаний (геометрия образцов, режущий инструмент, технологическая и измерительная оснастка, настройки измерительной аппаратуры, режимы обработки). Условия проведения испытаний и результаты в виде исходного сигнала акустической эмиссии сохраняются в базе знаний. Также исходный сигнал проходит первичную обработку в блоке A2 с предоставлением результатов в блоке A4. По этим данным формируется запрос к базе знаний (блок A3) для поиска аналогов и извлечения соответствующей информации по ранее проведенным испытаниям.

Обработка исходного сигнала в блоке A2 порождает некоторый набор данных, используемых для прогноза в блоке A4. Результаты, передаваемые в A4, являются представлениями характеристик сигнала, полученных

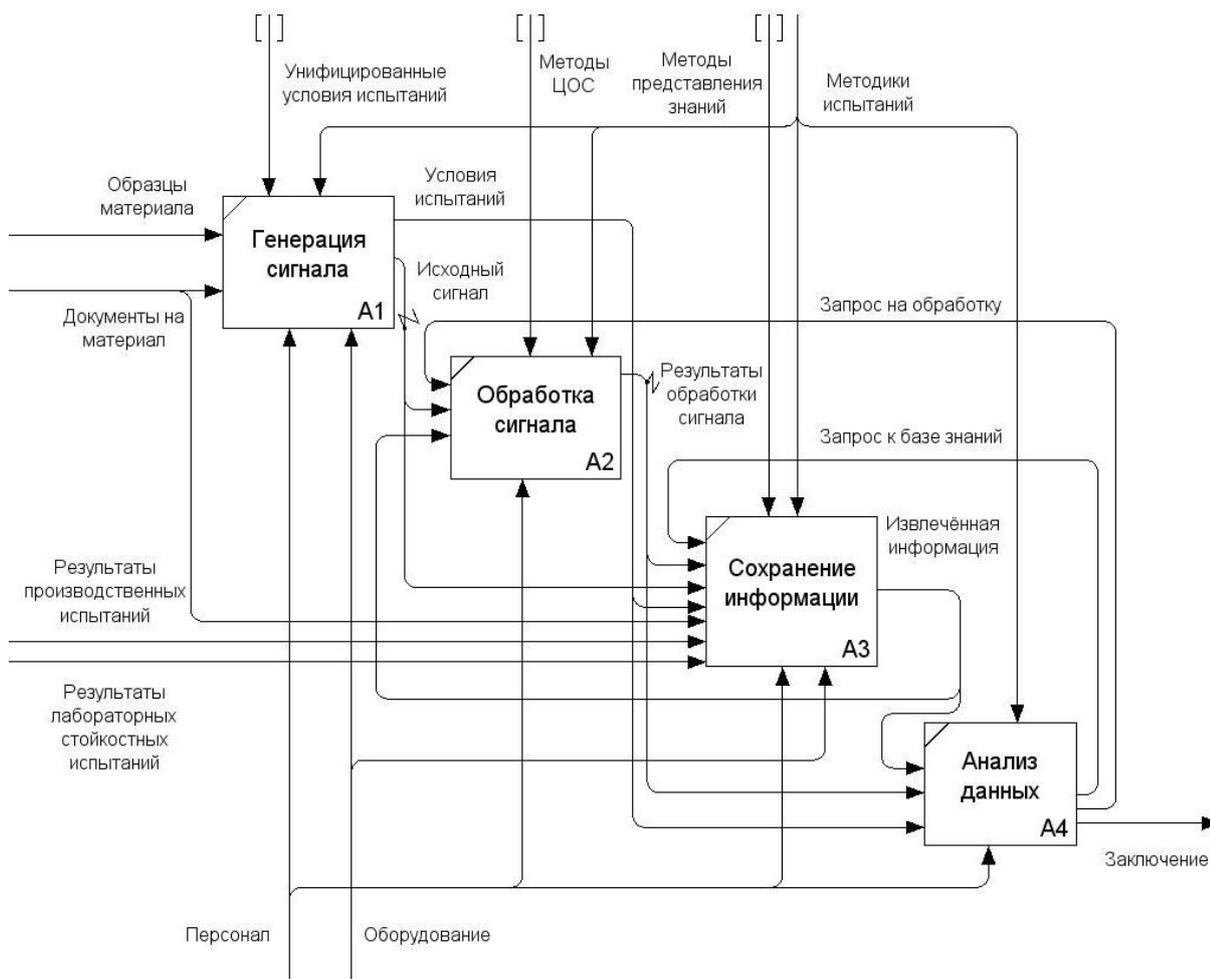


Рис. 3. Диаграмма процессного анализа прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии (диаграмма декомпозиции)

с применением различных методов цифровой обработки. Числовые представления используются для количественного сравнения, визуальные представления используются для качественного сравнения. Существует возможность передачи визуальных представлений в расчетный блок А2 для выражения визуально отмеченных отличий в численных представлениях.

Результаты обработки представляют собой в общем случае многомерные массивы, на основании которых формируются представления, которые допускают численное или визуальное сравнение – соответственно численное и визуальное представления. В качестве методов получения представлений (методы ЦОС, см. рисунок 2) могут быть использованы интегральное усреднение, интервальное усреднение, визуальный анализ и нечеткая кластеризация и т. п.

Использование визуальных представлений обеспечивает более полный учет особенностей сигнала акустической эмиссии при прогнозировании обрабатываемости. Например, трехмерный график энергии сигнала при фрезеровании стали 18Х1Г1ФР, показанный на рисунке 4, позволяет выделить отдельные энергетические пики вне областей врезания и выхода инструмента, что может свидетельствовать о наростообразовании.

Численно замеченная визуально особенность может быть оценена с использованием запроса на обработку из блока А4 – анализ данных – в блок А2 – обработка сигнала – с заданными условиями, например, исключая из рассмотрения врезание и выход инструмента, и с выбранным методом, например, нечеткая кластеризация.

Подсистема А4 – анализ – представляет собой интеллектуальную изначально слабоформализованную среду для анализа представлений, рассчитанных в А2 с прогнозом относительной обрабатываемости сравниваемых материалов. Среди представлений выделяют группу основных и группу дополнительных. Основные представления немногочисленны и служат для укрупненной оценки сравнительной обрабатываемости. Дополнительные представления используются для уточнения (корректировки) прогноза и для корректировки уровня достоверности прогноза (необходимость повторного эксперимента). Избыточность инструментария и характеристик подсистемы А2 служит залогом развития и обучения системы в целом. Более того, хранение в базе знаний исходных сигналов позволяет совершенствовать и развивать инструментарий блока А2.

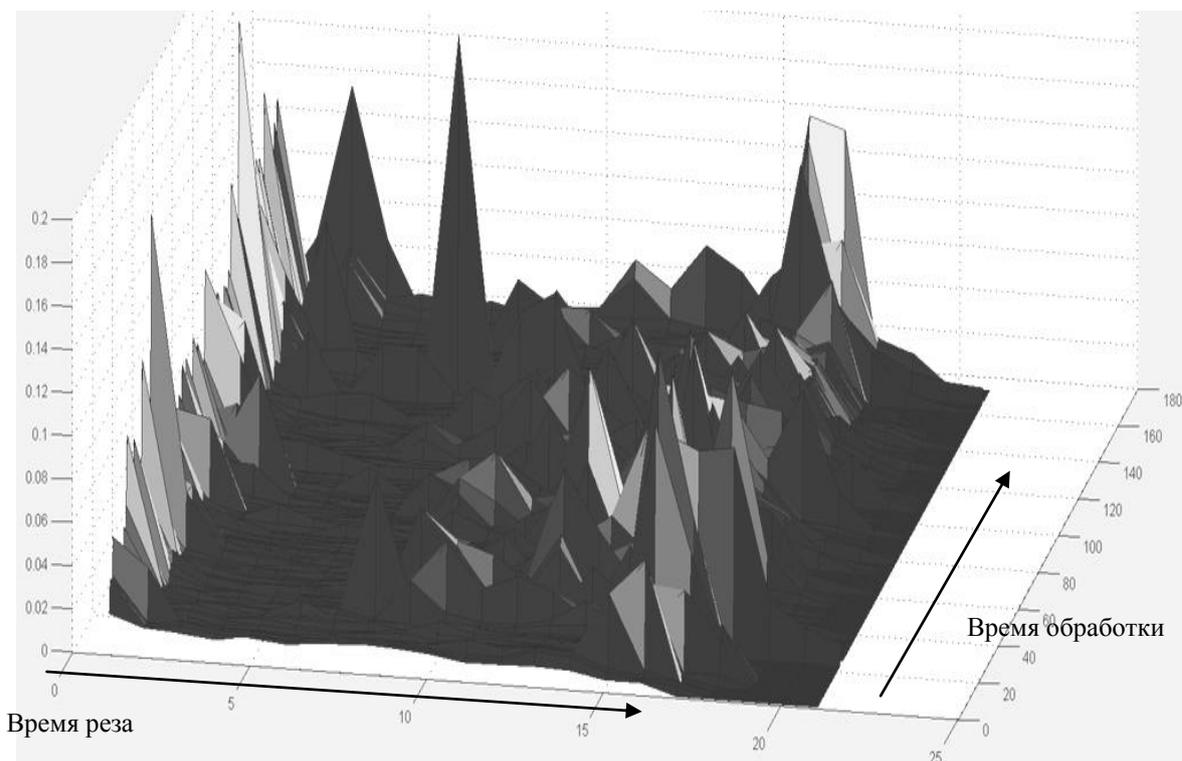


Рис. 4. Визуальное представление энергии сигнала при фрезеровании стали 18X1Г1Ф

Организация базы знаний АЗ предусматривает хранение как структурированной информации по выполненным испытаниям, так и слабоструктурированной информации по результатам производственных и лабораторных стойкостных испытаний. Эффективное использование базы знаний для прогнозирования обрабатываемости материала связано с развитием управляющего параметра «Методы представления знаний» на основе современных информационных технологий работы со знаниями – экспертные оценки, Data Mining, Data Fusion and Integration, статистический анализ, технологии нечеткой логики.

ВЫВОДЫ

1. Использование методов системного анализа, в частности анализа процессов по методологии IDEF0, обеспечивает структурированное представление информации о входных, выходных, управляющих и поддерживающих параметрах системы на различных уровнях детализации.

2. Применение методологии IDEF0 к описанию системы прогнозирования обрабатываемости по сигналу акустической эмиссии на верхнем уровне детализации позволяет более четко структурировать функции системы и определить необходимые для функционирования системы ресурсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. М.: Машиностроение, 2005. 384 с.
2. Васькин К.Я., Хрипунов Н.В. Прогнозирование обрабатываемости металлов по акустико-эмиссионным показателям процесса резания // Проблемы

машиностроения и автоматизации. 2014. № 1. С. 90–98.

3. Барзов А.А., Кулагин А.Ю., Шашурин В.Д. Зависимость акустической эмиссии при резании от геометрии заточки инструмента // Металлорежущий и контрольный инструмент. 1980. № 2. С. 71–73.
4. Суворов А.А., Барзов А.А. Применение метода акустической эмиссии к исследованию обрабатываемости материалов резанием // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1979. № 3. С. 150–153.
5. Барзов А.А., Вдовин А.А., Игонькин Б.А. Исследование обрабатываемости полимерных композиционных материалов методом акустико-электрической диагностики // Сб. трудов МВТУ. Применение пластмасс в машиностроении. 1984. № 20. С. 31–58.
6. Барзов А.А. Акусто-электрическая диагностика процесса механической обработки материалов резанием // Труды МВТУ. Прогрессивные физико-химические методы обработки труднообрабатываемых материалов. 1986. № 453. С. 52–60.
7. Барзов А.А., Голдобин Н.Д. Исследование нестационарной механики резания пластмасс на основе анализа электроакустических явлений // Сб. трудов МВТУ. Применение пластмасс в машиностроении. 1981. № 18. С. 28–54.
8. Подураев В.Н., Суворов А.А., Барзов А.А. Исследование процесса резания методом акустической эмиссии // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1976. № 12. С. 160–163.
9. Подураев В.Н., Барзов А.А., Горелов В.А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. М.: Машиностроение, 1988. 54 с.

10. Дией Е.Н., Дорнфельд Д.А. Модель акустической эмиссии, генерируемой разрушением инструмента при обработке резанием // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. 1988. № 3. С. 87–96.
11. Дией Е.Н., Дорнфельд Д.А. Диагностика износа инструмента при торцевом фрезеровании методом акустической эмиссии // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. 1988. № 3. С. 97–108.
12. Emel E., Kannatey-Asibe E. Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of AE signals // Trans. ASME. J. Eng. Ind. 1988. Vol. 110. № 2. P. 137–145.
13. Lee M., Wildes D.G., Keramati B. Effect of tool geometry on acoustic intensity // CIRP Ann. 1988. Vol. 37. № 1. P. 57–60.
14. Сравнительный спектральный анализ шумоподобных акустических сигналов при мониторинге и диагностике промышленного оборудования / И.А. Растегаев [и др.] // Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 80–87.
15. Сидоров А.С. Подходы к решению задачи прогноза в системе оперативной диагностики состояния режущего инструмента // Мехатроника, робототехника, автоматизация. 2006. № 1. С. 158–164.
16. Хрипунов Н.В. Практическая методология оценки обрабатываемости материалов по акустической эмиссии // Актуальные проблемы технических наук: сб. ст. междунар. научно-практ. конф. Уфа, 2014. С. 101–103.
17. Хрипунов Н.В. Информационная система прогноза обрабатываемости материалов // Информационные системы и технологии: управление и безопасность. Тольятти: ПВГУС, 2012. С. 295–305.
18. Blum T., Inasaki I. A Study of Acoustic Emission from Orthogonal Cutting Process // ASME J. Eng. Ind. 1990. № 112. P. 203–211.
19. Liang S.Y., Dornfeld D.A. Detection of Cutting Tool Wear Using Time Series Modeling of Acoustic Emission Signals // ASME J. Eng. Ind. 1989. № 111. P. 199–205.
20. Вдовин В.М., Суркова Л.Е., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ. М.: Дашков и К, 2010. 640 с.
5. Barzov A.A., Vdovin A.A., Igonkin B.A. Study of polymer composite materials machinability using the methods of acoustic electrical assessment. *Sbornik trudov MVTU. Primenenie plastmass v mashinostroenii*, 1984, no. 20, pp. 31–58.
6. Barzov A.A. Acoustic electrical assessment of the process of mechanical cutting treatment of materials. *Trudi MVTU. Progressivnie fiziko-khimicheskie metodi obrabotki trudnoobrabativalnykh materiallov*, 1986, no. 453, pp. 52–60.
7. Barzov A.A., Goldobin N.D. Study of displaceable mechanics of plastic materials cutting on the basis of electro-acoustic phenomena analysis. *Sbornik trudov MVTU. Primenenie plastmass v mashinostroenii*, 1981, no. 18, pp. 28–54.
8. Poduraev V.N., Suvorov A.A., Barzov A.A. Study of cutting process using the acoustic emission method. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie*, 1976, no. 12, pp. 160–163.
9. Poduraev V.N., Barzov A.A., Gorelov V.A. *Tekhnologicheskaya diagnostika rezaniya metodom akusticheskoy emissii* [Technological diagnostics of cutting using the acoustic emission method]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988, 54 p.
10. Diey E.N., Dornfeld D.A. Model of acoustic emission generated by the tool destruction during cutting processing. *Trudi amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya*, 1988, no. 3, pp. 87–96.
11. Diey E.N., Dornfeld D.A. Tool wear assessment during face milling using the acoustic emission method. *Trudi amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya*, 1988, no. 3, pp. 97–108.
12. Emel E., Kannatey-Asibe E. Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of AE signals. *Trans. ASME. J. Eng. Ind.*, 1988, vol. 110, no. 2, pp. 137–145.
13. Lee M., Wildes D.G., Keramati B. Effect of tool geometry on acoustic intensity. *CIRP Ann*, 1988, vol. 37, no. 1, pp. 57–60.
14. Rastegaev I.A., Merson D.L., Rastegaeva I.I., Vinogradov A.Yu., Chugunov A.V. Comparative Spectral Analysis of Noise-Like Acoustic Signals During Monitoring and Diagnostics of Industrial Facilities. *Kontrol. Diagnostika*, 2012, no. 10, pp. 80–87.
15. Sidorov A.A. Approaches to the resolving of issues of prognosis in the system of on-line diagnostics of cutting tools. *Mekhatronika, robototekhnika, avtomatizatsiya*, 2006, no. 1, pp. 158–164.
16. Khripunov N.V. Practical methodology of materials machinability assessment using the acoustic emission. *Sbornik statey mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Aktualnye problemi tekhnicheskikh nauk"*. Ufa, 2014, pp. 101–103.
17. Khripunov N.V. Information system for materials machinability assessment. *Informatsionnye sistemi i tekhnologii: upravlenie i bezopasnost*. Tolyatti, PVGUS publ., 2012, pp. 295–305.
18. Blum T., Inasaki I. A Study of Acoustic Emission from Orthogonal Cutting Process. *ASME J. Eng. Ind.*, 1990, no. 112, pp. 203–211.

REFERENCES

1. Barzov A.A. *Emissionnaya tekhnologicheskaya diagnostika* [Emission technological assessment]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005, 384 p.
2. Vas'kin K.Ya., Khripunov N.V. Forecasting of metals workability of the acoustic emission indicators of cutting. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2014, no. 1, pp. 90–98.
3. Barzov A.A., Kulagin A.Yu., Shashurin V.D. Dependence of acoustic emission during cutting on the geometry of tool sharpening. *Metallorazhushchiy i kontrolniy instrument*, 1980, no. 2, pp. 71–73.
4. Suvorov A.A., Barzov A.A. Application of acoustic emission method to the study of materials cutting machinability. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie*, 1979, no. 3, pp. 150–153.

19. Liang S.Y., Dornfeld D.A. Detection of Cutting Tool Wear Using Time Series Modeling of Acoustic Emission Signals. *ASME J. Eng. Ind.*, 1989, no. 111, pp. 199–205.
20. Vdovin V.M., Surkova L.E., Valentinov V.A. *Teoriya system i sistemnyy analiz* [Theory of systems and system analysis]. Moscow, Dashkov i K publ., 2010, 640 p.

**PROCESS APPROACH TO THE ORGANIZATION OF INFORMATION SYSTEM
FOR MATERIALS MACHINABILITY ESTIMATION**

© 2015

K.Y. Vaskin, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Equipment and machinery production technologies»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

N.V. Khripunov, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Applied informatics in economics»
Volga Region State University of Service, Togliatti (Russia)

Keywords: information system; materials machinability; acoustic emission; digital signal processing; process modeling.

Abstract: System approach is widely used in modernization of business-processes, organizational structure, corporate documentation procedure and economical information systems. The application of methods of system analysis when introducing the results of engineering research is not covered sufficiently today, that is why the aspects of work related to the application of IDEF0 notation to the description of the system being worked out upon the results of scientific researches in the field of metal cutting is important now.

The work covers the application of methods of system analysis when assimilating the results of researches of assessment of metal cutting tool wear rate using the acoustic emission of cutting process. The authors used the analysis of processes in IDEF0 notation to describe the developed information system for material machinability estimation.

The authors developed the context diagram containing the external interactions of the analyzed system. The internal interactions of the analyzed system at the high decomposition level are displayed on the diagram of decomposition of the first level. The authors carried out the structuring of system functions and necessary for system functioning resources within the frames of input, output, supporting and regulating parameters of the processes. The article offers the methods of assessment of machinability based on the use of visual and numeric representations of the information and the application of modern technologies of semi-structured information processing.

The results of the research showed that the use of the process analysis according to the IDEF0 methodology is the effective tool allowing at the stage of the research results implementation to structure the information interactions within the frames of input, output, supporting and regulating parameters of the processes at different levels of the system detailing. The application of the system analysis methods to the description of the system for machinability assessment using the acoustic emission signal allowed identifying the basic requirements to the information system which specialization is possible within the frames of accepted methodology when moving to the lowest levels of decomposition in the system processes description.

Е.С. Глибин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»

А.А. Шевцов, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: энергосбережение; контактная сварка; полупроводниковый компенсатор; реактивная мощность; имитационное моделирование; *MATLAB Simulink*.

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению процесса моделирования статического полупроводникового компенсатора неактивных составляющих полной мощности, работающего в однофазной сети переменного тока на точечную контактную сварочную машину. Показана широкая распространенность контактной сварки на современном производстве. Указаны недостатки современных источников питания контактных сварочных машин с точки зрения их энергоэффективности. Сделан вывод о возможности снижения энергопотребления на 20–40 % при применении специальных устройств – полупроводниковых компенсаторов. Поскольку и контактная машина, и компенсатор работают при высоких токах и напряжениях, а стоимость их электрических компонентов достаточно велика, поставлена задача создания компьютерной имитационной модели системы «Промышленная сеть – полупроводниковый компенсатор – контактная сварочная машина». В качестве инструментария выбрана программа *Matlab Simulink*, поскольку она позволяет как моделировать электрические элементы, так и выполнять математические и логические операции, необходимые для описания алгоритма работы системы управления. Представлены все уровни имитационной модели: сеть, силовая часть компенсатора, система управления компенсатора, контактная сварочная машина. Подробно описан процесс выбора тех или иных блоков *Simulink* для реализации модели. Приведены математические выражения, лежащие в основе работы системы управления ключами компенсатора и в основе моделирования контактной машины. Проведено моделирование работы системы, представлены результаты в виде временных диаграмм токов и напряжений. Показано нарушение работы системы при неправильно выбранных номиналах электрических элементов компенсирующего устройства. Сделан вывод о возможности применения разработанной модели при исследовании различных режимов работы компенсатора, а также при выборе номиналов его компонентов.

Около трети общего объема сварных конструкций в мире осуществляется при помощи контактных сварочных машин, а в кузовостроении контактная сварка занимает лидирующее положение [1]. Наибольшее применение имеет точечная сварка – основной способ соединения внахлестку штампованных конструкций кузова [2; 3]. Современные контактные машины как электротехнологическое оборудование не всегда экономичны и являются неблагоприятными потребителями электрической энергии со следующими недостатками [4; 5]:

1. Потребление значительной реактивной мощности. Экспериментальные исследования показали, что коэффициент мощности контактных машин, как правило, не превышает 0,8 в случае сварки стали, применяемой в автомобилестроении, а часто и меньше 0,6. Таким образом, видится возможным снижение энергопотребления контактных машин на 20–40 % при тех же установленных мощностях.

2. Несинусоидальность кривой потребляемого тока неблагоприятно сказывается на работе силового электрооборудования, систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи, а также на качестве и объеме выпускаемой продукции.

3. Колебания сетевого напряжения и кратковременные его выбросы и провалы в процессе сварки.

Для повышения качества электроэнергии применяются специальные компенсирующие устройства, являющиеся источниками реактивной энергии емкостного характера [6].

Поскольку контактные машины и компенсирующие устройства работают на достаточно больших токах и напряжениях, а стоимость электрических элементов

их схем велика, эффективным является исследование режимов их работы с помощью математических и компьютерных моделей перед переходом на реальные испытания [7–9].

В качестве инструментария для создания такой модели хорошо подходит программа *Matlab Simulink*, поскольку она позволяет как моделировать электрические компоненты, так и выполнять арифметические и логические операции, необходимые для описания алгоритма работы системы управления [10].

Разработанная схема модели системы «Промышленная сеть – компенсатор – контактная сварочная машина» в программе *Matlab Simulink* многоуровневая [11]. Верхние уровни состоят из крупных функциональных блоков, таких как сварочная машина, нижние – отдельные элементы, например, транзисторы. Верхний уровень представлен на рисунке 1 и включает в себя три блока подсистем *Simulink*, соединенных параллельно: промышленную сеть (*Industrial Network*), статический полупроводниковый компенсатор неактивных составляющих полной мощности (*Static VAR Compensator*), однофазную контактную машину для точечной сварки (*Resistance Welding Machine*). Также на этом уровне находится обязательный блок настройки моделирования всех элементов силовой электроники *powergui*, и сюда же вынесен датчик тока нагрузки *Current Measurement*, поскольку он должен быть подключен последовательно с нагрузкой, а функционально относится к компенсатору (информация о величине тока нагрузки необходима только системе управления силовой частью компенсатора). Информация с датчика поступает на блок *Memory*, а затем передается в другую

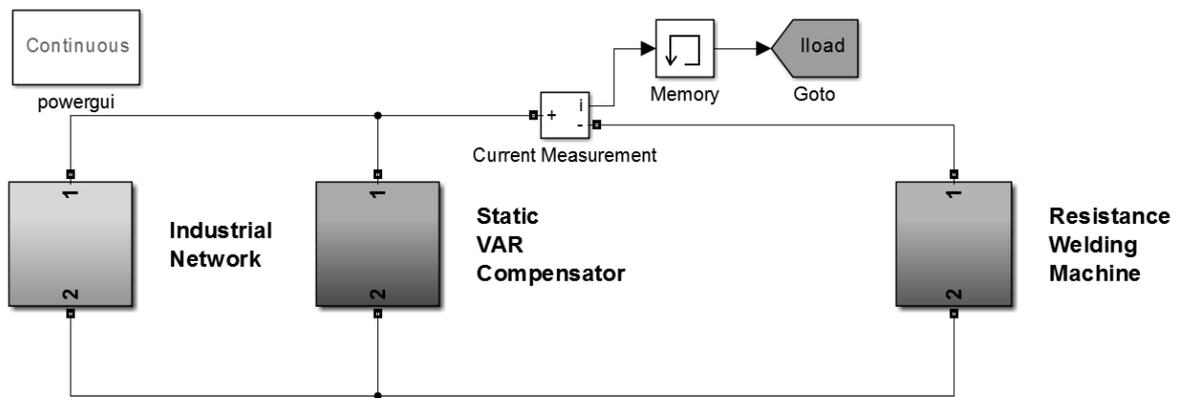


Рис. 1. Самый верхний уровень модели компенсатора

точку модели с помощью блока *Goto* без прямого соединения проводом. Блок *Memory* здесь и в других частях модели используется с целью разрыва алгебраических петель (*algebraic loop*). Поскольку идеальные элементы имитационной модели изменяют состояние выхода мгновенно при изменении входа, может возникнуть ситуация, когда состояния некоторого переключателя определяет условие своего же переключения. В отличие от идеальных моделей, в реальных устройствах всегда присутствует некоторая инерционность процессов. Решением может быть разделение во времени с помощью задержки на один шаг расчета с помощью блока *Memory* процесса измерения исходных параметров и их использования.

На рисунке 2 приведена схема подсистемы «Промышленная сеть». В простейшем случае источник энергии моделируется блоком источника синусоидального напряжения (*AC Voltage Source*). Однако в случае необходимости подсистема может быть расширена, например, включением активно-индуктивных элементов, моделирующих активные потери в токоведущих частях или колебания напряжения на узлах трансформаторной подстанции и т. д. При внесении изменений в подсистему «Промышленная сеть» в случае расширения модели остальные подсистемы могут оставаться неизменными. Здесь же присутствуют блоки осциллографов для

отображения сетевого напряжения и суммарного тока, потребляемого из сети компенсатором и нагрузкой.

На рисунке 3 показана силовая часть компенсатора. Силовая часть включает в себя четыре биполярных транзистора с изолированным затвором (*IGBT*) с обратными диодами (*IGBT/Diode1... IGBT/Diode4*), соединенных в мостовую схему, накопительный конденсатор *C* и катушку индуктивности *L* [12]. В этой же подсистеме расположены датчики тока компенсатора и напряжения сети, а также блок мультиметра и осциллографа для отображения токов и напряжений на всех электрических элементах силовой части. Вложенной подсистемой является система управления (*CONTROL SYSTEM*), задача которой – рассчитать по заданному алгоритму управляющие воздействия (*NEG* и *POS*) на ключи компенсатора, используя значения тока нагрузки *Iload*, тока компенсатора *Icomp*, напряжения сети *Unetw*. Подход, когда силовая часть устройства моделируется на уровне электрических компонентов, а система управления на уровне математических и логических операций, описывающих алгоритм ее работы, может быть применен для различных типов полупроводниковых преобразователей в целом, например, описанных в [13–15].

На рисунке 4 представлена схема системы управления компенсатором. Схема состоит из математических

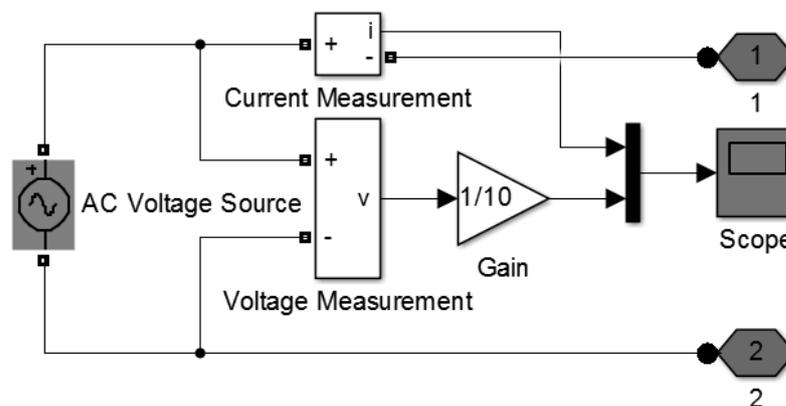


Рис. 2. Простейшая модель питающей сети

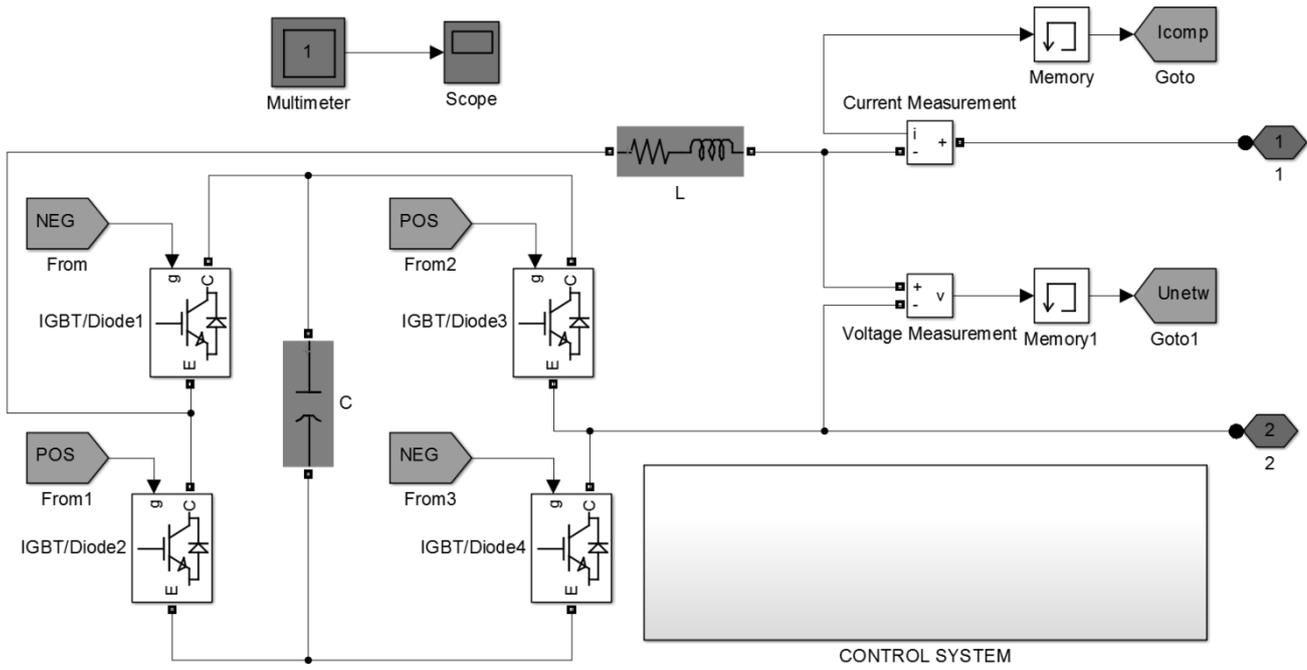


Рис. 3. Силовая часть компенсатора

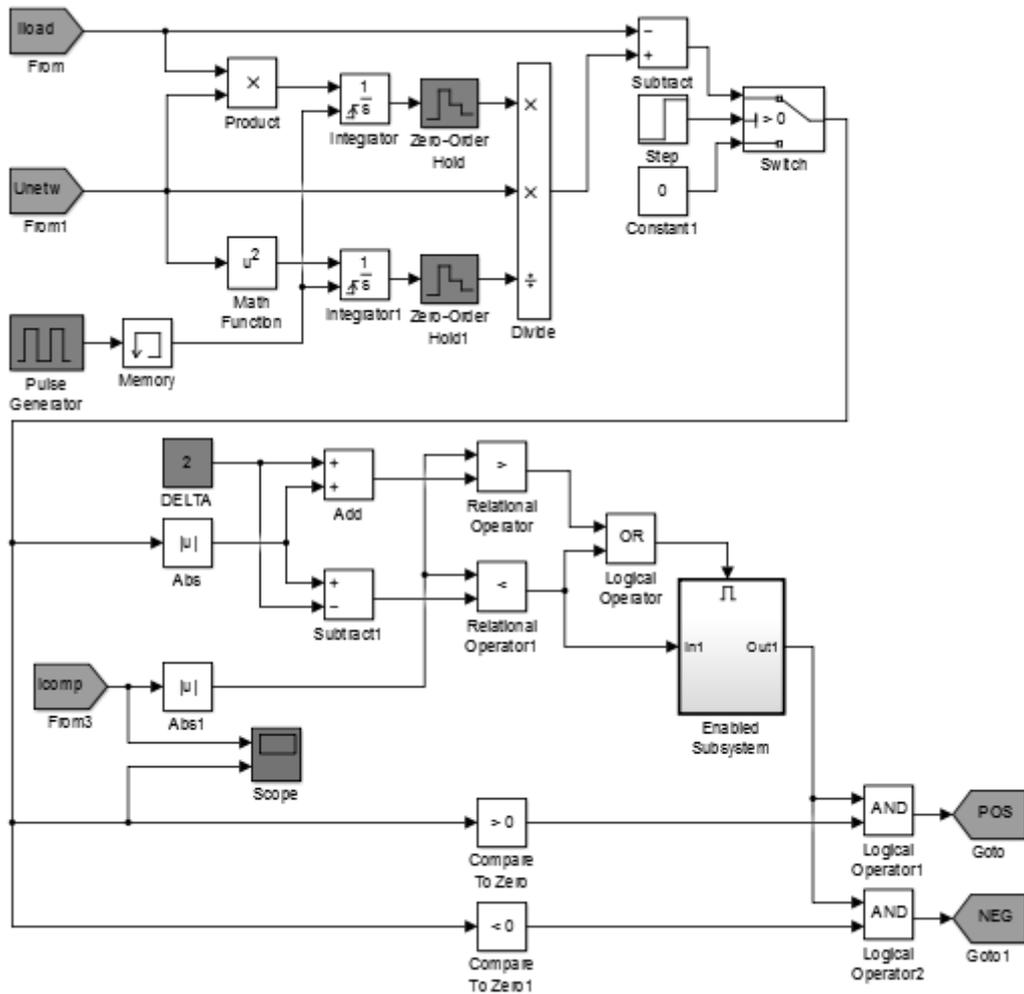


Рис. 4. Система управления компенсатором

и логических блоков, входные сигналы слева (I_{load} , U_{netw} , I_{comp}), выходные – справа (POS , NEG). Ее можно условно разделить на две части: первая до блока $Switch$ в верхнем правом углу и вторая – после [16]. В первой части происходит расчет мгновенных значений необходимого тока компенсатора, при генерации которого в сеть суммарный ток, потребляемый из сети компенсатором и нагрузкой, будет синусоидальным и синфазным сетевому напряжению.

Вычисление мгновенных значений компенсационного тока $i_c(t)$ происходит по формуле, представленной в [17; 18]:

$$i_c(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot u(t) - i(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – мгновенные значения сетевого напряжения (U_{netw});

$i(t)$ – мгновенные значения тока нагрузки (I_{load});

T – период сетевого напряжения.

Интегрирование реализовано соответствующими блоками $Integrator$ и $Integrator1$. Поскольку ток текущего периода вычисляется по значениям определенных интегралов предыдущего периода, применяются блоки удержания значений интегралов в течение следующего периода $Zero-Order Hold$.

Сначала результат интегрирования поступает на вход $Zero-Order Hold$, затем накопленная сумма в блоке интегрирования сбрасывается сигналом от генератора. Разделение этих двух процессов во времени обеспечивает блок $Memory$. Переключатель $Switch$ обеспечивает отсутствие неверных значений компенсационного тока в течение самого первого периода работы модели.

Во второй части происходит формирование управляющих воздействий на ключи гистерезисным способом. Суть гистерезисного способа заключается в следующем. Значения расчетной величины компенсационного тока сравниваются с реальными значениями, измеряемыми датчиком тока в силовой части компенсатора I_{comp} . В зависимости от соблюдения условия достижения реальной величиной некоторого значения, являющегося суммой расчетной величины и так называемой ширины зоны гистерезиса, происходит открытие или закрытие транзисторов силовой части. Ширина зоны гистерезиса – это разность между максимально возможным (допустимым) значением величины и ее эталонным значением.

Нижний порог открытия транзисторов равен расчетному току минус ширина зоны гистерезиса, верхний порог закрытия равен сумме расчетного тока и ширины зоны гистерезиса.

На рисунке 4 ширина зоны гистерезиса равна константе $DELTA=2$ А и определяет точность замены эталонной кривой некоторой приближенной, имеющей пульсирующий характер.

Импульсы POS используются для управления соответствующими транзисторами ($IGBT2$, $IGBT3$) при условно-положительном направлении протекания компенсационного тока, во время протекания тока в отрицательном на-

правлении импульсы POS отсутствуют, а управление осуществляется транзисторами $IGBT1$, $IGBT4$ и импульсами NEG . Формирование импульсов в модели системы управления осуществляется с помощью логических операций И, ИЛИ, НЕ и операторов сравнения.

Последний из основных блоков модели – контактная сварочная машина. Схема принципиальная показана на рисунке 5 а и включает в себя тиристорный контактор, представляющий собой встречно-параллельное соединение тиристорov $VS1$ и $VS2$, сварочный трансформатор и сопротивление вторичного контура. Реализовать такую схему было бы не сложно с помощью электрических элементов, если бы не изменяющееся во время сварки сопротивление межэлектродного промежутка [19]. Блока управляемого сопротивления просто не существует в $Simulink$. С другой стороны, известен подход, когда машину можно представить в виде последовательно включенного активного сопротивления r и катушки индуктивностью L , как показано на рисунке 5 б. В этом случае L – индуктивность катушки в схеме замещения, которая включает в себя индуктивность вторичного контура и приведенную к вторичной цепи индуктивность первичной обмотки сварочного трансформатора, r – активное сопротивление в схеме замещения, включает сопротивление вторичного контура, сопротивление участка электрод – электрод и приведенное к вторичной цепи сопротивление первичной обмотки трансформатора.

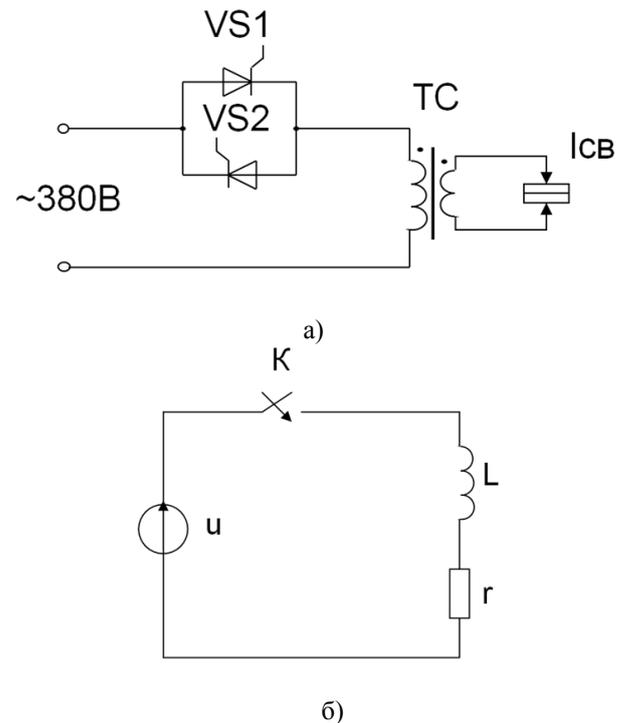


Рис. 5. Схемы машины:

а – принципиальная, б – эквивалентная

Уравнение электрического состояния при замыкании ключа K (контактора):

$$L \frac{di}{dt} + ri = u(t). \quad (2)$$

Предполагая, что активное сопротивление вторичного контура машины не меняется во время сварки, а сварочное сопротивление, напротив, является функцией времени, получим:

$$i' + \frac{R_K + R_{CB}(t)}{L} \cdot i = \frac{u(t)}{L}. \quad (3)$$

Обозначив $\frac{R_K + R_{CB}(t)}{L} = p(t)$, а $\frac{u(t)}{L} = q(t)$, получим классическое линейное неоднородное уравнение первого порядка [20]:

$$i' + p(t) \cdot i = q(t). \quad (4)$$

Общее решение может быть записано в виде:

$$i = e^{-\int p(t)dt} \left(C + \int q(t)e^{\int p(t)dt} dt \right). \quad (5)$$

Для построения имитационной модели машины запишем решение задачи Коши, исходя из начальных условий $C = i(0) = i_0$ (i_0 – начальный ток машины):

$$i = e^{-\int_0^T p(t)dt} \left(i_0 + \int_0^T q(t)e^{\int_0^t p(t)dt} dt \right). \quad (6)$$

Схема подсистемы нагрузки показана на рисунке 6 и представляет собой управляемый источник тока, мгновенные значения которого рассчитываются по уравнению (6) с помощью подсистемы, показанной на рисунке 7. Формирование токовых пауз при закрытом состоянии обоих тиристоров контактора осуществляется переключателем *Switch* (рис. 7).

На рисунках 8 и 9 приведены результаты моделирования в виде временных диаграмм. Параметры нагрузки: угол включения тиристоров 90°, коэффициент трансформации 102 (рис. 6, 7). В первый период компенсатор не работает, потребляемый из сети ток достигает 130 А, во второй период компенсатор функционирует верно, ток сети уже не превышает 50 А и является почти чисто активным. Максимальная частота переключения тиристоров в этом режиме не превышает 20 кГц. Емкость накопительного конденсатора составляет 500 мкФ. Индуктивность токоограничивающего дросселя компенсатора равна 3 мГн.

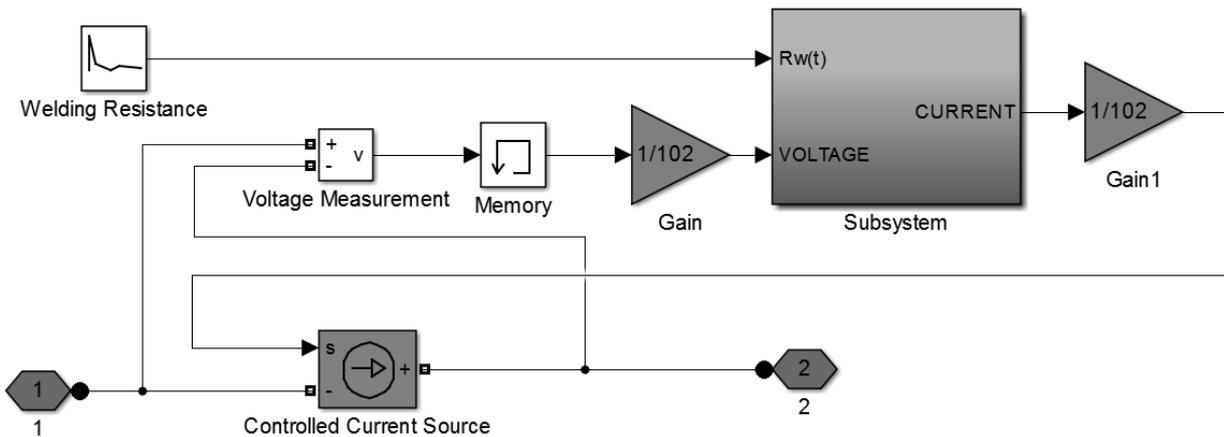


Рис. 6. Модель контактной машины

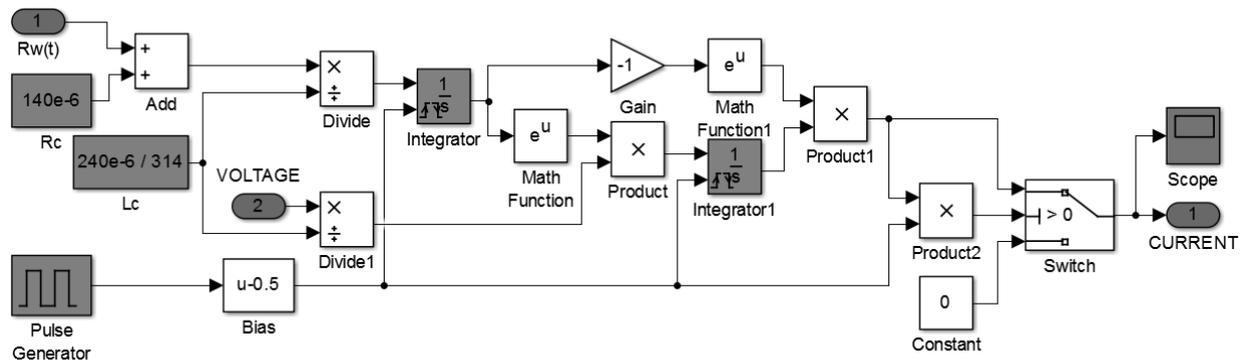


Рис. 7. Расчет тока контактной машины

Временные диаграммы этой же модели, но с индуктивностью токоограничивающего дросселя 10 мГн показаны на рисунке 10.

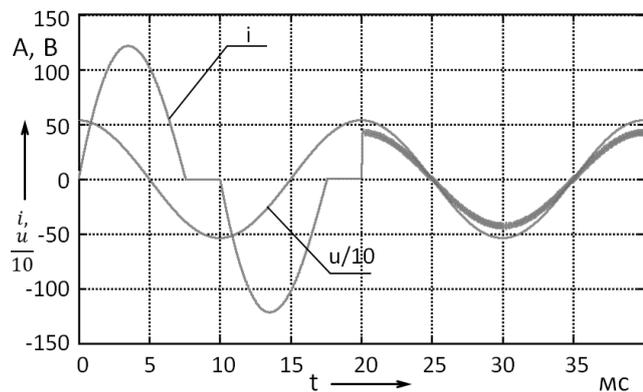


Рис. 8. Временные диаграммы потребляемого из сети тока и сетевого напряжения

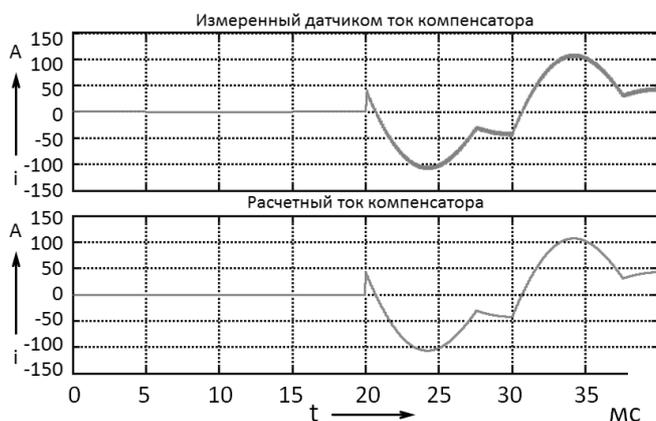


Рис. 9. Временные диаграммы токов компенсатора

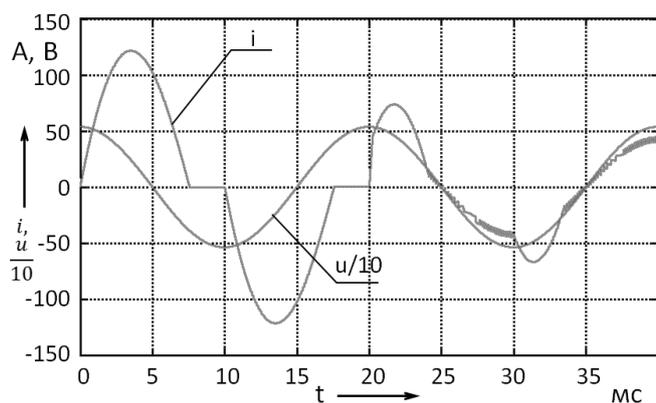


Рис. 10. Временные диаграммы искаженного потребляемого из сети тока и сетевого напряжения при неправильно выбранных номиналах элементов компенсатора

Таким образом, разработанная имитационная модель позволяет исследовать работу полупроводникового компенсатора в различных режимах работы нагрузки –

контактной сварочной машины, том числе в аварийных режимах [21], при различных вариантах материалов и толщин свариваемых деталей, углах включения.

Кроме этого, модель позволяет произвести выбор номиналов элементов силовой части компенсатора: индуктивности дросселя, емкости накопительного конденсатора, так как они определяются формой и величиной компенсационного тока для конкретной нагрузки. При слишком большой индуктивности скорость изменения компенсационного тока будет низкой и форма компенсационного тока будет искажена (рис. 10). С другой стороны, при слишком низкой индуктивности увеличится частота переключения транзисторов, возможно и выше физически возможного предела для IGBT. С помощью имитационной модели можно провести оптимальный выбор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машиностроение. Т. IV-6. Оборудование для сварки / В.К. Лебедев [и др.]. М.: Машиностроение, 1999. 496 с.
2. Банов М.Д. Технология и оборудование контактной сварки. М.: Академия, 2005. 224 с.
3. Климов А.С. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки. Тольятти: ТГУ, 2004. 170 с.
4. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 128 с.
5. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышения качества электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
6. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоиздат, 1981. 200 с.
7. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний // Наука – производству. 2004. № 4. С. 46–47.
8. Глибин Е.С., Шевцов А.А. Ценовые аспекты выбора компенсатора неактивных составляющих мощности при работе с контактными сварочными машинами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2009. № 2. С. 152–158.
9. Певчев В.П. Использование программы MICRO CAP при моделировании процесса срабатывания импульсных электромеханических устройств // Электротехника. 2010. № 4. С. 55–59.
10. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. М.: Горячая Линия-Телеком, 2009. 816 с.
11. Дэбни Дж., Харман Т. Simulink 4. Секреты мастерства. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
12. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
13. Шевцов А.А., Глибин Е.С. Источник питания контактной сварочной машины : патент на изобретение RUS 2421311 08.04.2009.
14. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Вибрационный источник крутильных колебаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 56–59.

15. Ивашин В.В., Медведев В.А., Позднов М.В. Резонансный вибратор : патент на изобретение RUS 2177840 10.12.1999.
16. Дьяконов В.П. Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Основы применения. М.: Солон-Пресс, 2008. 800 с.
17. Агунов М.В., Шевцов А.А. Способ динамической компенсации неактивных составляющих мощности : патент РФ 2103779, 27.01.1998.
18. Агунов М.В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. Кишинев: МолдНИИТЭИ, 1997. 84 с.
19. Glibin E.S., Shevtsov A.A. Modelling the functioning of compensation systems in resistance welding equipment // *Welding International*. 2010. Vol. 24. № 12. С. 969–972.
20. Егоров А.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения с приложениями. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 384 с.
21. Шевцов А.А., Глибин Е.С. Исследование аварийных режимов работы полупроводникового компенсатора // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 1. С. 55–61.
22. **REFERENCES**
1. Lebedev V.K. et al. *Mashinostroenie. Tom IV-6. Oborudovanie dlya svarki* [Mechanical engineering. Vol. IV-6. Welding equipment]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1999, 496 p.
2. Banov M.D. *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktной svarki* [Technologies and equipment for contact welding]. Moscow, Akademiya publ., 2005, 224 p.
3. Klimov A.S. *Osnovi tekhnologii i postroyeniya oborudovaniya dlya kontaktной svarki* [Principles of technology and development of equipment for contact welding]. Tolyatti, TGU publ., 2004, 170 p.
4. Zhezhenko I.V. *Pokazateli kachestva elektroenergii na promishlennikh predpriyatiyakh* [Quality indicators of electric power at the industrial enterprises]. Moscow, Energiya publ., 1977, 128 p.
5. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti i povisheniya kachestva elektroenergii* [Reactive power compensation and electric power quality improvement]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1985, 224 p.
6. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v slozhnikh elektricheskikh sistemakh* [Reactive power compensation in complex electrical systems]. Moscow, Energoizdat publ., 1981, 200 p.
7. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Electromagnetic vibrator with controlled vibration frequency. Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 46–47.
8. Glibin E.S., Shevtsov A.A. The Price-Based Aspects of Non-Active Power Compensator Selection for Contact Welding. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 2, pp. 152–158.
9. Pevchev V.P. Application of MICRO CAP software when simulating the process of actuation of impulse electro-mechanical. *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 55–59.
10. Dyakonov V.P., Penkov A.A. *MATLAB i Simulink v elektroenergetike* [MATLAB and Simulink in power industry]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom publ., 2009, 816 p.
11. Debn Dzh., Kharman T. *Simulink 4. Sekrety masterstva* [Simulink 4. Secrets of skill]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy publ., 2003, 403 p.
12. German-Galkin S.G. *Kompyuternoe modelirovanie poluprovodnikovikh sistem v MATLAB 6.0* [Computer simulation of semiconducting system in MATLAB 6.0]. S. Peterburg, Korona print publ., 2001, 320 p.
13. Shevtsov A.A., Glibin E.S. *Istochnik pitaniya kontaktной svarochnoy mashiny* [Power supply of contact welding machine]. Patent RF, no. 2421311, 2009. (In Russian).
14. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. Vibrating source of rotary fluctuations. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 56–59.
15. Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pozdnov M.V. *Rezonansniy vibrator* [Resonance vibrator]. Patent RF no. 2177840, 1999. (In Russian).
16. Dyakonov V.P. *Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Osnovi primeneniya* [Matlab R2006/2007/2008. Simulink 5/6/7. Principles of use]. Moscow, Solon-Press publ., 2008, 800 p.
17. Agunov M.V., Shevtsov A.A. *Sposob dinamicheskoy kompensatsii neaktivnikh sostavlyayushchikh moshchnosti* [Method of dynamic compensation of inactive power components]. Patent RF no. 2103779, 1998. (In Russian).
18. Agunov M.V. *Energeticheskie protsessi v elektricheskikh tsepyakh s nesinusoidalnimi rezhimami i ikh effektivnost* [Energy processes in electrical circuits with nonsinusoidal modes and their efficiency]. Kishinev, MoldNIITEI publ., 1997, 84 p.
19. Glibin E.S., Shevtsov A.A. Modelling the functioning of compensation systems in resistance welding equipment. *Welding International*, 2010, vol. 24, no. 12, pp. 969–972.
20. Egorov A.I. *Obiknovennye differentsirovannye uravneniya s prilozheniyami* [Ordinary Differential Equations with Applications]. 2nd ed. Moscow, FIZMATLIT publ., 2005, 384 p.
21. Shevtsov A.A., Glibin E.S. The research of emergency modes of the semiconducting compensator. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 1, pp. 55–61.

THE DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL OF THE «ELECTRIC NETWORK – SEMICONDUCTING COMPENSATOR - RESISTANCE WELDING MACHINE» SYSTEM

© 2015

E.S. Glibin, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Industrial Electronics»
A.A. Shevtsov, candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department «Industrial Electronics»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: energy saving; resistance welding; semiconducting compensator; reactive power; simulation; *MATLAB Simulink*.

Abstract: The article covers the issue of simulation of a static semiconducting compensator of the total power inactive components operating in AC power single-phase network for a spot resistance welding machine. The authors showed the wide use of resistance welding in modern production. The disadvantages of modern power supplies of resistance welding machines are defined according to their energy efficiency. The authors made a conclusion that it is possible to reduce energy consumption by 20-40 % using special devices - semiconducting compensators. Since both the resistance machine and compensator operate at high currents and voltages, and the cost of their electrical components is large enough, the task of creating a computer simulation model of the "Industrial network - Semiconducting compensator - Resistance welding machine" system was set. As a tool, the *Matlab Simulink* software was selected, because it allows you both to simulate the electrical elements and perform mathematical and logical operations necessary to describe the algorithm of control system work. The article represents all simulation model parts: the network, the compensator power circuit, the compensator control system, the resistance welding machine. The authors described in detail the process of selection of a particular *Simulink* block for the model implementation and introduced mathematical expressions forming the basis for the work of compensator key management system and the basis for the resistance machine simulation. The authors carried out the simulation of the system work and presented the results in the form of timing diagrams of currents and voltages. System operating troubles are displayed when the nominal values of electrical elements of the compensating device are selected improperly. The authors made the conclusion on the possibility of applying the developed model for the study of various modes of the compensator operation, as well as for selection of nominal values of its components.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ РАЗРЕШЕНИЯ ПРОТИВОРЕЧИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

© 2015

А.В. Гордеев, кандидат технических наук, доцент

Д.Л. Бородинкина, магистрант

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: разрешение противоречия; разделение объекта; техническое творчество; технология машиностроения; учебный процесс; физическое поле; эмпирический прием; таблица Альтшуллера.

Аннотация: Известный подход к решению технических задач путем разрешения противоречий за счет применения эмпирических приемов достаточно громоздок, что затрудняет его освоение в рамках учебного процесса. Целью работы является разработка такой системы эмпирических приемов, которая бы позволяла изучать ее в рамках образовательной программы подготовки инженера без существенного снижения ее эффективности. В рамках реализации этой цели проанализированы известные системы эмпирических приемов решения технических задач применительно к области техники «Технология машиностроения» и сделана попытка сократить число приемов без потери их эффективности за счет их специализации, а также за счет объединения известных приемов. Предлагаемый подход позволяет освоить метод эмпирических приемов в рамках учебного процесса.

В результате сформирован перечень эмпирических приемов и подприемов решения технических задач в области технологии машиностроения, включающий 10 приемов: разделение – объединение (разделение объекта, разделение функций, оптимизация, матрешка), упругость (упругий элемент, надувной элемент), наоборот (противоположное положение, противоположное действие, предварительное действие, асимметрия), криволинейность (криволинейный элемент, вращение, качение), динамичность (подвижность, адаптивность, прерывистость), аналогия (копия объекта, технический аналог, природный аналог), вред в пользу (использование, усиление, сложение, дешевая недолговечность, отходы), состояние (агрегатное состояние, консистенция, пористость, неоднородность), посредник (видоизмененный объект, третий объект), физические поля (поле, сочетание полей, физические эффекты).

Приведены примеры применения эмпирических приемов и подприемов при решении задач технологии машиностроения.

Предлагаемая система эмпирических приемов позволяет изучить их на занятиях по техническому творчеству в рамках отведенного учебным планом времени и применять как при решении учебных задач дисциплины «Технология машиностроения», курсовом и дипломном проектировании, так и в дальнейшей инженерной практике.

Цель статьи – обеспечить студентов методикой решения технических задач с помощью эмпирических приемов, приемлемой для изучения в рамках образовательной программы подготовки инженера.

Отечественными и зарубежными исследователями технического творчества предложено достаточно большое число перечней приемов решения технических задач, насчитывающих от нескольких десятков до нескольких сотен приемов [1–9]. Основоположник теории решения изобретательских задач Г.С. Альтшуллер [3; 4] установил, что, несмотря на то что изобретательских задач может быть бесчисленное множество, содержащиеся в них технические противоречия довольно часто повторяются. А раз существуют типичные противоречия, то должны существовать и типичные приемы их устранения. Проанализировав 40 тысяч патентных описаний, Альтшуллер выделил 40 таких приемов. Причем каждый прием может содержать несколько подприемов, отражающих применение приема к каким-то более конкретным условиям. Предложенные Альтшуллером приемы нашли широкое применение в изобретательской практике [10–16]. Приемы и подприемы по Альтшуллеру приведены в левой колонке таблицы 1. При этом с целью компактности некоторые формулировки приемов скорректированы, а формулировки подприемов опущены.

К недостаткам указанного метода эмпирических приемов следует отнести его громоздкость и связанную с этим трудность изучения. 40 приемов и около 90 подприемов (а в более поздних модификациях еще больше), конечно, не только невозможно запомнить, но и

просто не успеть рассмотреть и тем более опробовать в отведенное учебным планом время. Для решения этой проблемы число приемов и подприемов необходимо сократить, но так, чтобы не утратить эффективность метода.

Примем следующие ограничения:

1. Поскольку каждый изобретатель работает в какой-то конкретной области техники, в перечень приемов включать только приемы, относящиеся к данной области, а именно применимые к задачам технологии машиностроения.

2. Поскольку таблица Альтшуллера содержит несколько парных приемов (прием – контрприем), объединим каждую такую пару в один прием.

3. Поскольку некоторые приемы и подприемы достаточно близкие, их также можно объединить.

Так, из перечня приемов можно исключить приемы 2 (Вынесение), 8 (Антивес), 12 (Эквипотенциальность), 16 (Частичное или избыточное действие), 21 (Проскок), 34 (Отброс и регенерация), 38 (Окислители), 39 (Инертная среда) – всего 8 приемов. Из некоторых приемов можно убрать подприемы: из приема 10 (Предварительное действие) подприем 2 (предварительная расстановка оборудования), из приема 17 (Переход в другое измерение) подприемы 3 (многоэтажная компоновка) и 4 (использование оптических потоков), из приема 25 (Самообслуживание) подприем 1 (самообслуживание объекта), из приема 26 (Копирование) подприем 2 (инфракрасные и ультрафиолетовые потоки), из приема 32 (Изменение окраски) подприем 1 (изменение окраски или прозрачности).

Таблица 1. Соответствие предлагаемых эмпирических приемов приемам Г.С. Альтшуллера

<i>Приемы по Альтшуллеру</i>	<i>Альтернативные приемы</i>
1. Принцип дробления	Р1 «Разделение объекта»
2. Принцип вынесения	<i>Исключен</i>
3. Принцип местного качества	Р2 «Разделение функций»; Р3 «Оптимизация»; С4 «Неоднородность»
4. Принцип асимметрии	Н4 «Асимметрия»
5. Принцип объединения	Р1 «Разделение объекта»; Р2 «Разделение функций»
6. Принцип универсальности	Р2 «Разделение функций»
7. Принцип «матрешки»	Р4 «Матрешка»
8. Принцип антивеса	<i>Исключен</i>
9. Принцип предварительного антидействия	Н3 «Предварительное действие»
10. Принцип предварительного действия	Н3 «Предварительное действие»
11. Принцип «подложенной подушки»	Н3 «Предварительное действие»
12. Принцип эквипотенциальности	<i>Исключен</i>
13. Принцип «наоборот»	Н1 «Противоположное положение»; Н2 «Противоположное действие»
14. Принцип сфероидальности	К1 «Криволинейный элемент»; К2 «Вращение»; К3 «Качение»
15. Принцип динамичности	Р3 «Оптимизация»; Д1 «Подвижность»
16. Принцип частичного или избыточного действия	<i>Исключен</i>
17. Принцип перехода в другое измерение	Д1 «Подвижность»; Н1 «Противоположное положение»
18. Использование механических колебаний	Д3 «Прерывистость»
19. Принцип периодического действия	Д3 «Прерывистость»
20. Принцип непрерывности полезного действия	Д3 «Прерывистость»
21. Принцип проскока	<i>Исключен</i>
22. Принцип «обратить вред в пользу»	В1 «Использование»; В2 «Усиление»; В3 «Сложение»
23. Принцип обратной связи	Д2 «Адаптивность»
24. Принцип «посредника»	П1 «Видоизмененный объект»; П2 «Третий объект»
25. Принцип самообслуживания	В5 «Отходы»
26. Принцип копирования	А1 «Копия объекта»; А2 «Технический аналог»; А3 «Природный аналог»
27. Дешевая долговечность	В4 «Дешевая долговечность»
28. Замена механической схемы	Ф1 «Поле»; Ф2 «Сочетание полей»; Д1 «Подвижность»
29. Использование пневмо- и гидроконструкций	У2 «Надувной элемент»
30. Использование гибких оболочек и тонких пленок	У2 «Надувной элемент»
31. Применение пористых материалов	С3 «Пористость»
32. Принцип изменения окраски	Ф1 «Поле»
33. Принцип однородности	С4 «Неоднородность»
34. Принцип отброса и регенерация частей	<i>Исключен</i>
35. Изменение агрегатного состояния объекта	С1 «Агрегатное состояние»; С2 «Консистенция»; У1 «Упругий элемент»
36. Применение фазовых переходов	С1 «Агрегатное состояние»
37. Применение теплового расширения	Ф3 «Физэффекты»
38. Применение сильных окислителей	<i>Исключен</i>
39. Применение инертной среды	<i>Исключен</i>
40. Применение композиционных материалов	С4 «Неоднородность»

Можно объединить приемы 1 (Дробление), 5 (Объединение) и 6 (Универсальность) в прием «Разделение – объединение»; приемы 9 (Предварительное антидействие), 10 (Предварительное действие), 11 (Подложенная подушка) в подприем «Предварительное действие» приема «Наоборот»; приемы 18 (Механические колебания), 19 (Периодичность действия), 20 (Непрерывность) в подприем «Прерывистость» приема «Динамичность»; приемы 28 (Замена механической системы) и 37 (Тепловое расширение) в прием «Физические поля»; приемы 29 (Пневмо- и гидроконструкции) и 30 (Гибкие оболочки) в подприем «Надувной элемент» приема «Упругость»; приемы 35 (Агрегатное состояние) и 36 (Фазовые переходы) в прием «Состояние».

В результате мы получаем систему из 10 приемов, которым присвоены краткие названия, выражающие их сущность: 1) Разделение – объединение (Р); 2) Упругость (У); 3) Наоборот (Н); 4) Криволинейность (К); 5) Динамичность (Д); 6) Аналогия (А); 7) Вред в пользу (В); 8) Состояние (С); 9) Посредник (П); 10) Физические поля (Ф) [17; 18]. Данные приемы включают 32 подприема. Шифр каждого приема состоит из начальной буквы его названия. В шифре подприема к шифру приема добавлен номер подприема в приеме. Введен также знак *, означающий инверсию приема (противоположное действие).

Ниже для каждого подприема приведен пример применения (курсив).

1. Прием «**Разделение – объединение**» (Р). Подприем Р1 «Разделение объекта*»: разделить объект на составные части с одинаковыми или различными функциями (объединить несколько объектов в один объект). Пример: *для попадания охлаждающей жидкости в зону шлифования через воздушную подушку вокруг шлифовального круга струю делают на две: тонкая струя под большим давлением обеспечивает разрыв воздушной подушки, а основная струя без давления подается непосредственно в зону обработки.* Р2 «Разделение функций*»: разделить действие на составные операции (объединить операции). *При недостаточной мощности сверлильного станка сначала сверлят отверстие малого диаметра, а затем рассверливают его.* Р3 «Оптимизация»: разделить объект (действие) на части так, чтобы каждая часть находилась в оптимальных условиях. *Для снижения силы резания и уменьшения шероховатости обработанной поверхности режущая кромка содержит два участка – с малым углом в плане у вершины и с большим углом на остальной части.* Р4 «Матрешка»: разместить объект внутри другого объекта, пропустить сквозь полость другого объекта. *Шпиндель токарно-винторезного станка делают полым для пропускания через него прутковой заготовки.*

2. «**Упругость**» (У). У1 «Упругий элемент»: использовать упругие свойства элемента, заменить жесткий элемент упругим, ввести дополнительно упругий элемент. *Вулканитовая связка придает отрезному шлифовальному кругу податливость, предохраняя от поломки при перекосе.* У2 «Надувной элемент»: использовать элементы газообразные и жидкие, надувные и гидронаполняемые, аэростатические и гидростатические. *Для шлифования деталей сложного профиля применяют надувные круги в виде баллона из синтетической ткани, покрытого абразивной смесью.*

3. «**Наоборот**» (Н). Н1 «Противоположное положение»: повернуть объект, положить на бок, использовать его обратную сторону. *Для обеспечения доступа смазывающе-охлаждающей жидкости к режущей кромке резец переворачивают вверх ногами.* Н2 «Противоположное действие»: заменить действие на противоположное; сделать движущийся объект неподвижным, а неподвижный – движущимся; изменить направление движения. *Для очистки шлифовального круга от налипшей стружки ему сообщают обратное вращение.* Н3 «Предварительное действие*»: выполнить действие или его часть до начала работы (после работы), перед самой работой (сразу после работы). *Для обеспечения оптимальной температуры подогрева заготовки плазменной дугой при обработке резанием сопло плазматрона размещено на суппорте станка непосредственно перед резцом.* Н4 «Асимметрия»: заменить симметричную форму объекта на асимметричную*. *Для облегчения сверления твердых материалов режущие кромки делают несимметричными.*

4. «**Криволинейность**» (К). К1 «Криволинейный элемент»: заменить прямолинейные элементы объекта криволинейными*, заменить равномерную кривизну неравномерной*. *Для сохранения профиля зубьев червячной фрезы при переточке их затылование выполнено по архимедовой спирали.* К2 «Вращение»: заменить поступательное движение вращательным, использовать центробежную силу. *Замена строгания фрезерованием позволяет повысить скорость резания и избежать холостых ходов.* К3 «Качение»: заменить скольжение качением, применить шарики или ролики. *Для облегчения подачи листов трансформаторной стали из пакета под вырубной пресс между листами помещают стальную оробь.*

5. «**Динамичность**» (Д). Д1 «Подвижность»: сообщить движение неподвижному объекту или его части, увеличить число степеней свободы. *Для снижения температуры резания круглой режущей пластине сообщают дополнительное движение вращения.* Д2 «Адаптивность»: в процессе работы изменять характеристики объекта, приближая их к оптимальным в каждый данный момент. *При точении длинного вала величину подачи изменяют в зависимости от прогиба вала (в зависимости от силы резания).* Д3 «Прерывистость»: заменить непрерывное действие прерывистым*, изменить соотношение импульсов и пауз, использовать паузы для другого действия. *Для снижения температуры при шлифовании на рабочей поверхности шлифовального круга выполнены пазы.*

6. «**Аналогия**» (А). А1 «Копия объекта»: использовать вместо объекта его копию. *Для обеспечения точности обработки фасонной поверхности увеличенное изображение профиля поверхности и ее чертежа совмещают на экране видеоприбора станка.* А2 «Технический аналог»: использовать аналог объекта (действия) из данной или другой области техники. *Для уменьшения силы резания при круглом протягивании протяжка выполнена по типу шлицевой, а операцию выполняют в два хода с поворотом протяжки.* А3 «Природный аналог»: использовать природный аналог объекта (действия). *Для обеспечения самозатачивания резца режущий клин выполнен составным, подобно зубу хищников, из двух частей – твердой и мягкой.*

7. «Вред в пользу» (В). В1 «Использование»: использовать вредное свойство для получения положительного эффекта. Для снижения силы резания при обработке высокопрочных сплавов заготовку подогревают. В2 «Усиление»: усилить вредный фактор до такой степени, чтобы он перестал быть вредным. При обработке стали Гатфильда заготовку разогревают до 650 °С, при которой сталь теряет свойство самонаклепа. В3 «Сложение»: устранить вредное свойство путем сложения с другим вредным свойством. В4 «Дешевая недолговечность»: заменить набором дешевых объектов худшего качества. Для увеличения производительности и повышения качества резьбового соединения применяют разовые метчики – саморезы. В5 «Отходы»: использовать отходы вещества или энергии. Для подогрева заготовок из труднообрабатываемого материала перед обработкой резанием используют технологическое тепло отливки или поковки.

8. «Состояние» (С). С1 «Агрегатное состояние»: изменить агрегатное состояние вещества, использовать фазовые переходы. Для снятия заусенцев пластмассовых деталей в галтовочном барабане в качестве галтовочных тел используют гранулы из сухого льда. С2 «Консистенция»: изменить концентрацию или консистенцию вещества, применить пасту, порошок, пену, гель. Для защиты от шума при очистке отливок методом электрогидравлического удара ванну с водой покрывают пеной. С3 «Пористость»: заменить сплошное вещество пористым, изменить объем пор, заполнить поры другим веществом. Для улучшения условий стружкообразования при шлифовании в состав круга при формовке добавляют гранулы порообразующего вещества, которое при обжиге выгорает, образуя поры. С4 «Неоднородность»: перейти от однородной структуры объекта к неоднородной*, от однородных материалов к композиционным. Армирование шлифовального круга металлической или полимерной сеткой позволяет повысить скорость шлифования до 130 м/с.

9. «Посредник» (П). П1 «Видоизмененный объект»: ввести между двумя объектами видоизменение одного из них. П2 «Третий объект»: ввести между двумя объектами третий объект. Для равномерной подачи смазки в валки при прокатке стали подают промасленную бумагу из рулона.

10. «Физические поля» (Ф). Ф1 «Поле»: заменить механическое поле (действие) акустическим, тепловым, химическим, электрическим, магнитным*. Для уменьшения силы резания в зону обработки вводят поверхностно-активное вещество. Ф2 «Сочетание полей»: применить сочетание полей Ф1. Введение электрического тока в зону алмазного шлифования (механическое и электрическое поля) повышает производительность в 2...2,5 раза. Ф3 «Физэффекты»: использовать физические эффекты действия полей (тепловое расширение, закон Архимеда, закон Паскаля, точка Кюри и т. п.). Для беззазорного крепления тонкостенного цилиндра на оправке при шлифовании она изготовлена из магнитострикционного материала.

Предлагаемая система эмпирических приемов позволяет изучить их на занятиях по техническому творчеству в рамках отведенного учебным планом времени и наряду с другими методами разрешения противоречий в технических задачах применять как при решении учебных задач дисциплины «Технология машинострое-

ния», курсовом и дипломном проектировании, так и в дальнейшей инженерной практике [19–22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. М.: Московский рабочий, 1973. 296 с.
2. Методы поиска новых технических решений / под ред. А.И. Половинкина. Йошкар Ола: Марийское кн. изд-во, 1976. 192 с.
3. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. М.: Советское радио, 1979. 176 с.
4. Альтшуллер Г.С., Селюцкий А.Б. Крылья для Икара. Как решать изобретательские задачи. Петрозаводск: Карелия, 1980. 224 с.
5. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.
6. Альтшуллер Г.С., Злотин Б.Л., Зусман А.В. Поиск новых идей. От озарения к технологии. Кишинёв: Картя Молдавенияска, 1989. 382 с.
7. Пигаров Г.С., Таран Ю.Н., Бельгольский Б.П. Интенсификация инженерного творчества. М.: Профиздат, 1989. 192 с.
8. Саламатов Ю.П. Как стать изобретателем. М.: Просвещение, 1990. 240 с.
9. Амиров Ю.Д. Основы конструирования. М.: Изд-во Стандартов, 1991. 392 с.
10. Степанов Ю.С., Щукин А.Е. Методы поискового конструирования технологической оснастки. Орел: Орловский филиал Московского института приборостроения, 1993. 146 с.
11. Яновский Б.Г., Гордеев А.В. Учить творчеству // Школа и производство. 1999. № 3. С. 22–32.
12. Лихолетов В.В. Технология творчества: теоретические основы моделирования. Челябинск: ЮУрГУ, 2001. 288 с.
13. Гордеев А.В. Применение эвристических приёмов в техническом творчестве // Школа и производство. 2002. № 2. С. 12–18.
14. Джонс Дж.К. Методы проектирования. М.: Мир, 1986. 326 с.
15. Пигаров Г.С. Креатология и интеллектуальные технологии инновационного развития. Днепропетровск: Пороги, 2003. 502 с.
16. Войтов А.Г. Самоучитель мышления. М.: Дашков и К, 2005. 408 с.
17. Гордеев А.В. Обучение методологии технического творчества – путь подготовки современного специалиста // Известия Тульского государственного университета. Серия: Машиноведение. 2005. № 2. С. 262–266.
18. Гордеев А.В. Основы технического творчества. Тольятти: ТГУ, 2008. 216 с.
19. Гордеев А.В. Усиление творческой составляющей подготовки инженера // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2009. № 3. С. 71–80.
20. Казаков Ю.В. Методы решения изобретательских задач. Тольятти: ТГУ, 2010. 161 с.
21. Альтов Г. И тут появился изобретатель. М.: Детская литература, 2000. 126 с.
22. Диксон Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений. М.: Мир, 1969. 440 с.

REFERENCES

1. Altshuller G.S. *Algoritm izobreteniya* [Algorithm of invention]. Moscow, Moskovskiy rabochiy publ., 1973, 296 p.
2. Polovinkina A.I., ed. *Metody poiska novykh tekhnicheskikh resheniy* [Methods of finding new technical solutions]. Ioshkar Ola, Mariyskoe knizhnoe izdatelstvo publ., 1976, 192 p.
3. Altshuller G.S. *Tvorchestvo kak tochnaya nauka* [Creativity as the exact science]. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1979, 176 p.
4. Altshuller G.S., Selyutskiy A.B. *Krylya dlya Ikara. Kak reshat' izobretatelskie zadachi* [Wings for Icarus. How to solve inventive problems]. Petrozavodsk, Kareliya publ., 1980, 224 p.
5. Polovinkin A.I. *Osnovy inzhenerenogo tvorchestva* [Fundamentals of engineering creativity]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988, 368 p.
6. Altshuller G.S., Zlotin B.L., Zusman A.V. *Poisk novykh idey. Ot ozareniya k tekhnologii* [Search for new ideas. From insight to technology]. Kishinev, Kartya Moldavenyaska publ., 1989, 382 p.
7. Pigarov G.S., Taran Yu.N., Belgolskiy B.P. *Intensifikatsiya inzhenerenogo tvorchestva* [Intensification of engineering creativity]. Moscow, Profizdat publ., 1989, 192 p.
8. Salamatov Yu.P. *Kak stat' izobretatelem* [How to become an inventor]. Moscow, Prosveshchenie publ., 1990, 240 p.
9. Amirov Yu.D. *Osnovy konstruirovaniya* [Basics of designing]. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 1991, 392 p.
10. Stepanov Yu.S., Shchukin A.E. *Metody poiskovogo konstruirovaniya tekhnologicheskoy osnastki* [Methods of search designing of tooling]. Orel, Orlovskiy filial Moskovskogo instituta priborostroeniya publ., 1993, 146 p.
11. Yanovsky B.G., Gordeev A.V. To teach creativity. *Shkola i proizvodstvo*, 1999, no. 3, pp. 22–32.
12. Likholetov V.V. *Tekhnologiya tvorchestva: teoreticheskie osnovy modelirovaniya* [Art technology: theoretical foundations of modeling]. Chelyabinsk, YuUrGU publ., 2001, 288 p.
13. Gordeev A.V. The use of heuristic methods in technical work. *Shkola i proizvodstvo*, 2002, no. 2, pp. 12–18.
14. Jons J.K. *Metody proektirovaniya* [Design methods]. Moscow, Mir publ., 1986, 326 p.
15. Pigarov G.S. *Kreatologiya i intellektualnie tekhnologii innovatsionnogo razvitiya* [Creatology and intelligent technology of innovation development]. Dnepropetrovsk, Porogi publ., 2003, 502 p.
16. Voytov A.G. *Samouchitel myshleniya* [Self-tutor on thinking]. Moscow, Dashkov i K publ., 2005, 408 p.
17. Gordeev A.V. Teaching methodology of technical creativity – the way of training a modern specialist. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Mashinovedenie*, 2005, no. 2, pp. 262–266.
18. Gordeev A.V. *Osnovy tekhnicheskogo tvorchestva* [Fundamentals of technical creativity]. Tolyatti, TGU publ., 2008, 216 p.
19. Gordeev A.V. Creative study – general direction of improvement study engineer. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 3, pp. 71–80.
20. Kazakov Yu.V. *Metody resheniya izobretatelskikh zadach* [Methods of inventive problem solving]. Tolyatti, TGU publ., 2010, 161 p.
21. Altov G. *I tut poyavilsya izobretatel'* [And here the inventor appeared]. Moscow, Detskaya literature publ., 2000, 126 p.
22. Dikson J. *Proektirovanie system: izobretatelstvo, analiz i prinyatie resheniy* [Systems design: inventing, analysis and decision-making]. Moscow, Mir publ., 1969, 440 p.

EMPIRICAL TECHNIQUES FOR RESOLVING CONTRADICTIONS IN TECHNICAL PROBLEMS

© 2015

A.V. Gordeyev, candidate of technical sciences, Associate Professor

D.L. Borodynkina, graduate student

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: conflict resolution; separation of the object; technical creativity; engineering technology; learning process; physical field; empirical method; Altshuller's table.

Abstract: The well-known approach to solving technical problems by resolving conflicts through the use of empirical methods is rather cumbersome, and makes it difficult to study it in the course of educational process. The aim of the paper is to develop such a system of empirical methods that would allow studying it within the educational program of training an engineer without reducing significantly its effectiveness. As a part of this goal, the author analyzes well-known systems of empirical methods of solving technical problems with regard to the field of "Mechanical Engineering", and makes an attempt to reduce the number of techniques without losing their effectiveness due to their specialization, as well as by combining well-known methods. The proposed approach allows mastering the method of empirical techniques within the educational process.

As a result, a list of empirical methods and techniques of solving technical problems in the field of mechanical engineering, including 10 techniques: partitioning – aggregation (partition of the object, task sharing, optimization, nesting), elasticity (elastic element, inflatable element), other way (opposite position, opposite action, prior action, asymmetry), curvilinearity (curvilinear element, rotation, rolling), dynamism (mobility, adaptability, intermittence), analogy (a copy of the object, the technical counterpart, natural analogue), damage to the good (usage, intensification, adding, cheap fragility, waste), state (aggregate state, texture, porosity, heterogeneity), mediator (modified object, the third object), physical fields (the field, a combination of fields, physical effects).

Examples of application of empirical methods and techniques in solving engineering technology are given in the article.

The proposed system of empirical methods allows to study them in classes on technical creativity within the time allotted in the curriculum, and use them both for solving educational problems in discipline "Mechanical Engineering", coursework designing and further engineering practice.

Л.Н. Горина, доктор педагогических наук, профессор

Н.Е. Данилина, кандидат педагогических наук, доцент

Т.Ю. Фрезе, кандидат экономических наук, доцент

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: металлообрабатывающее оборудование; производственные лаборатории; шум; акустический мониторинг.

Аннотация: Усиление шумового фона свыше предельно допустимых величин представляет собой опасность для физического и психического здоровья человека. Подготовка специалистов для металлообрабатывающего комплекса осуществляется в учебных лабораториях, оборудованных профессиональными станками и инструментами, используемыми в производстве. Металлообрабатывающее оборудование является источником шума. Шум внутри помещений создается за счет работы металлообрабатывающих станков, сварочного оборудования и станков для испытания узлов и деталей автомобилей. В помещениях и на открытых площадках, где от различимости звука, создаваемого средствами радиоповещения, может зависеть безопасность людей, должны быть предусмотрены меры по обеспечению оптимального уровня громкости и различимости звука. В связи с чем мониторинг учебного процесса по акустическому фактору является актуальной процедурой для обеспечения безопасности образовательного процесса.

Целью исследования является повышение качества и безопасности образовательной среды путем проведения акустического мониторинга образовательного процесса. В качестве алгоритма проведения акустического мониторинга образовательного процесса можно предложить следующую последовательность: составление реестра дисциплин, лабораторий, станочной и приборной базы, оказывающих негативное воздействие на учащихся в образовательном учреждении, идентификацию опасных вредных производственных факторов, оказывающих негативное воздействие на учащихся в образовательном учреждении, на основе составленного реестра, формирование нормативно-правовой базы по акустическому фактору, инструментальные измерения уровня звука, октавного уровня звукового давления, уровня инфразвука в учебно-производственных лабораториях, обработка полученных экспериментальных данных, сравнение полученных результатов с нормативными значениями, формулирование выводов и рекомендаций по улучшению акустических показателей образовательных учреждений.

С ростом урбанизации шум стал постоянной частью человеческой жизни. Повышение уровня шума в повседневной жизни является критическим фактором для физиологического здоровья человека, особенно для молодого поколения. Усиление шумового фона свыше предельно допустимых величин представляет собой опасность для физического и психического здоровья учащихся. Шум приводит к повышению утомляемости, снижению умственной активности, неврозам, ухудшению зрения, росту числа сердечно-сосудистых заболеваний. Исследование шумового загрязнения образовательной среды путем проведения акустического мониторинга является важной социальной и экономической задачей [1–4].

Согласно Техническому регламенту таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» (Евразийское экономическое сообщество, комиссия таможенного союза, решение от 9 декабря 2011 г. № 877 [5]), размещение здания или сооружения на местности, проектные значения характеристик строительных конструкций, характеристики принятых в проектной документации типов инженерного оборудования, предусмотренные в проектной документации мероприятия по благоустройству прилегающей территории, должны обеспечивать защиту людей от: 1) воздушного шума, создаваемого внешними источниками (снаружи здания); 2) воздушного шума, создаваемого в других помещениях здания или сооружения; 3) ударного шума; 4) шума, создаваемого оборудованием; 5) чрезмерного ревербирующего шума в помещении.

В здании или сооружении, которые могут являться источником шума, приводящего к недопустимому превышению уровня воздушного шума на территории, на которой будут осуществляться строительство и эксплуатация здания или сооружения, должны быть предусмотрены меры по снижению уровня шума, источником которого является это проектируемое здание или сооружение [6–8].

Защита от шума должна быть обеспечена [9; 10]: 1) в помещениях жилых, общественных и производственных зданий; 2) в границах территории, на которой будут осуществляться строительство и эксплуатация здания или сооружения.

В помещениях и на открытых площадках, где от различимости звука, создаваемого средствами радиоповещения, может зависеть безопасность людей, должны быть предусмотрены меры по обеспечению оптимального уровня громкости и различимости звука.

Целью исследования является повышение качества и безопасности образовательной среды путем проведения акустического мониторинга образовательного процесса. Результаты акустического мониторинга в образовательных учреждениях городского округа Тольятти представлены в таблице 1.

Проведенный анализ учебных программ и планов позволил определить перечень дисциплин, имеющих приборную и стендовую базу, оказывающую негативное воздействие на учащихся в образовательных учреждениях [11–15]: металлорежущие станки; резание материалов; основы проектирования и эксплуатации технологического оборудования; производство сварных

Таблица 1. Результаты акустического мониторинга в образовательных учреждениях городского округа Тольятти

Наименование лаборатории	Тольяттинский государственный университет	Тольяттинский политехнический техникум	Тольяттинский технический колледж ВАЗа
Металлообрабатывающие станки и комплексы	78,0 дБ	78,4 дБ	78,5 дБ
Техническое обслуживание и ремонт автомобилей	72,4 дБ	72,6 дБ	73 дБ
Сварочные лаборатории	74,3 дБ	74,8 дБ	74,5 дБ

конструкций; технология и оборудование сварки плавлением и термической резки; техническое обслуживание и ремонт автомобилей.

Станочная лабораторная приборная база специальных дисциплин содержит следующее учебное оборудование: металлообрабатывающие станки и комплексы; учебные стенды для технического обслуживания и ремонта автомобилей; сварочное оборудование.

На основе составленного реестра станочного лабораторного и приборного оборудования были выявлены следующие опасные и вредные производственные факторы: повышенный уровень шума; повышенный уровень вибрации; повышенный уровень инфразвуковых колебаний; повышенный уровень электромагнитных излучений; повышенный уровень ультрафиолетовой радиации; движущиеся машины и механизмы.

Сформированная нормативно-правовая база по акустическому фактору позволяет определить методики оценки эквивалентного уровня звука, эквивалентного уровня инфразвука, предельно допустимый уровень (ПДУ), а также провести сравнительный анализ полученных данных при проведении инструментальных измерений с нормативными показателями и сделать выводы о допустимых или вредных условиях организации образовательного процесса.

Основной нормативной правовой базы стали следующие документы: ГОСТ Р ИСО 9612-2013 «Национальный стандарт Российской Федерации. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах» [1]; ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» [6]; СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» [11]; СанПиН 2.4.2.2821-10 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях» [12]; СанПиН 2.4.3.1186-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к организации учебно-производственного процесса в образовательных учреждениях начального профессионального образования» [13].

В качестве алгоритма проведения акустического мониторинга образовательного процесса можно предложить следующую последовательность: составление реестра дисциплин, лабораторий, станочной и приборной базы, оказывающих негативное воздействие на учащихся в образовательном учреждении; идентификацию опасных вредных производственных факторов, оказывающих негативное воздействие на учащихся в образовательном учреждении, на основе составленно-

го реестра; формирование нормативно-правовой базы по акустическому фактору; инструментальные измерения уровня звука, октавного уровня звукового давления, уровня инфразвука в учебно-производственных лабораториях; обработку полученных экспериментальных данных; сравнение полученных результатов с нормативными значениями; формулирование выводов и рекомендаций по улучшению акустических показателей образовательных учреждений.

Шум в образовательных учреждениях обусловлен как внешним шумом, проникающим с улицы, так и внутренним. Главным источником внешнего шума является городской транспорт. Шум внутри помещений создается за счет работы металлообрабатывающих станков, сварочного оборудования и стендов для испытания узлов и деталей автомобилей. Для проведения инструментальных измерений использовался шумомер класса 1, анализатор шума и вибрации «Ассистент TOTAL+».

ГОСТ Р ИСО 9612-2013 устанавливает три стратегии измерения шума на рабочем месте: а) на основе рабочей операции, когда проведенный анализ работ, выполняемых в течение дня данным работником, позволяет разбить их на ряд представительных рабочих операций, для каждой из которых потом выполняют несколько измерений; б) на основе трудовой функции, когда выборочные измерения проводят в процессе выполнения данной рабочей функции; в) на основе рабочего дня, когда значение измеряемой величины получают непрерывным измерением шума на рабочем месте в течение всего рабочего дня.

Измерения проводились по стратегии измерений на основе рабочей операции [16–20].

Номинальный день был разбит на отдельные рабочие операции и перерывы между ними. Рабочая операция определена таким образом, чтобы при ее многократных повторениях характеризующее ее значение $L_{p,A,eqT}$ изменялось не очень значительно, все значимые источники шума во время выполнения операции учтены должным образом. Чем выше уровень шума во время операции, тем важнее точно определить ее продолжительность.

Для определения продолжительности рабочей операции T_m использовались: а) беседы с работниками и руководителем низшего звена; б) наблюдения и измерения продолжительности выполнения операции во время измерений шума; в) сбор информации о длительности действия типичных источников шума (технологических процессов; работающих машин; о действиях, совершаемых на рабочем месте и вблизи него).

Для каждой рабочей операции произвели измерения эквивалентного уровня звука при выполнении m -й операции $L_{p,A,eqT,m}$, характеризующей воздействие шума на работника во время выполнения каждой операции. Измерения проводились в присутствии обследуемого работника во время выполнения работником своих функций, размещая микрофон на расстоянии от 0,1 до 0,4 м от входного отверстия наружного слухового прохода со стороны уха, где шум максимален. Отклонения в шумовой обстановке зафиксированы в протоколе измерений. Для каждой операции было произведено не менее трех измерений с продолжительностью не менее 5 минут, чтобы оценить возможные изменения в уровне шума, измерения производились в различные фазы выполнения операции. Если результаты трех измерений различались на 3 дБ и более, то производилось одно из следующих действий: а) выполнение еще не менее трех измерений для данной операции; б) разбиение операции на более мелкие части и повторение процедуры; в) повторение процедуры измерений, увеличив длительность каждого измерения.

По измерениям шума во время выполнения m -й рабочей операции рассчитывают эквивалентный уровень звука $L_{p,A,eqT,m}$, дБ, по формуле:

$$L_{p,A,eqT,m} = 10 \lg \left(\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I 10^{0,1 \times L_{p,A,eqT,mi}} \right),$$

где $L_{p,A,eqT,mi}$ – эквивалентный уровень звука при выполнении m -й операции на периоде i -го измерения; i – номер выборочного измерения шума m -й операции; I – число измерений при выполнении m -й операции.

Расчет эквивалентного уровня звука за 8-часовой рабочий день производится по формуле:

$$L_{EX,8h} = 10 \lg \left(\sum_{m=1}^M \frac{\bar{T}_m}{T_0} 10^{0,1 \times L_{p,A,eqT,m}} \right),$$

где $L_{p,A,eqT,m}$ – эквивалентный уровень звука при выполнении m -й операции;

\bar{T}_m – средняя продолжительность m -й операции, ч;

T_0 – базовая длительность рабочего дня, равная 8 ч;

m – номер рабочей операции;

M – число рабочих операций, дающих вклад в эквивалентный уровень звука за 8-часовой рабочий день.

Рассмотрим акустическое воздействие в лабораториях «Металлообрабатывающие станки и комплекс», «Техническое обслуживание и ремонт автомобилей», «Сварочные работы». Студент находится в каждой из них в течение двух часов и подвергается воздействию шума.

Апробация системы акустического мониторинга проводилась в следующих образовательных учреждениях: Тольяттинский государственный университет, Тольяттинский политехнический техникум, Тольяттинский технический колледж ВАЗа. Результаты мониторинга представлены в таблице 1.

В результате акустического мониторинга в образовательных учреждениях не было выявлено превышение уровня звука по всем трем профилям лабораторий.

Таким образом, в результате исследования были определены опасные и вредные факторы для учебно-

производственных лабораторий машиностроительной направленности, сформирована нормативная правовая база, разработан метод проведения акустического мониторинга для металлообрабатывающих лабораторий, проведены измерения уровня шума, согласно выбранной стратегии измерения, обработаны результаты исследования. Для проведения постоянного акустического мониторинга в учебно-производственных лабораториях образовательных учреждений необходимо разработать программу учебно-производственного контроля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 9612-2013. Акустика. Измерения шума для оценки его воздействия на человека. Метод измерений на рабочих местах. М.: Стандартинформ, 2014. 66 с.
2. Суворов Г.А., Прокопенко Л.В., Якимов Л.Д. Шум и здоровье (эколого-гигиенические проблемы). М.: Союз, 1996. 150 с.
3. Суворов Г.А., Денисов Э.И., Шкаринов Л.Н. Гигиеническое нормирование производственных шумов и вибраций. М.: Медицина, 1984. 240 с.
4. МУК 4.3.2194-07 Контроль уровня шума на территории жилой застройки, в жилых и общественных зданиях и помещениях. Методические указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2007. 24 с.
5. Технический регламент таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств»: утв. решением Комиссии Таможенного союза № 877 от 09.12.2011 // Консультант Плюс: информационно-правовая система.
6. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности. М.: Стандартинформ, 2007. 11 с.
7. РФ. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 // Собрание законодательства РФ. 2010. № 1. Ст. 5.
8. СП 51.13330.2011. Свод правил. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. М.: Минрегион России, 2011. 105 с.
9. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды (техносферная безопасность). М.: Юрайт, 2010. 671 с.
10. Занько Н.Г., Малаян К.Р., Русак О.Н. Безопасность жизнедеятельности. Изд. 13-е. СПб.: Лань, 2010. 674 с.
11. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. 2.1.8. Физические факторы окружающей природной среды. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы: утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ № 36 от 31.10.1996 // Консультант Плюс: информационно-правовая система.
12. СанПиН 2.4.2.2821-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям и организации обучения в общеобразовательных учреждениях // Консультант Плюс: информационно-правовая система.
13. СанПиН 2.4.3.1186-03. Санитарно-эпидемиологические требования к организации учебно-производственного процесса в образовательных учреждениях начального профессионального образования //

- Консультант Плюс: информационно-правовая система.
14. ГОСТ Р 51400-99. Шум машин. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению. Технические методы для малых переносных источников шума в реверберационных полях в помещениях с жесткими стенами и в специальных реверберационных камерах. М.: Изд-во стандартов, 2000. 22 с.
 15. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда // Консультант Плюс: информационно-правовая система.
 16. МР 4.3.0008-10. Применение акустических калибраторов шумомеров и оценка неопределенности измерений. Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 10 с.
 17. Методические указания по проведению измерений и гигиенической оценки шумов на рабочих местах. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 11 с.
 18. ГОСТ Р МЭК 60942-2009. Калибраторы акустические. Технические требования и требования к испытаниям. М.: Стандартинформ, 2010. 80 с.
 19. ГОСТ 12.2.030-2000. Машины ручные. Шумовые характеристики. Нормы. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2001. 5 с.
 20. ГОСТ 12.1.035-81. Оборудование для дуговой и контактной электросварки. Допустимые уровни шума и методы измерений. М.: Изд-во стандартов, 2001. 3 с.
 6. GOST 12.1.003-83. *Shum. Obshchie trebovaniya bezopasnosti* [Noise. General safety requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2007, 11 p.
 7. RF Federal Law "Technical regulation on safety of buildings and structures" no. 384-FZ of December 30, 2009. (In Russian).
 8. SP 51.13330.2011. *Zashchita ot shuma* [Sound protection]. Moscow, Minregion Rossii publ., 2011, 105 p.
 9. Belov S.V. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti i zashchita okruzhayushchey sredy (tekhnosfer'naya bezopasnost')* [Life safety and environmental protection (technosphere safety)]. Moscow, Yurayt publ., 2010, 671 p.
 10. Zan'ko N.G., Malayan K.R., Rusak O.N. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Health and Safety]. 13th ed. S. Peterburg, Lan' publ., 2010, 674 p.
 11. SN 2.2.4/2.1.8.562-96. Noise in the workplace, in residential and public buildings and residential areas. Sanitary norms approved by Resolution of the special State Committee of the Russian Federation no. 36 of October 31, 1996. (In Russian).
 12. SanPiN 2.4.2.2821-10. Sanitary and epidemiologic conditions and requirements for the organization of training in educational institutions. (In Russian).
 13. SanPiN 2.4.3.1186-03. Sanitary and epidemiologic conditions and requirements for the organization of training and production process in educational institutions of primary vocational education. (In Russian).
 14. GOST R 51400-99. *Shum mashin. Opredelenie urovney zvukovoy moshchnosti istochnikov shuma po zvukovomu davleniyu. Tekhnicheskie metody dlya malikh perenosnikh istochnikov shuma v reverberatsionnikh polyakh v pomeshcheniyakh s zhestkimi stenami i v spetsialnikh reverberatsionnikh kamerakh* [Noise of machines. Determination of sound power levels using sound pressure. Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields for hard-walled test rooms and for special reverberation test rooms]. Moscow, Izdatel'stvo standartov publ., 2000, 22 p.
 15. R 2.2.2006-05. Guidelines for hygienic assessment of factors of working environment and labor process. The criteria and classification of working conditions. (In Russian).
 16. MR 4.3.0008-10. *Primenenie akusticheskikh kalibratorov i otsenka neopredelennosti izmereniy. Metodicheskie ukazaniya* [The use of acoustic calibrator for sound level meters and evaluation of measurement uncertainty. Guidelines]. Moscow, Federalniy tsentr gigieni i epidemiologii Rospotrebнадзора publ., 2010, 10 p.
 17. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu izmereniy i gigienicheskoy otsenki шумов на рабочих местах* [Guidelines for measurement and evaluation of noise hygiene in the workplace]. Moscow, Federalniy tsentr gigieni i epidemiologii Rospotrebнадзора publ., 2008, 11 p.
 18. GOST R MEK 60942-2009. *Kalibratori akusticheskie. Tekhnicheskie trebovaniya i trebovaniya k ispitaniyam* [Sound calibrators. Specifications and test requirements]. Moscow, Standartinform publ., 2010, 80 p.
 19. GOST 12.2.030-2000. *Mashini ruchnie. Shumovie kharakteristiki. Normi. Metodi ispitaniy* [Hand tools.

REFERENCES

1. GOST R ISO 9612-2013. *Akustika. Izmereniya shuma dlya otsenki ego vozdeystviya na cheloveka. Metod izmereniy na rabochikh mestakh* [Acoustics. Noise measurement for the purpose of evaluating human exposure to noise. Method of measurement at workplaces]. Moscow, Standartinform publ., 2014, 66 p.
2. Suvorov G.A., Prokopenko L.V., Yakimova L.D. *Shum i zdorovye (ekologo-gigienicheskie problemi)* [Noise and health (ecological and hygienic problems)]. Moscow, Soyuz publ., 1996, 150 p.
3. Suvorov G.A., Denisov E.I., Shkarinov L.N. *Gigienicheskoe normirovanie proizvodstvennikh шумов i vibratsiy* [Hygienic regulation of industrial noise and vibration]. Moscow, Meditsina publ., 1984, 240 p.
4. MUK 4.3.2194-07 *Kontrol' urovnya shuma na territorii zhiloy zastroyki, v zhilikh i obshchestvennikh zdaniyakh i pomeshcheniyakh. Metodicheskie ukazaniya* [Control of noise in residential areas, in residential and public buildings and premises. Guidelines]. Moscow, Federalniy tsentr gigieni i epidemiologii Rospotrebнадзора publ., 2007, 24 p.
5. Technical Regulations of the Customs Union TR TS 018/2011 «On the safety of wheeled vehicles», approved by the decision of the Commission of the Customs Union no. 877 of December 09, 2011. (In Russian).

Noise characteristics. Limits. Methods of testing]. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 2001, 5 p.
20. GOST 12.1.035-81. *Oborudovanie dlya dugovoy i kontaktnoy elektrosvarki. Dopustimie urovni shuma*

i metodi izmereniy [Equipment for arc and contact electric welding. Allowable noise levels and methods of measurement]. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 2001, 3 p.

METHODOLOGY AND PRACTICE OF ORGANIZING AND CONDUCTING OF SAFETY MONITORING OF WORK TRAINING LABORATORIES

© 2015

L.N. Gorina, Doctor of Pedagogy, Full Professor
N.E. Danilina, candidate of pedagogical sciences, associate professor
T.Y. Freze, candidate of economic sciences, associate professor
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: metal-working machinery; industrial laboratories; noise; acoustic monitoring.

Abstract: The increased background noise exceeding limit values is a danger to the physical and mental health of a human. Preparation of experts for the metal-working complex is carried out in a university laboratory that is equipped with professional stands and machines used in production process. Metal-working machines are a source of noise. Indoor noise is created by the operation of machine tools, welding equipment and test benches for components and automotive parts. The indoor and outdoor areas, where the security of people may depend on the legibility of the sound generated by means of radio warning, should be provided with measures to ensure the optimum volume and distinguishable sound. Therefore, monitoring of educational process by the acoustic factor is the important procedure for the safety of the educational process.

The purpose of the study is to improve the quality and security of the educational environment through acoustic monitoring of the educational process. As an algorithm of acoustic monitoring of the educational process the authors can offer the following sequence: an inventory of disciplines, laboratories, machine tools and instrument base, which have a negative impact on students at an educational institution, identification of dangerous and harmful factors that influence negatively on the students at the educational institution on the basis of the register, formation of the normative and legal base according to the acoustic factor, instrumental measurement of sound level, octave sound pressure level, the level of infrasound in school and industrial laboratories, processing of the experimental data, comparison of the results to the normative values, formulation of conclusions and recommendations aimed to improve the acoustic indices of educational institutions.

ИЗУЧЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ НА ПРЕЦИЗИОННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

© 2015

Б.М. Горшков, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Сервис технических и технологических систем»

О.Ю. Ремнева, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Сервис технических и технологических систем»
Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: корпусная заготовка; точность обработки; несоосность; точечная диаграмма.

Аннотация: Металлорежущие станки включают в себя сложные технологические системы, которые в процессе обработки изменяют свои параметры, в результате чего снижается точность обработки. Факторов, влияющих на точность обработки, множество, но основным является точность самого технологического оборудования. Классические методы повышения точности станков практически исчерпали свои возможности и становятся экономически невыгодными. Поэтому работа, посвященная изучению точности обработки на технологическом оборудовании, является весьма актуальной.

В статье описываются результаты исследований точности обработки глубоких отверстий на прецизионном горизонтальном координатно-расточном станке модели 2А459АФ4.

Целью работы является доказательство влияния упругих силовых деформаций несущей системы (изгиб и кручение) прецизионного горизонтального координатно-расточного станка на точность обработки на нем.

На базе специальной установки проводились измерения отклонения от круглости отверстия в условиях, максимально приближенных к реальной производственной обстановке. На основе полученных результатов выборок отверстий были построены точечные диаграммы, наглядно отражающие характер отклонения оси обрабатываемого отверстия в процессе обработки. Определено, что величина смещения оси отверстий в двух перпендикулярных плоскостях – величина непостоянная и зависит от расположения подвижных элементов технологической системы станка в процессе обработки. Так, при расположении отверстий ближе к зеркалу стола величина отклонения оси уменьшается. Наличие упругих силовых деформаций несущей системы влечет за собой перемещения заготовки и, как следствие, увод оси обработанного отверстия относительно оси инструмента.

Исследования проводились по собственной методике, в основе которой использовался пакет прикладных программ: Компас 3D V12, ANSYS Workbench, MathCAD.

ВВЕДЕНИЕ

Изучению вопроса точности механической обработки уделено немало внимания в технической научной литературе [1–6]. Основываясь на проведенном обзоре научных трудов, а также учитывая, что станина исследуемого прецизионного горизонтального координатно-расточного станка является составной, имеет Т-образную форму и значительные габариты, критичной погрешностью при обработке отверстий на данном технологическом оборудовании следует считать радиальное биение, вызванное упругими силовыми деформациями несущей системы станка.

Таким образом, целью работы является доказательство влияния упругих силовых деформаций несущей системы (изгиб и кручение) прецизионного горизонтального координатно-расточного станка на точность обработки на нем.

Радиальное биение представляет суммарную величину отклонения от соосности и отклонения формы в поперечном сечении [7]. Рассмотрим данные отклонения более подробно.

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований погрешностей обработки глубоких отверстий на прецизионном горизонтальном координатно-расточном станке модели 2А459АФ4 была взята специальная корпусная заготовка. Конструктивное исполнение заготовки, ее размеры и способ крепления представлены на рис. 1.

В ходе исследования погрешности обработки отверстий производились сверление и расточка отверстий 11...77 (см. рис. 1) корпусной заготовки [8].

С помощью специального устройства для измерения формы отверстия, в конструкции которого используется токовихревой датчик, производились измерения отклонения от круглости обработанного отверстия в шести сечениях [9].

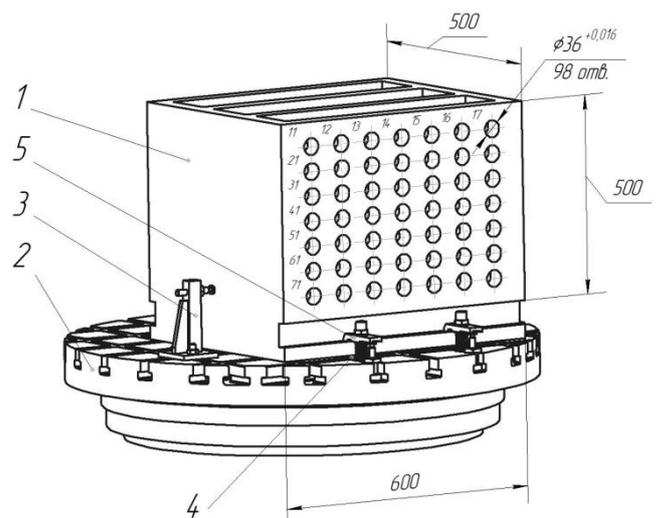


Рис. 1. Обрабатываемая корпусная заготовка.
1 – заготовка; 2 – стол поворотный; 3 – упор;
4 – штырь опорный; 5 – регулируемая опора

Информация с токовихревого датчика считывается цифровым осциллографом АСК-3106 и передается в постоянное запоминающее устройство ПК. В результате

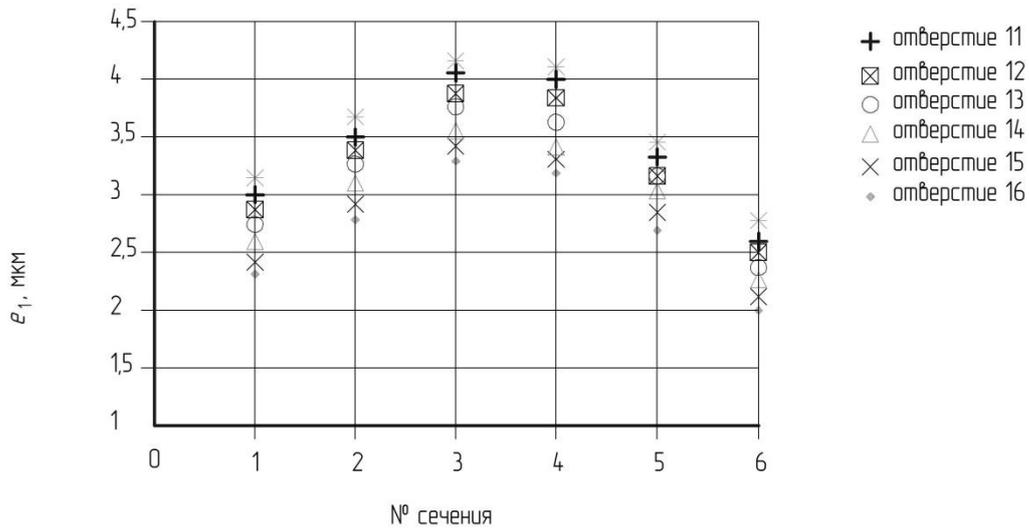


Рис. 2. Точечная диаграмма отклонения осей отверстий 11...16 от деформации изгиба несущей системы ПГКРС e_1

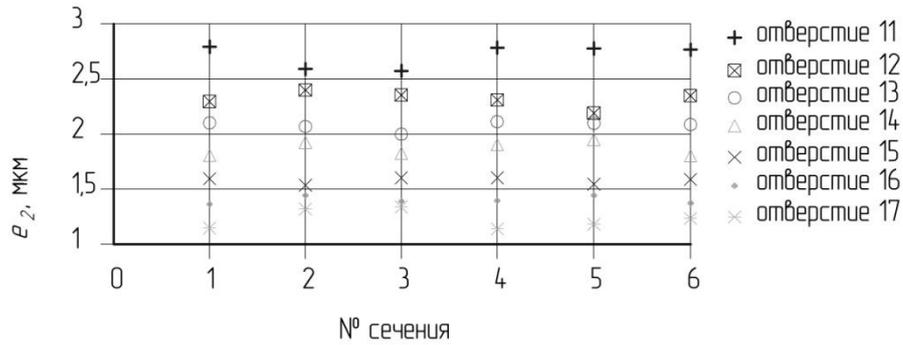


Рис. 3. Точечная диаграмма отклонения осей отверстий 11...17 от деформации кручения несущей системы ПГКРС e_2

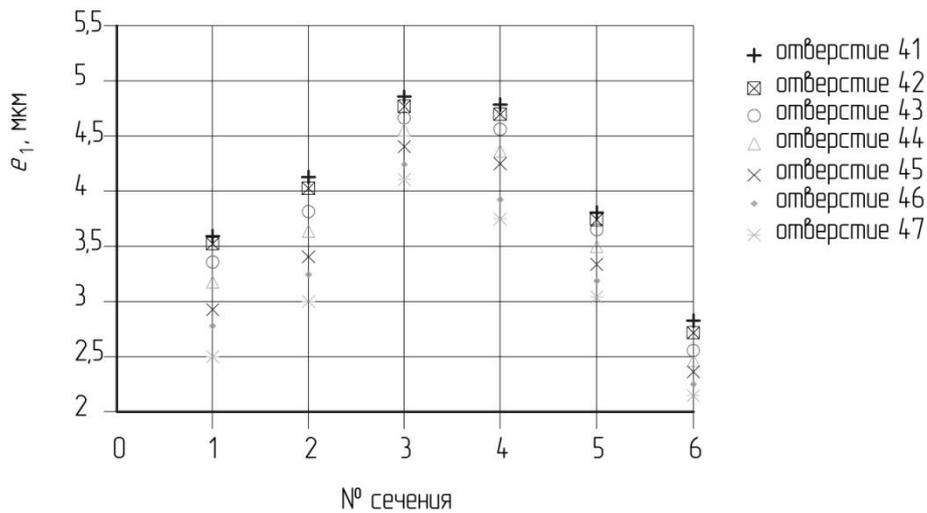


Рис. 4. Точечная диаграмма отклонения осей отверстий 41...47 от деформации изгиба несущей системы ПГКРС e_1

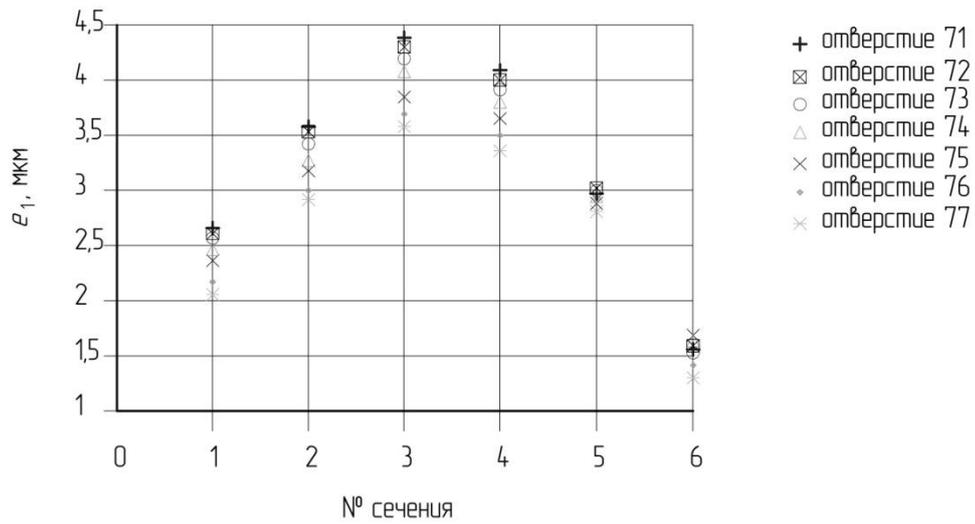


Рис. 5. Точечная диаграмма отклонения осей отверстий 71...77 от деформации изгиба несущей системы ПГКРС e_1

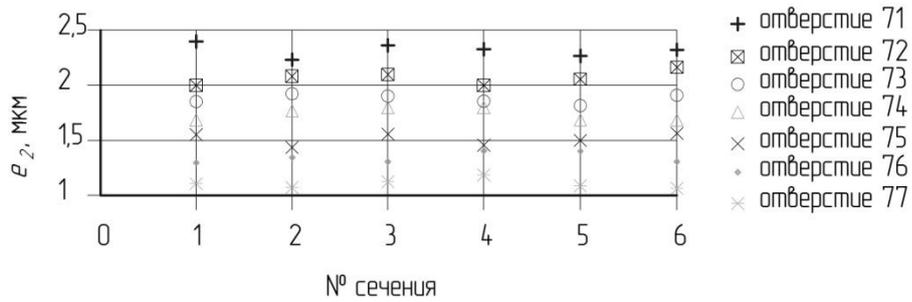


Рис. 6. Точечная диаграмма отклонения осей отверстий 71...77 от деформации кручения несущей системы ПГКРС e_2

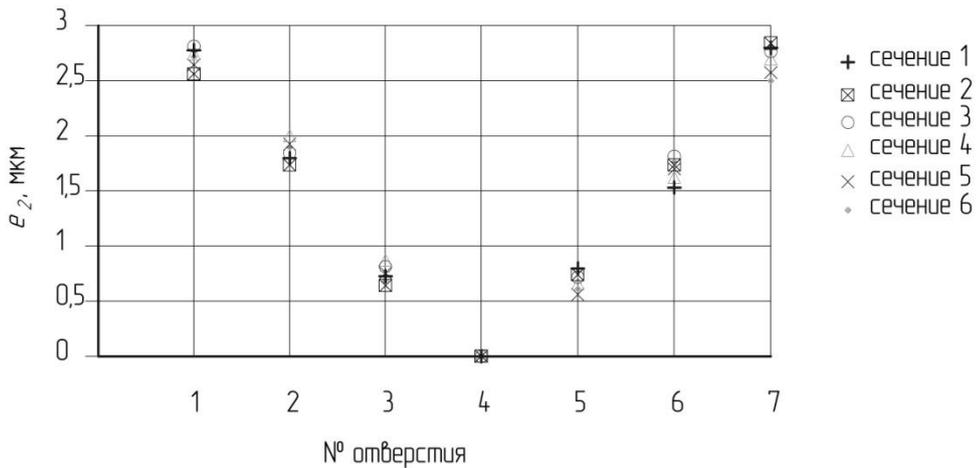


Рис. 7. Точечная диаграмма отклонения осей отверстий 11...71 от деформации кручения несущей системы ПГКРС e_2

обработки данной информации были получены реальные профили обработанных поверхностей с соответствующими значениями отклонения от круглости и шероховатости [10–12].

Измерения производились на предварительно выставленной несущей системе ПГКРС: были установлены четыре дополнительные винтовые опоры. Положение заготовки относительно зеркала стола выверялось

электронными уровнями ИН-ДЗ. Таким образом, на данной установке проводились измерения отклонения от круглости отверстия в условиях, максимально приближенных к реальной производственной обстановке.

В результате проведенных измерений выяснилось, что максимальные величины отклонений от круглости, шероховатости и соосности обработанного отверстия наблюдаются при наибольшем удалении отверстий от зеркала стола. Поэтому более подробно рассмотрению подлежат отверстия 11, 41 и 71. Данные, полученные в результате исследования этих отверстий, представлены в таблице 1, где e_1 – смещение оси отверстия в вертикальном направлении, e_2 – смещение оси отверстия в горизонтальном направлении.

Таблица 1. Результаты измерений отверстий

№ отверстия № сечения		e_1 , мкм	e_2 , мкм
11	№ 1	3,1	2,8
	№ 2	3,7	2,6
	№ 3	4,2	2,7
	№ 4	4,1	2,8
	№ 5	3,5	2,7
	№ 6	2,8	2,7
41	№ 1	3,6	0
	№ 2	4,2	0
	№ 3	5	0
	№ 4	4,9	0
	№ 5	3,9	0
	№ 6	2,9	0
71	№ 1	2,7	2,3
	№ 2	3,5	2,3
	№ 3	4,3	2,3
	№ 4	4,1	2,3
	№ 5	2,9	2,2
	№ 6	1,6	2,2

На основе полученных результатов выборок отверстий 11...17, 41...47, 71...77, чей процесс обработки соответствовал критическим значениям несоосности обработанных отверстий, были построены точечные диаграммы (рис. 2–7) [13–15].

По оси абсцисс указан № сечения каждой выборки отверстий, в которых производились изменения, по оси ординат – величина вертикального (e_1) или горизонтального (e_2) смещений осей отверстий.

Об устойчивости процесса можно судить по внешнему виду диаграмм [16–18].

На рис. 2, 4, 5, 7 изображены точечные диаграммы, отражающие устойчивый и стабильный по рассеиванию процесс обработки, но нестабильный по положению центра рассеивания, что наглядно показывает характер отклонения оси обрабатываемого отверстия в процессе обработки [19; 20].

На рис. 3 и 6 изображен устойчивый и стабильный по рассеиванию процесс обработки. При этом видно, что величина смещения оси отверстий уменьшается при расположении отверстий ближе к зеркалу стола.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе анализа данных, полученных при измерении отклонения от круглости и смещений осей обработанных отверстий относительно оси инструмента, наблюдаются некоторые закономерности. Так, при исследовании характера отклонения оси отверстий 11...17 и 71...77 наблюдаются смещения оси отверстий в вертикальном (e_1) и горизонтальном (e_2) направлениях. Это свидетельствует о наличии упругих силовых деформаций несущей системы (изгиб и кручение). На диаграммах отверстия 41 наблюдается только вертикальное смещение оси отверстия, следовательно, несущая система ПГКРС в данном случае испытывала только деформации изгиба.

Проведенные измерения выявили, что силовые деформации несущей системы (изгиб и кручение) ПГКРС влекут за собой перемещения заготовки и, как следствие, увод оси обработанного отверстия относительно оси инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базров Б.М. Причины образования погрешностей обработки деталей. Адаптивное управление станками. М.: Машиностроение, 1989. 358 с.
2. Васильев А.С. Суммарная погрешность обработки и взаимное влияние ее составляющих // Известия вузов. Машиностроение. 1999. № 3. С. 89–96.
3. Серегин А.А. Определение точности металлорежущих систем // Станки и инструмент. 1991. № 1. С. 29–31.
4. Дьяконова Н.П. Оценка точности металлорежущих станков по характеристикам жесткости // Станки и инструмент. 1984. № 9. С. 6–7.
5. Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Машгиз, 1961. 380 с.
6. Юркевич В.В. Методы испытаний обрабатываемых станков // Машиностроитель. 2006. № 8. С. 27–36.
7. Агафонов В.В. Теоретическое определение центра тяжести и положения главных осей упругой системы станка // СТИН. 2005. № 8. С. 29–31.
8. Маркарьян Ю.А. Управление процессом глубокого сверления // СТИН. 2007. № 6. С. 5–7.
9. Ремнева О.Ю., Ржевцев Г.Д., Горшков Б.М. Методика экспериментального исследования точности обработки на горизонтальных координатно-расточных станках // Наука и творчество: взгляд молодых профессионалов: сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. Т. 2. Тольятти, 2012. С. 25–27.
10. Бобрик П.И. Связь микро- и макрогеометрии поверхностей, полученных механической обработкой. М.: МАТИ, 1952. 151 с.
11. Горшков Б.М., Самохина Н.С., Ремнева О.Ю. Исследование технологических систем прецизионных горизонтальных координатно-расточных станков методом конечных элементов // Металлообработка. 2012. № 5-6. С. 69–73.
12. Косов М.Г., Корзаков А.А. Моделирование контактной жесткости деталей с учетом рельефа шероховатости их поверхности // СТИН. 2003. № 12. С. 23–25.
13. Солонин И.С. Применение математической статистики в технологии машиностроения. Свердловск: Средне-Уральское кн. изд-во, 1966. 199 с.

14. Салов П.М., Салова Д.П. Рациональное использование рабочей поверхности абразивных кругов. Чебоксары: Чебоксарский политехнический институт (филиал) МГОУ, 2010. 332 с.
15. Агафонов В.В. Определение погрешностей обработки с учетом динамических характеристик упругой системы станка // СТИН. 2006. № 5. С. 10–13.
16. Видманов Ю.И. Динамика несущих систем станков (станин) при компенсации их силовых деформаций. Куйбышев: КуАИ, 1974. 82 с.
17. Салов П.М., Кравченко Б.А. Принципы самоорганизации износа шлифовальных кругов. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2001. 118 с.
18. Бушуев В.В. Компенсация упругих деформаций в станках // Станки и инструмент. 1991. № 3. С. 42–46.
19. Бушуев В.В. Жесткость станков // СТИН. 1996. № 8. С. 26–32; № 9. С. 17–20.
20. Кирилин Ю.В., Табаков В.П., Еремин Н.В. Методика моделирования несущей системы станка // СТИН. 2004. № 6. С. 13–17.
9. Remneva O.Yu., Rzhvtsev G.D., Gorshkov B.M. Methods of experimental study of accuracy of processing using horizontal coordinate boring machines. *Sbornik statey VI mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Nauka i tvorchestvo: vzglyad molodikh professionalov"*. Tolyatti, 2012, vol. 2, pp. 25–27.
10. Bobrik P.I. *Svyaz' mikro- i makrogeometrii poverkhnostey, poluchennikh mekhanicheskoy obrabotkoy* [Relation of micro- and macro-geometry of surfaces obtained during mechanical processing]. Moscow, MATI publ., 1952, 151 p.
11. Gorshkov B.M., Samokhina N.S., Remneva O.Ju. Research of technological systems of precision horizontal coordinate boring machines by a method of final elements. *Metalloobrabotka*, 2012, no. 5-6, pp. 69–73.
12. Kosov M.G., Korzakov A.A. Modeling of contact parts stiffness with regard to the roughness relief of their surface. *STIN*, 2003, no. 12, pp. 23–25.
13. Solonin I.S. *Primenenie matematicheskoy statistiki v tekhnologii mashinostroeniya* [Application of mathematical statistics in mechanical engineering]. Sverdlovsk, Sredne-Uralskoe knizhnoe izdatelstvo publ., 1966, 199 p.
14. Salov P.M., Salova D.P. *Ratsionalnoe ispolzovanie rabochey poverkhnosti abrazivnykh krugov* [Rational use of the working surface of abrasive wheels]. Cheboksari, Cheboksarsky politekhnichesky institut publ., 2010, 332 p.
15. Agafonov V.V. Determination of working errors taking into account the dynamic characteristics of machine elastic system. *STIN*, 2006, no. 5, pp. 10–13.
16. Vidmanov Yu.I. *Dinamika nesushchikh system stankov (stanin) pri kompensatsii ikh silovikh deformatsiy* [Dynamics of machine frame constructions (bodies) when compensating their power deformations]. Kuybishev, KuAI publ., 1974, 82 p.
17. Salov P.M., Kravchenko B.A. *Printsipi samoorganizatsii iznosa shlifovalnykh krugov* [Principles of self-organization of grinding wheels wear]. Samara, Samarsky gos. tekhn. universitet publ., 2001, 118 p.
18. Bushuev V.V. Compensation of elastic deformations in machines. *Stanki i instrument*, 1991, no. 3, pp. 42–46.
19. Bushuev V.V. Machines stability. *STIN*, 1996, no. 8, pp. 26–32; no. 9, pp. 17–20.
20. Kirilin Yu.V., Tabakov V.P., Eremin N.V. Methods of the machine frame construction modeling. *STIN*, 2004, no. 6, pp. 13–17.

REFERENCES

1. Vazrov V.M. *Prichiny obrazovaniya pogreshnostey obrabotki detaley. Adaptivnoe upravlenie stankami* [Causes of inaccuracy of parts processing. Adaptive control of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989, 358 p.
2. Vasilyev A.S. Total uncertainty of processing and mutual influence of its components. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 1999, no. 3, pp. 89–96.
3. Seregin A.A. Evaluation of accuracy of metal-cutting systems. *Stanki i instrument*, 1991, no. 1, pp. 29–31.
4. D'yakonova N.P. Evaluation of accuracy of metal-cutting machines according to the load-deflection curve. *Stanki i instrument*, 1984, no. 9, pp. 6–7.
5. Korsakov V.S. *Tochnost mekhanicheskoy obrabotki* [Accuracy of mechanical processing]. Moscow, Mashgiz publ., 1961, 380 p.
6. Yurkevich V.V. Methods of testing of processing machines. *Mashinostroytel*, 2006, no. 8, pp. 27–36.
7. Agafonov V.V. Theoretical determination of gravity center and main axel position of machine elastic system. *STIN*, 2005, no. 8, pp. 29–31.
8. Markaryan Yu.A. Control of deep hole drilling process. *STIN*, 2007, no. 6, pp. 5–7.

THE STUDY OF ACCURACY OF PROCESSING ON PRECISION PRODUCTION EQUIPMENT

© 2015

B.M. Gorskov, Doctor of Engineering, Associate Professor,
Head of the Department «Service of technical and technological systems»
O.J. Remneva, candidate of technical sciences,
assistant at the Department «Service of technical and technological systems»
Volga Region State University of Service, Togliatti (Russia)

Keywords: case blank; processing accuracy; misalignment; dot diagram.

Abstract: Metal-cutting machines involve complex production systems changing their parameters during the treatment process that results in degradation of processing accuracy. There are many factors influencing the processing accuracy but the main factor is the precision of production equipment. The potentialities of classical approaches to the machines accuracy increase have been practically exhausted and now they make no economic sense. That is why the article covering the study of accuracy of processing on precision production equipment is very important now.

The article describes the results of the study of accuracy of processing of deep holes using the 2A459AF4 precision horizontal coordinate boring machine.

The goal of the study is to prove the influence of elastic power deformations of the frame construction (bending and torsion) of precision horizontal coordinate boring machine on the processing accuracy.

The measurements of deviation from circular form of a hole were carried out on the base of a special unit under the conditions most closely resembling the real factory world. Basing on the results of the holes selection, the authors plotted the dot diagrams visually indicating the character of deviation of the processed hole axis during its processing. The authors determined that the value of the hole axis deviation in two perpendicular planes is an unstable quantity and depends on the position of moving elements of the machine processing system during the process of treatment. When the holes are located closer to the table reflector, the value of axis deviation reduces. The presence of elastic power deformations of the frame construction causes the blank part displacement and, subsequently, the processed hole axis deviation about the tool axis.

The study was carried out according to the own methods based on the following application software package: Kompas 3D V12, ANSYS Workbench, MathCAD.

Ю.В. Казаков, доктор технических наук, профессор,
профессор-консультант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства и пайки»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

А.В. Каплин, инженер

Н.А. Костюченко, инженер

С.А. Андреев, инженер

*Государственный научный центр –
Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград (Россия)*

Ключевые слова: сварка под давлением; изделия атомной техники; материаловедческие образцы; ВАХ.

Аннотация: В статье приводятся результаты исследования влияния повышенного давления аргона и гелия на технологические параметры сварочной дуги. Показаны примеры изделий атомной техники с повышенным внутренним давлением. Описан способ заполнения и особенности оборудования для герметизации изделий. Установка представляет собой камеру, в которой располагаются электрод и изделие. Дуга зажигается контактным способом с помощью электромагнита, который поднимает электрод совместно с началом процесса сварки. Особенностью источника питания для сварки является повышенное значение напряжения холостого хода. В ходе эксперимента проводилась сварка на медной пластине в среде гелия до 15 МПа и аргона до 10 МПа. Показано, что с ростом давления гелия на каждый 1 МПа в диапазоне токов 25...50 А напряжение на сварочной дуге возрастает на 1,6...2 В, что оказывает большое влияние на качество сварных швов малогабаритных изделий атомной техники. Показано, что при сварке в среде повышенного давления изменяется коэффициент формы шва. Определена оптимальная конструкция сварных соединений малогабаритных тонкостенных изделий атомной техники с повышенным внутренним давлением. Технологию сварки при повышенном давлении можно применять как при изготовлении изделий из склонных к порообразованию металлов, так и при исправлении дефектов сварного шва. Эксперимент по определению необходимого давления проводился на забракованных торцевых швах из сплава алюминия АД-1. Определено, что повторная сварка изделий из алюминия с браковочными порами при давлении гелия 0,6 МПа и выше устраняет дефекты.

ВВЕДЕНИЕ

Активные зоны исследовательских ядерных реакторов оснащаются широкой номенклатурой изделий: тепловыделяющие элементы, ампулы-накопители, датчики контроля и диагностики экспериментальных облучательных устройств, материаловедческие образцы. Конструкция таких изделий, как правило, ампульного типа и представляет собой тонкостенную оболочку с концевыми элементами, которые герметизируются сваркой [1; 2].

Специфика данных изделий проявляется в обязательном наличии под их оболочкой нормального или избыточного давления инертного газа (аргон, гелий). Это необходимо для различных целей: обеспечения устойчивости оболочки, улучшения теплопередачи в зазоре «стартового» продукта и оболочки, защиты продукта от окисления в результате его разогрева под действием облучения в процессе эксплуатации и облегчения процесса контроля герметичности изделий [2].

В некоторых изделиях требуется создание значительно большего по величине избыточного внутреннего давления инертного газа (16 МПа). Например, в экспериментальных материаловедческих образцах для внутриреакторных испытаний на радиационно-термическую ползучесть и усталостную прочность, которые используются для оценки работоспособности перспективных конструкционных материалов в условиях реакторного облучения. Создание внутреннего давления является одним из эффективных и в некоторых случаях единственно возможным способом задания необходимой нагрузки [3; 4].

Необходимо отметить, что к сварным соединениям изделий активных зон предъявляются высокие требова-

ния по сплошности, герметичности и формированию сварного шва. Соблюдение указанных требований обеспечивает работоспособность изделий при жестких условиях эксплуатации изделий в реакторных установках [5].

Применение способа дуговой сварки неплавящимся электродом при герметизации опытных изделий при повышенном давлении инертного газа, по сравнению с другими известными способами, является наиболее предпочтительным [6; 8]. При данном способе можно использовать несложное и надежное оборудование с выполнением оперативного контроля параметров процесса. Такой способ в случае необходимости легко реализуется при работе в дистанционных условиях радиационно-защитных камер и боксов.

Известно [7–10], что энергетический баланс дуги (напряжение, температура в столбе дуги и т. д.), горячей в атмосфере инертного газа под высоким давлением, сильно изменяется по сравнению с нормальными условиями. Это, в свою очередь, влияет на общее энерговыделение и стабильность горения сварочной дуги, а следовательно, и на качественное формирование сварного шва.

Ранее проводились исследования по изучению возможности сварки при повышенном давлении инертного газа (аргона и гелия) вплоть до 8...10 МПа [8; 10–14]. Однако отмечалось, что реализации данного способа сварки сопутствует ряд проблем: отсутствие стабильности горения дуги во время всего процесса сварки [15; 17] и отсутствие стабильности результата сварки – нужной геометрии сварного шва. Авторами статей [6; 10; 13] при исследовании вольт-амперной характеристики (ВАХ)

дуг, горящих под давлением в среде аргона и гелия при силе тока $I_{св}$ более 50 А, был сделан вывод, что повышение давления приводит к увеличению напряжения на дуге и, как следствие, зависимости общего энерговыделения от установочной длины. Также авторами статей [6; 12] отмечено, что повышение давления газовой среды влияет на сжатие сварочной дуги. В результате за счет сжатия анодного пятна на свариваемой области происходит увеличение выделяемого на изделии количества тепла. Изменение размеров катодного пятна приводит к необходимости проработки конструктивных элементов сварного соединения для обеспечения качественного формирования шва.

Изделия активных зон исследовательских реакторов в основном относятся к малогабаритным [4], и при их изготовлении используются небольшие токи (5...50 А). Отсутствие данных об изменении параметров сварки от давления в этом диапазоне приводит к необходимости исследования ВАХ для разработки технологии сварки.

Цель работы – повышение стабильности качества сварных соединений изделий атомной техники при повышенном (до 16 МПа) давлении инертных газов путем исследования вольт-амперной характеристики дуги и создания технологии сварки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментов по изучению ВАХ дуги при повышенном давлении использовалась установка герметизации тонкостенных цилиндрических оболочек (рис. 1), позволяющая проводить сварку стационарной дугой в среде инертных газов и их смесей при давлении до 20 МПа. Изделие (7) помещается в герметичную камеру (1), где заполняется инертным газом требуемого давления, после чего происходит заварка капилляра (6), и давление внутри изделия фиксируется.

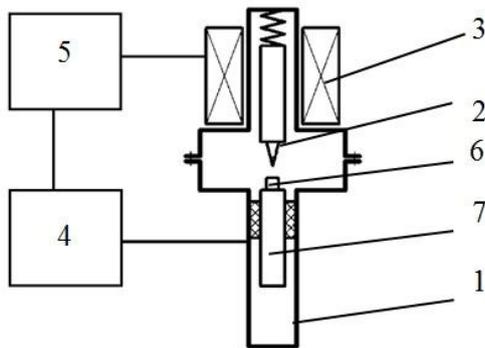


Рис. 1. Принципиальная схема процесса дуговой сварки в среде повышенного давления: 1 – камера; 2 – электрод; 3 – система электромагнитного подъяма электрода; 4 – система создания давления; 5 – источник питания; 6 – капилляр; 7 – изделие

Установка имеет ряд особенностей, обусловленных отличием сварки в газовой среде при повышенном давлении: повышенное напряжение холостого хода сварочного источника тока; специальную конструкцию сварочной камеры, позволяющую создать высокое

внутреннее давление газа и наблюдать за процессом сварки; контактный способ возбуждения дуги; регулировку времени сварки, тока сварки и установочной длины дуги.

Эксперимент по исследованию ВАХ дуги выполняли в среде гелия и аргона высокой чистоты. В качестве анода для изучения характеристик сварочной дуги была изготовлена медная подложка. Выбор материала подложки был обусловлен необходимостью исключения влияния расплавленного металла на ионизацию дугового промежутка. В эксперименте был исследован наиболее практикующим применительно к конструкциям сварных соединений изделий активных зон ядерных реакторов диапазон сварочного тока 5...50 А. В связи с тем что в подавляющем большинстве изделий активных зон используется гелий, ВАХ дуги для него исследовалась шире. Давление гелия изменяли от атмосферного давления до 16 МПа, аргона – от 1 до 10 МПа. Длину дуги при сварке в гелии изменяли от 1 до 4 мм с шагом в 1 мм и от 1 до 2 мм при сварке в аргоне. Во время эксперимента контролировались давление в камере и параметры режима сварки ($I_{св}$, $U_{д}$, $L_{д}$, $t_{св}$).

Анализ результатов (рис. 2, 3) проведенных экспериментов показал, что повышение давления приводит не только к росту напряжения на дуге, но и к смещению положения отдельных участков ВАХ дуги. Изменение формы ВАХ дуги ярче выражено в среде гелия, что, по видимому, связано не только с высоким потенциалом ионизации атомов гелия, но и с высокой теплопроводностью газа, причем эффект повышения напряжения на дуге максимален при минимальной силе тока.

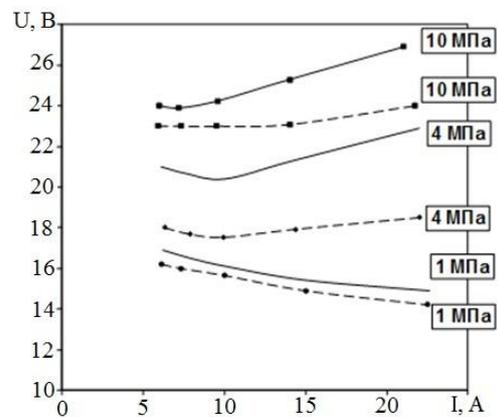


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики дуг, горящих в аргонепод различного давлением при длине дуги 1 мм (---) и 2 мм (—)

При силе тока 5–50 А характерны участки практически постоянного напряжения. Диапазон силы тока, соответствующий этим участкам, будет оптимальным для проведения сварки изделий. Дуговой промежуток желательно устанавливать минимальным (1–2 мм) для расширения пределов регулирования режимов сварки. Повышение энерговыделения дуги следует учитывать при расчете параметров сварки в среде повышенного давления и вносить соответствующую корректировку в полную тепловую мощность дуги.

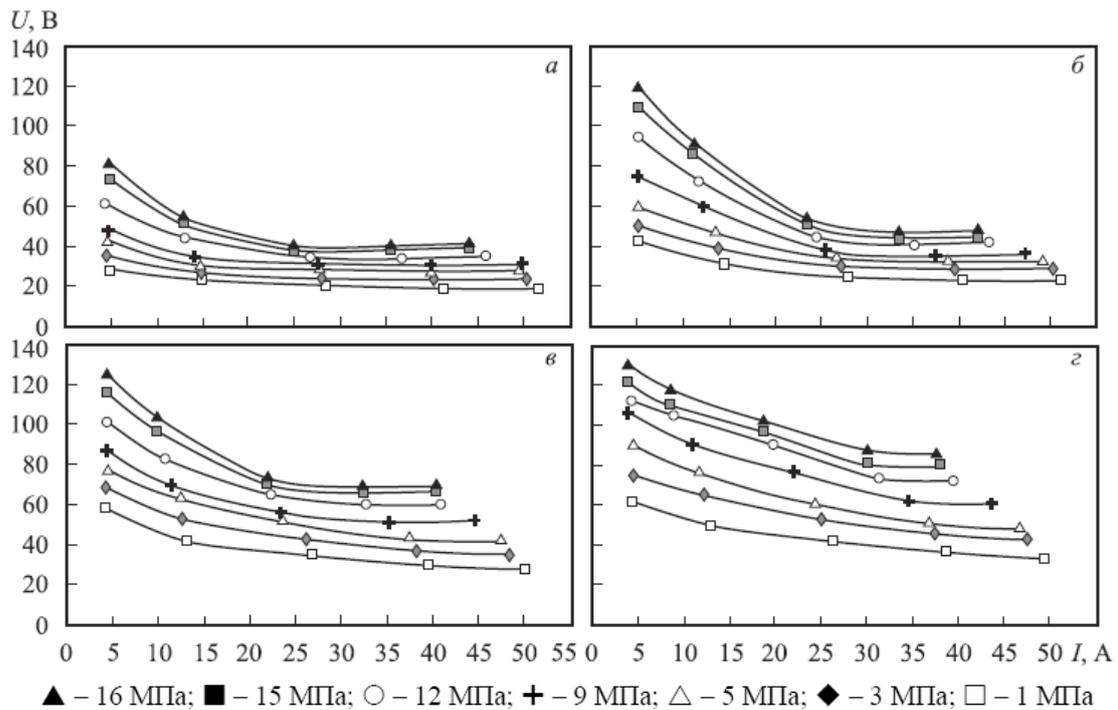


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики дуг, горящих в гелии под различным давлением при длине дуги 1 мм (а), 2 мм (б), 3 мм (в), 4 мм (г)

Помимо увеличения количества расплавленного металла при повышении давления вследствие большего энерговыделения с ростом напряжения на дуге меняется коэффициент формы шва (рис. 4).

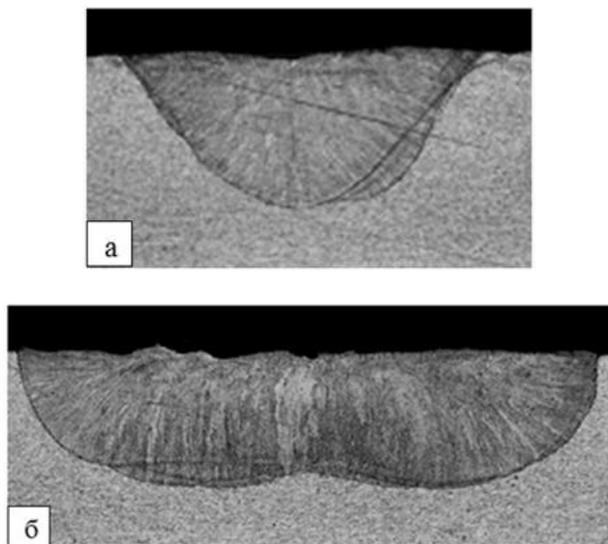


Рис. 4. Результаты металлографического исследования сварных швов, выполненных на одних режимах сварки ($I_{св}$, L_0) при разном давлении гелия ($x50$): а – 0 атм; б – 100 атм

Также был проведен эксперимент по изучению влияния изменения дугового промежутка на диаметр анодного пятна при высоком давлении гелия. Во время эксперимента при постоянном давлении $P=15$ МПа,

сварочном токе $I_{св}=15$ А и времени сварки $t_{св}=0,4$ с изменяли только длину дуги – от 1 до 4 мм. Показано, что с изменением длины дуги от 1 до 4 мм диаметр анодного пятна изменялся от 4,3 до 4,8 мм. Несмотря на рассредоточенное воздействие дуги, глубина проплавления при этом изменилась примерно в 1,7 раза и составила соответственно 1,2 и 2,0 мм. Известно [16], что с увеличением длины дуги эффективная тепловая мощность дуги снижается, наблюдается рассредоточение мощности, вводимой в основной металл. Полученные данные говорят о том, что с увеличением длины дуги в среде повышенного давления гелия эффективная тепловая мощность дуги, напротив, возрастает, несмотря на высокую теплопроводность газа. Это подтверждает тот факт, что увеличение длины дуги и ее сжатие при высоком давлении приводят к росту общего энерговыделения дуги и увеличению количества теплоты, выделяемой на изделии.

Длина дуги и давление инертного газа являются основными параметрами при сварке и оказывают значительное влияние на стабильное формирование сварного шва. Пренебрежение повышением энерговыделения с ростом давления может привести к нарушению качественного формирования сварного шва (рис. 5).

Широко используемая в производстве изделий активных зон технология герметизации оболочек твэлов методом оплавления их торца [1; 2] приводит к изменению длины дуги в процессе сварки из-за большого приращения усиления шва заглушки (рис. 6 а). При высоком давлении незначительное изменение длины дуги (0,5–1,5 мм) приведет к заметному изменению напряжения на дуге и, соответственно, к изменению общего энерговыделения при сварке. Последствием такого изменения может стать нарушение формы сварного шва (усиление, наплывы, смещение купола).

Наиболее простым решением задачи создания избыточного давления инертного газа внутри тонкостенной цилиндрической оболочки может стать сварка капилляра заглушки, приваренной к оболочке (рис. 6 б). Приращение высоты сварного шва в данном случае минимально, следовательно, величина дугового промежутка сохранит свои размеры. Это позволяет стабилизировать процесс энерговыделения при сварке. Ввиду малого диаметра капилляра для сварки требуется значительно меньшая сила тока, чем для полного оплавления всего торца заглушки, имеющей большой диаметр (рис. 6 а). Все эти факторы за счет возможности переплавления меньшей массы металла обеспечивают более простой, с технической точки зрения, способ управления качеством формирования шва.



Рис. 5. Внешний вид сварных соединений, выполненных на одних режимах сварки ($I_{св}=30$ А; $L_0=1$ мм) при разном давлении гелия: а – 0,3 МПа; б – 15 МПа

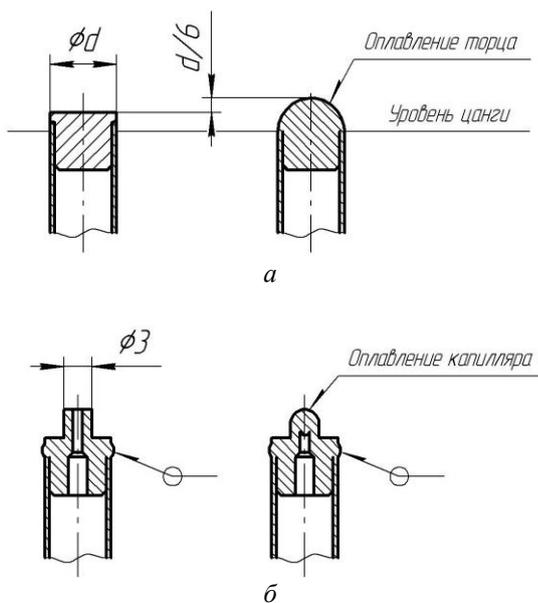


Рис. 6. Конструкции сварных соединений, предназначенные для оплавления торца заглушки (а) и оплавления торца капилляра, приваренного к оболочке (б), до и после герметизации

Оценка размера анодного пятна и глубины проплавления показала, что оптимальной конструкцией сварного соединения является капилляр с внешним диаметром 2,5...3,5 мм и внутренним 0,5...1 мм.

Технологию сварки при повышенном давлении можно применять как при изготовлении изделий из склонных к порообразованию металлов, так и при исправлении дефектов сварного шва.

При изготовлении изделий активной зоны ядерных реакторов часто используются алюминий и его сплавы (АД1, АД0). При этом часто необходимо исправлять дефекты сварных соединений с помощью повторной сварки, которая не всегда приводит к уменьшению пор, и количество таких сварок ограничено стандартами изготовления изделий.

Известно [18–20], что повышенное давление над сварочной ванной позволяет предотвратить или подавить развитие и рост пор в расплавленном металле. Однако данные о необходимом давлении для исправления уже сформировавшихся дефектов отсутствуют. Для выявления необходимого давления был проведен эксперимент на отбракованных (по порам) торцовых сварных соединениях цилиндрической формы из сплава АД-1 диаметром 5 мм. Параметры режимов повторной сварки: ток сварки 140 А, время сварки 0,8 с, среда – гелий, давление от 0,1 до 0,6 МПа. Качество оценивалось рентгенографическим методом. В результате (рис. 7) эксперимента установлено, что при давлении 0,6 МПа и выше поры полностью устраняются.

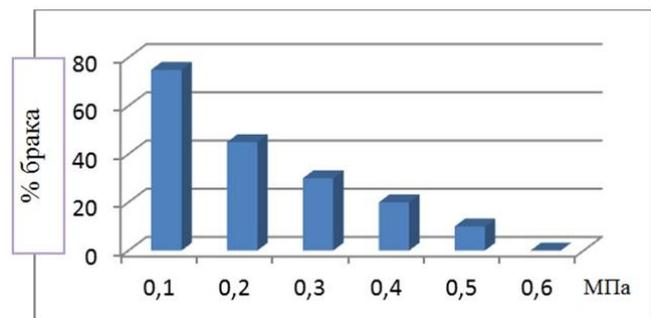


Рис. 7. Зависимость количества забракованных после повторной сварки изделий от внешнего давления

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При изготовлении изделий активных зон ядерных реакторов в среде повышенного давления для наиболее практикуемого диапазона токов 25...50 А длину дуги следует выбирать минимальной (1...2 мм), при этом напряжение на дуге возрастает на 1,6...2 В с увеличением давления на 1 МПа.

2. Для обеспечения избыточного давления инертного газа внутри тонкостенной цилиндрической оболочки обоснована и выбрана конструкция сварного соединения, представляющая собой капилляр заглушки приваренной к оболочке с внешним диаметром 2,5...3,5 мм и внутренним 0,5...1 мм.

3. Определено, что повторная сварка изделий из алюминия с браковочными порами при давлении гелия 0,6 МПа и выше устраняет дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1 / под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 316 с.
2. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 2 / под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат 1995. 334 с.
3. Рогозянов А.Я. Закономерности и модели многокомпонентной термической и радиационно-термической ползучести оболочечных труб из циркониевых сплавов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002. 46 с.
4. Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Каплин А.В. Опыт применения сварки плавлением при изготовлении изделий активных зон ядерных реакторов в дистанционных условиях // Сварочное производство. 2013. № 2. С. 38–42.
5. Казаков Ю.В., Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Мирошниченко Г.В., Каплин А.В. Некоторые особенности сварки малогабаритных изделий исследовательских ядерных реакторов // Металлургия сварки и сварочные материалы: сб. докладов науч.-практ. семинара. СПб.: СПбГПУ, 2013. С. 215–222.
6. Бровко В.В., Агафонов В.И., Мирошниченко Г.В., Зинковский В.И. Сварка под давлением облученных оболочек тепловыделяющих элементов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерная техника и технология. 1989. Вып. 4. С. 6–10.
7. Дьяченко В.В., Ольшанский А.Н. Влияние давления контролируемой атмосферы на основные параметры процесса сварки // Сварочное производство. 1989. № 11. С. 18–21.
8. Бровко В.В., Харлов А.Б., Мирошниченко Г.В. Особенности сварочной дуги при сварке неплавящимся электродом в инертном газе высокого давления // Сварка и диагностика. 2010. № 3. С. 45–49.
9. Рябиченко Б.Р., Андреев М.П., Щавелев Л.Н., Татарин В.Р. О некоторых особенностях процесса сварки с повышенным давлением гелия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Сварка в ядерной технологии. 1989. Вып. 4. С. 7–9.
10. Suga Yasuo, Nasui Atsushi. On Arc Characteristics in High Pressure Helium Atmosphere // Quarterly Journal of The Japan Welding Society. 1988. Vol. 6. № 1. P. 86–91.
11. Allum C.J. Mechanisms of power dissipation in the column of high pressure argon-tungsten arcs // Welding Journal. 1983. Vol. 62. № 12. P. 356–360.
12. Hiraoka Kazuo, Okado Okira, Inagaki Michio. Effect of helium arc characteristics tungsten arc welding shielding gas // Quarterly Journal of The Japan Welding Society. 1985. Vol. 3. № 2. P. 241–246.
13. Allum C.J. The high pressure arc // The Characteristics and Structure of High Pressure (1–42 bars) Gas Tungsten Arcs. Cranfield Institute of Technology. School of Industrial Science, 1982. P. 212–536.
14. Farver Alward, Forneris Glullo, Winkler Reinhard. Le miscelargon-elio nella saldatura di leghe leggere // Riv. mecc. 1988. Vol. 38. № 918. P. 72–74.
15. Ольшанский А.Н., Клещев С.И., Сергеев А.Л. Повышение стабильности дугового разряда при высоких давлениях инертного газа // Ресурсосберегающие прогрессивные технологии в сварочном производстве для машиностроительного комплекса. М.: Знание, 1989. С. 56–59.
16. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов. Минск: Вища школа, 1976. 424 с.
17. Рябиченко Б.Р., Татарин В.Р., Щавелев Л.Н., Дорожкин В.Г. Исследование процесса возбуждения дуги при сварке с повышенным давлением гелия // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Сварка в ядерной технологии. 1986. Вып. 2. С. 51–53.
18. Ольшанский А.Н., Морозов Б.П. Оценка влияния повышенного давления защитного газа на снижение пористости сварных соединений из алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 2003. № 11. С. 8–11.
19. Табакин Е.М. Иванович Ю.В., Байкалов В.И. Оценка возможности снижения порообразования в сварных соединениях оболочек из дисперсионно-упрочненных сталей ферритного и мартенситного класса // Сборник трудов НИИАРа. 2004. Вып. 2. С. 38–43.
20. Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Байкалов В.И. Особенности сварки плавлением оболочек из дисперсионно-упрочненных сталей применительно к конструкции тепловыделяющих элементов реакторов на быстрых нейтронах // Сварочное производство. 2005. № 5. С. 3–7.

REFERENCES

1. Reshetnikov F.G., ed. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovidelayushchikh energeticheskikh reaktorov* [Development, production and operation of heat-generating elements of power reactors]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1995, vol. 1, 316 p.
2. Reshetnikov F.G., ed. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovidelayushchikh energeticheskikh reaktorov* [Development, production and operation of heat-generating elements of power reactors]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1995, vol. 2, 334 p.
3. Rogozyanov A.Ya. *Zakonomernosti i modeli mnogokomponentnoy termicheskoy i radiatsionno-termicheskoy polzuchesti obolochechnikh trub iz tsirkonievikh spлавov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Regularities and models of multicomponent thermal and radiation-thermal creeping of encased pipes made of zirconium alloys]. Moscow, 2002, 46 p.
4. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Kaplin A.V. Experience of application of fusion welding when producing the elements of nuclear reactor cores in remote environments. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 2, pp. 38–42.
5. Kazakov Yu.V., Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Miroshnichenko G.V., Kaplin A.V. Some peculiarities of welding of small-size elements of research nuclear reactors. *Sbornik докладов nauchno-prakt. seminarov "Metallurgiya svarki i svarochnie materialy"*. S. Peterburg, SPbGPU publ., 2013, pp. 215–222.
6. Brovko V.V., Agafonov V.I., Miroshnichenko G.V., Zinkovsky V.I. Pressure welding of irradiated claddings of heat-generating elements. *Voprosi atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Yadernaya tekhnika i tekhnologiya*, 1989, no. 4, pp. 6–10.

7. Dyachenko V.V., Olshansky A.N. Influence of controlled atmosphere pressure on the key parameters of welding process. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1989, no. 11, pp. 18–21.
8. Brovko V.V., Kharlov A.B., Miroshnichenko G.V. Peculiarities of welding arc during the welding with non-consumable electrode in the high pressure inert gas. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 45–49.
9. Ryabichenko B.R., Andreev M.P., Shchhavelev L.N., Tatarinov V.R. About some peculiarities of welding processes with the helium high pressure. *Voprosi atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Yadernaya tekhnika i tekhnologiya*, 1989, no. 4, pp. 7–9.
10. Suga Yasuo, Hasui Atsushi. On Arc Characteristics in High Pressure Helium Atmosphere. *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 1988, vol. 6, no. 1, pp. 86–91.
11. Allum C.J. Mechanisms of power dissipation in the column of high pressure argon-tungsten arcs. *Welding Journal*, 1983, vol. 62, no. 12, pp. 356–360.
12. Hiraoka Kazuo, Okado Okira, Inagaki Michio. Effect of helium arc characteristics tungsten arc welding shielding gas. *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, 1985, vol. 3, no. 2, pp. 241–246.
13. Allum C.J. The high pressure arc. *The Characteristics and Structure of High Pressure (1–42 bars) Gas Tungsten Arcs*. Cranfield Institute of Technology. School of Industrial Science, 1982, pp. 212–536.
14. Farver Alfward, Forneris Gullio, Winkler Reinhard. Le misceleargon-elio nella saldatura di leghe leggere. *Riv. mecc.*, 1988, vol. 38, no. 918, pp. 72–74.
15. Olshansky A.N., Kleshcheev S.I., Sergeev A.L. The improvement of arc discharge stability within the inert gas high pressures. *Resursosberegayushchie progressivnie tekhnologii v svarochnom proizvodstve dlya mashinostroitel'nogo kompleksa*. Moscow, Znanie publ., 1989, pp. 56–59.
16. Bagryansky K.V., Dobrotina Z.A., Khrenov K.K. *Teoriya svarochnikh protsessov* [Welding processes theory]. Minsk, Vishcha shkola publ., 1976, 424 p.
17. Ryabichenko B.R., Tatarinov V.R., Shchhavelev L.N., Dorozhkin V.G. Study of the process of arc agitation during helium high pressure welding. *Voprosi atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Svarka v yadernoy tekhnologii*, 1986, no. 2, pp. 51–53.
18. Olshansky A.N., Morozov B.P. Estimation of the influence of shielding gas increased pressure on the reduction of porosity of aluminum alloys welding joints. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 11, pp. 8–11.
19. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Baykalov V.I. Estimation of possibility of decrease of pore formation in welding joints of claddings made of dispersion-hardened steels of ferritic and martensitic grades. *Sbornik trudov NIIPa*, 2004, no. 2, pp. 38–43.
20. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Baykalov V.I. Peculiarities of fusion welding of claddings made of dispersion-hardened steels relating to the structure of heat-generating elements of fast reactors. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2005, no. 5, pp. 3–7.

THE TECHNOLOGY OF ARC WELDING OF SMALL-SIZE COMPONENTS OF NUCLEAR PLANTS UNDER THE SHIELDING GAS HIGH-PRESSURE

© 2015

Y.V. Kazakov, Doctor of Engineering, Professor,
professor-counsellor of the Department «Equipment and technology of welding and soldering»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

A.V. Kaplin, engineer

N.A. Kostyuchenko, engineer

S.A. Andreev, engineer

State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, Dimitrovgrad (Russia)

Keywords: pressure welding; nuclear plants components; material research samples; volt-ampere characteristic.

Abstract: The article presents the results of research of the influence of argon and helium high pressure on the welding arc process parameters and the samples of nuclear plants components with the increased internal pressure. The authors described the method for filling up and the special features of equipment for the components sealing. The installation is a chamber where the electrode and the product are placed. The arc is stricken by contact process with electromagnet that rises the electrode simultaneously with the welding process start. The increased value of the no-load voltage is the feature of welding power source. The experiment was carried out on the copper plate welded in the up to 15 MPa helium and up to 10MPa argon environment. The research showed that with the helium pressure moving higher for each 1 MPa in the currents range of 25...50 A the welding arc voltage increases by 1,6...2 V. It influences much the quality of welding seams of small-size components of nuclear plants. The research showed that the weld geometry factor changes when welding in the increased pressure environment. The authors specified the optimal design of welded joints of small-size thin-walled nuclear plants components with the increased internal pressure. The technology of increased pressure welding can be used both for production of components made of pore-formation sensitive metals and for welding seam defects repair. The experiment on determination of required pressure was carried out on the rejected edge welds made of AD-1 aluminum alloy. The research showed that the rewelding of aluminum components with the rejecting pores at helium pressure of 0,6 MPa and higher corrects the defects.

Е.С. Киселев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»

М.В. Назаров, магистрант кафедры «Технология машиностроения»

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: твердый сплав; твердосплавные стержни; остаточные напряжения; поверхностный слой; полусинтетическая термопара; регрессионная модель.

Аннотация: Рассмотрены вопросы обеспечения качества твердосплавных инструментов и деталей при их изготовлении путем рационального использования энергии ультразвуковых колебаний. Общеизвестно, что одним из основных показателей качества поверхностного слоя деталей или инструментов является отсутствие растягивающих остаточных напряжений. Особенно это важно для инструментов, используемых для высокоскоростной обработки заготовок из алюминиевых сплавов, которые не подвергаются нанесению износостойких покрытий, а также для буровых коронок и различных твердосплавных деталей, находящих все большее применение в современных машинах и механизмах. Как правило, заготовки для их изготовления на заключительных стадиях технологического процесса подвергаются шлифованию, после которого неизбежно возникновение растягивающих остаточных напряжений. Для их релаксации в действующем производстве используют термическую обработку или естественное старение, что увеличивает производственный цикл и себестоимость изготовления.

Авторами предложено для этой цели использовать энергию ультразвукового поля, для чего были разработаны оригинальные установки и проведены исследования. В ходе исследований получены регрессионные зависимости остаточных напряжений от параметров теплосилового напряженности (составляющих сил резания и контактной температуры в зоне плоского алмазного шлифования образцов из ультрамелкодисперсного твердого сплава) и элементов режима обработки (скорости продольной подачи стола и глубины резания). Остаточные напряжения контролировали с помощью отечественного рефрактометра «Рикор-4». В процессе обработки осуществляли оценку и структурно-фазовым превращениям в поверхностном слое (с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-7»). Результаты исследований позволили установить скорость ультразвуковой релаксации и установить элементы ее режима.

Все более широкое распространение в России и мире в металлообработке и горной промышленности получает использование современных конструкций твердосплавных инструментов и деталей, отличающихся повышенной прочностью, а также жесткостью и износостойкостью. Такие инструменты и детали изготавливают из твердосплавных стержней диаметром 0,5...50 и более мм. Современные твердые сплавы характеризуются малым размером зерна D_{WC} карбидов вольфрама (WC): $D_{WC}=0,2...0,8$ мкм. С уменьшением размера зерна WC, увеличиваются твердость и прочность и уменьшаются вязкость разрушения и теплопроводность [1–4]. При этом меньшая теплопроводность вызывает и меньшее сопротивление тепловому удару [5; 6].

До недавнего времени цельные твердосплавные осевые инструменты и детали в нашей стране изготавливали на универсальном оборудовании за 10–12 операций [7].

Обеспечение заданных эксплуатационных характеристик при изготовлении подобных деталей и инструментов, в которых возникающие из-за теплосилового напряженности поверхностного слоя технологические остаточные напряжения (как правило, растягивающие) способны вызывать существенные качественные изменения, представляется сложной технологической задачей [8; 9].

На практике это выливается в необходимость существенно снижать элементы режима, а в некоторых случаях даже подбирать опытным путем последовательность изготовления. Обработку твердосплавных заготовок деталей в настоящее время чаще всего ведут на современных многоцелевых обрабатывающих центрах, заготовок инструментов – на пятикоординатных шлифовально-заточных станках с ЧПУ, для которых подобные потери производительности недопустимы [7].

Наличие растягивающих технологических остаточных напряжений (ТОН) в поверхностном слое деталей из твердых сплавов способно в значительной мере уменьшить усталостную прочность. В твердосплавных режущих инструментах и в буровых коронках – приводит к снижению периода стойкости и износостойкости. Последнее особенно актуально при снятии припусков с заготовок из алюминиевых сплавов, режущие инструменты для обработки которых не подвергаются нанесению износостойких покрытий [1; 7]. Имеется предположение, что наличие в поверхностном слое ТОН любого знака способствует отслаиванию износостойких покрытий.

Общеизвестно, что существенно снизить теплосиловую напряженность в зоне контакта режущего инструмента с заготовкой (а следовательно, уменьшить вероятность возникновения нежелательных остаточных напряжений) можно наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) на элементы технологической системы и смазочно-охлаждающую жидкость [10–15].

Однако уменьшать ТОН можно как сразу после окончательной обработки заготовки, обычно являющейся наиболее теплонапряженной, так и в ходе всего технологического процесса изготовления детали. Традиционно используемые методы связаны либо с большими временными (естественная релаксация), энергетическими (термическая релаксация) и материальными затратами (экспериментальный подбор элементов режима и последовательности обработки), либо с существенными трудностями при обработке маложестких заготовок (поверхностно-пластическое деформирование). Весьма перспективным является использование для релаксации ТОН энергии ультразвукового (УЗ) поля [15–20].

До настоящего времени весьма сложным является определение рационального места расположения операции релаксации ТОН в технологическом процессе (ТП) изготовления деталей [12]. Во многом это связано с необходимостью учета явления технологической наследственности (ТН). Последнее оказывает существенное влияние на уровень ТОН в готовых деталях. Отсутствие теории, практических рекомендаций и методик учета явления ТН затрудняет разработку оптимальных ТП изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов с заданными эксплуатационными свойствами. Решение данных проблем позволяет повысить точность обработки, уменьшить длительность технологического цикла и снизить себестоимость изготовления деталей.

Выяснение, насколько значимы для практики высказанные предположения, было целью выполненных экспериментальных исследований. Исследования выполняли в два этапа.

На первом этапе выявляли взаимосвязь между элементами режима окончательной обработки (алмазное шлифование кругом АСР100/20-61-00-61,0 с окружной скоростью $V_k=24$ м/с и поперечной подачей стола 2 мм/мин на плоскошлифовальном станке 3Е710) и технологическими остаточными напряжениями в поверхностном слое образцов из однокарбидного твердого сплава RX10-NG (WC 90 %, Co 10 %, $D_{wc}=0,5...0,8$ мкм,

изготовитель – фирма Hartmetall Carduro Radiament, Швейцария, Чехия). Шлифование осуществляли с подачи к зоне контакта круга с заготовкой 10 %-ной водной синтетической смазочно-охлаждающей жидкости Simtech 500 (Нидерланды) с расходом 10 л/мин. Технологические остаточные напряжения σ МПа, определяли с помощью рентгеновского измерительного комплекса «Рикор-4» (Россия). В процессе исследований контролировали контактную температуру в зоне шлифования T_k °С, методом полусинтетической термомпары. С устройства для измерения контактной температуры сигнал поступал на аналогово-цифровой преобразователь АЦП/ЦАП 16/16 SigmaUSB с усилителем, передающим его на персональный компьютер. Затем при помощи специального программного обеспечения ZetLab информация обрабатывалась и выводилась на экран монитора в графическом и численном видах. Аналогичным образом с помощью динамометра УДМ-100 производили измерения составляющих силы резания P_y и P_z .

Исследования проводили по многофакторному плану. Условия проведения и результаты исследований приведены в табл. 1, 2.

Регрессионные зависимости в кодированном виде могут быть представлены следующим образом:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3.$$

Таблица 1. Условия проведения и результаты исследований

№ п/п	Скорость продольной подачи V_s , мм/мин	Глубина резания t , мм	P_y , Н	P_z , Н	T_k , °С	σ , МПа
1.1	750	0,01	58,48	12,75	686	591
1.2	750	0,01	58,38	13,10	677	580
1.3	750	0,01	58,46	13,14	681	569
2.1	750	0,02	72,17	22,12	777	673
2.2	750	0,02	72,13	22,18	775	681
2.3	750	0,02	72,18	22,04	780	679
3.1	950	0,01	62,81	13,32	732	645
3.2	950	0,01	63,07	13,28	727	649
3.3	950	0,01	62,86	13,24	728	648
4.1	950	0,02	76,03	24,06	909	729
4.2	950	0,02	75,96	24,02	903	716
4.3	950	0,02	76,26	24,14	915	740

Таблица 2. Результаты исследований эффективности УЗ релаксации ТОН в поверхностных слоях твердосплавных заготовок

№ сер.	Исходный уровень ТОН, МПа	Время воздействия УЗК, с	Уровень ТОН после воздействия, МПа
1.1	582	10	554
1.2	561	30	488
1.3	579	90	392
2.1	678	10	657
2.2	672	30	591
2.3	669	90	501
3.1	730	10	679
3.2	717	30	589
3.3	725	90	456

По результатам выполненных исследований в натуральном виде для определения технологических остаточных напряжений получена зависимость от контактной температуры и составляющих сил шлифования:

$$\sigma = -287,22 + 14,37P_y - 12,50P_z + 0,15T_k.$$

При этом коэффициент корреляции составил $K_k = 0,97456$, а среднеквадратический коэффициент корреляции $K_{ск} = 0,971517$.

На практике удобнее пользоваться зависимостью от элементов режима шлифования:

$$\sigma = 273,59 + 8933,35t + 0,30V_s.$$

В этом случае получены следующие значения коэффициентов корреляции: $K_k = 0,9888$; $K_{ск} = 0,9778$.

Как следует из результатов выполненных исследований, в поверхностном слое заготовок из твердого сплава даже при алмазном шлифовании на щадящих режимах обработки возникают технологические остаточные напряжения растяжения. В реальном производстве изготовления режущих твердосплавных инструментов (например, на станках WALTER HELITONIC POWER), буровых коронок и твердосплавных деталей, как показывает выполненный анализ существующих технологий на отечественных предприятиях ОАО «НПК ХАЛТЕК» (Ульяновск) и ОАО «ВОЛГОбУР-МАШ» (Самара), используемые элементы режима обработки отличаются существенно большей теплосиловой напряженностью. Поэтому существует большая вероятность, что в новых инструментах и деталях из твердых сплавов в поверхностном слое имеются растягивающие остаточные напряжения. Следует учитывать, что временная релаксация ТОН маловероятна вследствие высокой температуры плавления твердых сплавов, а термическая связана с большими экономическими затратами. Поэтому на втором этапе исследований после обработки заготовок на плоскошлифовальном станке их подвергали ультразвуковой релаксации.

УЗ релаксация осуществлялась на установке, созданной на базе плоскошлифовального станка. Схема установки представлена на рис. 1.

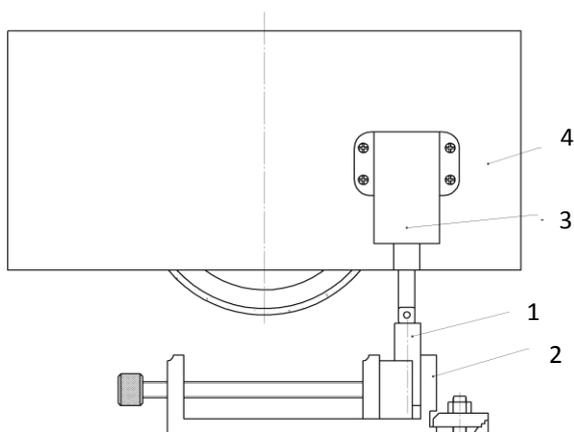


Рис. 1. Схема установки для УЗ релаксации ТОН в ПС заготовки: 1 – заготовка, 2 – приспособление, 3 – УЗ волновод, 4 – кожух шлифовального круга

Во время исследований УЗ волновод подводился до касания к обработанной поверхности заготовки с помощью микрометрической системы станка. Для экспериментов использовали образцы со средним исходным уровнем ТОН в 574 (серия 1), 671 (серия 2) и 724 (серия 3) МПа. Время воздействия УЗ колебаний составляло 10, 30 и 90 секунд.

Анализ полученных результатов показал, что использование энергии УЗ поля для релаксации ТОН в заготовках из твердых сплавов эффективно уже при времени «озвучивания» в 10 секунд: при скорости релаксации от 2 до 5 МПа/с уровень ТОН в поверхностном слое заготовок уменьшается до 7% от первоначальной величины. С увеличением времени «озвучивания» до 1,5 минуты эффективность УЗ релаксации возрастает до 37%. При этом отмечается, что эффективность тем выше, чем больше исходный уровень ТОН.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что важным резервом повышения качества твердосплавных деталей и инструментов является включение в техпроцесс их изготовления операции УЗ релаксации технологических остаточных напряжений.

Исследования проведены в рамках выполнения гранта РФФИ по проекту 14-08-01059.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фальковский В.А., Боровский В.Г. Твердые сплавы на основе карбида вольфрама с нанозернистой и ультратонкой структурой // Цветные металлы. 2010. № 5. С. 106–112.
2. Lu F.X., Tang W.Z., Tong Y.M., Miao J.Q., Li C.M., Chen G.C. Novel pretreatment of hard metal substrate for better performance of diamond coated cutting tools // Diamond and Related Materials. 2006. Vol. 15. № 11-12. P. 2039–3045.
3. Фальковский В.А., Фальковский Ф.И., Панов В.С. Нано- и ультрадисперсные твердые сплавы // Цветные металлы. 2007. № 10. С. 85–91.
4. Гусев А., Курлов А. Твердые сплавы сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2005. № 2. С. 42–45.
5. Кирсанов С.В. Цельные твердосплавные осевые режущие инструменты // Приложение к журналу «Справочник. Инженерный журнал». 2012. № 3. С. 2–23.
6. Фальковский В.А., Клячко Л.Н. Твердые сплавы. М.: Руда и металлы, 2005. 416 с.
7. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Справочник инструментальщика. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.
8. Guo G., Malkin S. Heat transfer in grinding // Journal of material Processing and Manufacturing Science. 1990. Vol. 1. P. 16–27.
9. Малыгин Г.А. Процессы самоорганизации дислокаций и пластичность кристаллов // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 9. С. 1008–1010.
10. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
11. Киселев Е.С. Повышение эффективности механической обработки путем использования энергии маломощных модулированных ультразвуковых колебаний // Научные технологии механической обработки в машиностроении. 2013. № 6. С. 3–13.

12. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепло-массопереноса // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. М.: РАН, 2008. 250 с.
13. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
14. Киселев Е.С., Малышев В.И., Ковальногов В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин. Тольятти: ТГУ, 2015. 312 с.
15. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и в технике. М.: Иностранная литература, 1957. 726 с.
16. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
17. Селиванов А.С., Малышев В.И. Комплекс математических моделей дислокационно-энергетического состояния поверхностного слоя при ультразвуковом выглаживании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2. С. 68–73.
18. Зарембо Л.Н., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 519 с.
19. Вагапов И.К., Ганиев М.М., Шинкарев А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование динамики ультразвуковой вибрационной системы с промежуточным бойком // Известия вузов. Машиностроение. 2008. № 5. С. 3–24.
20. Ганиев М.М., Вагапов И.К., Шинкарев А.С. Экспериментальное исследование ударной обработки ультразвуковым инструментом с промежуточным бойком // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 41–44.
7. Borovskiy G.V., Grigoryev S.N., Maslov A.R. *Spravochnik instrumentalschchika* [Reference book of tool-maker]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005, 464 p.
8. Guo G., Malkin S. Heat transfer in grinding. *Journal of material Processing and Manufacturing Science*, 1990, vol. 1, pp. 16–27.
9. Malygin G.A. Dislocation self-organization processes and crystal plasticity. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1999, vol. 169, no. 9, pp. 1008–1010.
10. Kumabe D. *Vebratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 424 p.
11. Kiselev E.S. Improvement of mechanical processing efficiency using the energy of low-power modular ultrasonic fluctuations. *Naukoemkie tekhnologii mekhanicheskoy obrabotki v mashinostroenii*, 2013, no. 6, pp. 3–13.
12. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. Mechanical processing of blank parts in the critical heat and mass transfer. *Izbrannye trudy Rossiyskoy shkoly po problemam nauki i tekhnologii*. Moscow, RAN publ., 2008, 250 p.
13. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ratsionalnim ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Intensification of mechanical processing using the rational application of ultrasonic field power]. Ulyanovsk, UIGTU publ., 2003, 186 p.
14. Kiselev E.S., Malyshev V.I., Kovalnogov V.N. *Novye ultrazvukovye tekhnologii izgotovleniya detaley mashin* [New ultrasonic technologies of machine parts production]. Tolyatti, TGU publ., 2015, 312 p.
15. Bergman L. *Ultrazvuk i ego primeneniye v nauke i v tekhnike* [Ultrasound and its application in science and engineering]. Moscow, Inostrannaya literature publ., 1957, 726 p.
16. Golyamina I.P., ed. *Ultrazvuk. Malenkaya entsiklopediya* [Ultrasound. Small encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya publ., 1979, 400 p.
17. Selivanov A.S., Malyshev V.I. Complex of mathematical models of the dislocation structure and power condition of surface layers at ultrasonic peening. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 68–73.
18. Zarembo L.N., Krasilnikov V.A. *Vvedeniye v nelineynuyu akustiku* [Introduction to non-linear acoustics]. Moscow, Nauka publ., 1966, 519 p.
19. Vagapov I.K., Ganiev M.M., Shinkarev A.S. Theoretical and experimental research of dynamics of ultrasonic vibration anvil-block system. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2008, no. 5, pp. 3–24.
20. Ganiev M.M., Vagapov I.K., Shinkarev A.S. Experimental studies of the impulsive ultrasonic machining by a tool with an intermediate striker. *Russian Aeronautics*. 2008, vol. 51, no. 4. pp. 407–413.

REFERENCES

1. Falkovskiy V.A., Borovskiy V.G. Hard alloys based on tungsten carbide with nanograined and ultra-fine structure. *Tsvetnye metally*, 2010, no. 5, pp. 106–112.
2. Lu F.X., Tang W.Z., Tong Y.M., Miao J.Q., Li C.M., Chen G.C. Novel pretreatment of hard metal substrate for better performance of diamond coated cutting tools. *Diamond and Related Materials*, 2006, vol. 15, no. 11-12, pp. 2039–3045.
3. Falkovskiy V.A., Falkovskiy F.I., Panov V.S. Nano- and ultradisperse hard alloys. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 10, pp. 85–91.
4. Gusev A., Kurlov A. Hard alloys today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2005, no. 2, pp. 42–45.
5. Kirsanov S.V. Solid hard-alloy rotary cutting tools. *Prilozheniye k zhurnalu "Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal"*, 2012, no. 3, pp. 2–23.
6. Falkovskiy V.A., Klyachko L.N. *Tverdye splavy* [Hard alloys]. Moscow, Ruda i metally publ., 2005, 416 p.

THE IMPROVEMENT OF QUALITY OF HARD-ALLOY TOOLS AND PARTS BY MEANS OF CREATION OF SPECIFIED LEVEL OF RESIDUAL STRESS IN THE SURFACE LAYER

© 2015

E.S. Kiselyov, Doctor of Engineering, Full Professor, professor of the department «Engineering technology»

M.V. Nazarov, graduate student of the department «Engineering technology»

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: hard alloy; hard-alloy cores; residual stresses; surface layer; semi-artificial thermocouple; regression model.

Abstract: The article covers the issues of ensuring quality of hard-alloy tools and parts when producing them by means of rational use of ultrasonic fluctuations energy. It is well-known that one of the key indicators of quality of the surface layer of parts or tools is the lack of stretching residual stresses. It is especially important for the tools used for high-speed processing of aluminum alloys blank parts which are not exposed to the drawing of wear resistant coatings, and also for the crown bits and various hard-alloy parts which are widely used in modern machines and mechanisms. As a rule, the blank parts to be produced are processed by grinding at final stages of technological process, after which the stretching residual stresses are inevitable. For their relaxation, thermal treatment or natural aging is used in the production that increases the production cycle and the cost of production. For this purpose, the authors offered to use the ultrasonic field energy; in this connection, special installations were developed and the researches were conducted. During the research, the regression dependences of residual stresses on the parameters of thermal power intensity (the components of cutting forces and the contact temperature in the zone of flat diamond grinding of samples made of ultra finely-divided hard alloy) and the elements of processing mode (the longitudinal conveying speed and the cutting depth) were received. The residual stresses were controlled by means of domestic “Rikor-4” refractometer. During processing, the authors carried out the assessment and the structural phase changes in the surface (using the x-ray measuring “Rikor-7” complex). The results of researches allowed to determine the velocity of ultrasonic relaxation and the elements of its mode.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО-КРЕМНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2015

М.М. Криштал, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», ректор
П.В. Ивашин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИО-4
А.В. Полунин, младший научный сотрудник НИО-4
Е.Д. Боргардт, лаборант-исследователь НИО-4
А.Я. Твердохлебов, младший научный сотрудник НИО-4
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: микродуговое оксидирование; силумин; наночастицы; диоксид кремния; оксидный слой; микротвердость; износостойкость; теплопроводность.

Аннотация: Работа посвящена улучшению процесса микродугового оксидирования наиболее применяемых литейных алюминиевых сплавов - алюминиево-кремниевых сплавов (силуминов). На силуминах АК6М2 и АК9пч методом микродугового оксидирования были получены образцы оксидных слоев, синтезированные в электролите базового состава и с добавкой в электролит небольшого количества наноразмерного порошка диоксида кремния SiO_2 . Проведены экспериментальные исследования производительности процесса микродугового оксидирования, поперечной структуры полученных оксидных слоев, их фазового состава, морфологии поверхности, микротвердости, трибологических и теплоизоляционных характеристик. Обнаружено, что при введении в состав электролита наноразмерного порошка диоксида кремния SiO_2 существенно повышается производительность процесса микродугового оксидирования. Оксидные слои, сформированные в модифицированном наночастицами диоксида кремния электролите, обладают улучшенной поперечной макроструктурой и микрорельефом по сравнению с базовым вариантом. Обнаружено увеличение содержания в оксидном слое высокотемпературных прочных фаз при одновременном снижении содержания метастабильных и низкотемпературных фаз. Установлено повышение микротвердости и износостойкости оксидных слоев, а также значительное снижение теплопроводности оксидных слоев, синтезированных в электролите с добавками наночастиц диоксида кремния.

Увеличение содержания высокотемпературной и наиболее прочной фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, образование в оксидном слое высокотемпературной фазы SiO_2 тридимита и других уникальных фаз, а также повышение скорости формирования оксидного слоя свидетельствуют о росте температур в зоне реакций его синтеза. Данный факт является нетривиальным и, видимо, связан с влиянием наночастиц диоксида кремния на микродуговые разряды и кинетику окисления в реакционной зоне МДО.

ВВЕДЕНИЕ

Растущие требования к применяемым материалам в машиностроении и в аэрокосмической отрасли обуславливают необходимость развития технологий создания функциональных поверхностных слоев на алюминиево-кремниевых сплавах (силуминах), т. к. они составляют 85–90 % алюминиевых сплавов, применяемых в машиностроении [1]. Перспективной технологией комбинированного метода поверхностного упрочнения и модифицирования таких конструкционных материалов является микродуговое оксидирование (МДО) [2]. Однако, по данным [2], на силуминах достаточно трудно добиться стабильного качества оксидных слоев.

В работе [3] исследована проблема МДО силуминов и предложен механизм влияния кремния в составе сплава на процесс МДО и свойства оксидных слоев на силуминах, что позволило во многом решить проблему. Влияние соединений кремния, находящихся в составе электролита, также известно [2], но механизм этого влияния на процесс МДО не представляется достаточно изученным и зачастую описан в виде гипотез [4; 5].

Кроме оксидирования силуминов, перспективным направлением современных исследований МДО является использование добавок в электролит наноразмерных частиц различных соединений с целью внедрения этих частиц в оксидный слой и придания ему новых функциональных свойств, связанных со свойствами добавляемого вещества [6–8]. Однако ранее проведенные авторами исследования [9] влияния добавки нано-

частиц SiO_2 в электролит на функциональные свойства оксидных слоев при МДО силумина показали интересный результат: неожиданно значительное, не связанное напрямую с функциональными свойствами самой вводимой добавки влияние на механические свойства слоя. Данный факт говорит о сложности прогнозирования функциональных свойств оксидных слоев при добавках наноразмерных материалов в электролит при МДО. Механизм взаимодействия наночастиц с электролитической плазмой и жидкостью не изучен и, основываясь на известных теоретических и экспериментальных исследованиях [10–12], представляется весьма сложным.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния наноразмерного порошка диоксида кремния, добавляемого в электролит при МДО, на функциональные свойства и процесс формирования оксидных слоев на силуминах. Такая постановка задачи объединяет перспективные для практики и достаточно новые для науки вопросы.

МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ

Исследуемые слои на основе оксида алюминия Al_2O_3 были получены при МДО на плоских образцах сплавов АК6М2 и АК9пч (ГОСТ 1583-93) размером $20 \times 60 \times 10$ мм.

Оксидирование велось в водном щелочно-силикатном растворе, содержащем дистиллированную воду с добавлением щелочи NaOH (марка ЧДА, ГОСТ 4328-77),

жидкого натриевого стекла Na_2SiO_3 (плотность $\rho=1,45 \times 10^3$ кг/м³, силикатный модуль $m=3$, ГОСТ 13078-81) и двузамещенного фосфорнокислого натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 4172-76). В электролит добавлялся рентгеноаморфный нанодисперсный диоксид кремния марки «Таркосил Т20» со средней дисперсностью частиц 20...23 нм [13] в концентрации 3–5 г/л.

Оксидирование проводили в анодно-катодном режиме от источника питания переменного тока 50 Гц. Отношение катодного тока к анодному устанавливалось 1,05...1,1 и поддерживалось постоянным на протяжении процесса МДО. Величина анодного формовочного напряжения составляла $U_A=600...850$ В при постоянной плотности тока 30...35 А/дм².

За толщину оксидного слоя на образце принимали среднее значение толщины по результатам всех измерений. Среднюю толщину оценивали с использованием вихретокового толщиномера КОНСТАНТА К6 с датчиками-преобразователями ИД0 и ПД1. Измерения толщины проводились не менее 10 раз. Погрешность определяли с помощью критерия Стьюдента при доверительной вероятности 0,9.

Рентгеноструктурный анализ оксидных слоев осуществляли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu Maxima XRD-7000 с фильтрованным Cu-K α излучением. Количественное содержание различных фазовых составляющих оксидного слоя уточняли по методу Ритвельда.

Структуру и морфологию поверхности оксидных слоев исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Sigma 02-09 и конфокального лазерного микроскопа Olympus LEXT OLS4000.

Микротвердость оценивали по Виккерсу (ГОСТ Р ИСО 6507-1 – 2007) с помощью микротвердомера Shimadzu HMV-2 при нагрузке 1 Н (HV0,1).

Триботехнические свойства исследовали по схеме возвратно-поступательного движения индентора по плоскому образцу в режиме сухого трения, используя универсальный трибометр Nanovea TRB 50N с индентором типа шар из стали SCH12 (40X24H12CJL) в соответствии с требованиями стандарта ASTM G133 – 95 Type A. Методика исследований подробно изложена в [9].

Коэффициент теплопроводности определяли методом постоянного теплового потока на установке и по методике, подробно изложенной в [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты показали, что применение нанопорошка диоксида кремния в качестве добавки в электролит положительно сказывается на производительности МДО-процесса (рис. 1).

Эксперименты показали, что применение нанопорошка диоксида кремния в качестве добавки в электролит положительно сказывается на структуре оксидного слоя: снижается количество микротрещин, пор и других внутренних дефектов (рис. 2 и 3), а также становится более однородной поверхность получаемого покрытия (таблица 1).

При добавке нанодисперсного SiO_2 в количестве 3–5 г/л выявлено повышение содержания в оксидном слое наиболее прочной и износостойкой фазы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) при одновременном снижении содержания метастабильных фаз ($\gamma+\gamma'$)- Al_2O_3 (алюмоокислородная

шпинель) и муллита (рис. 4 а и б). Кроме того, при концентрации наночастиц SiO_2 в электролите 3 г/л в оксидном слое формируется высокотемпературная фаза SiO_2 тридимит и другие уникальные фазы общим содержанием 3...7 %, в отношении которых требуется проведение дополнительных исследований. Увеличение содержания в оксидном слое $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ожидаемо приводит к повышению микротвердости и износостойкости синтезированных оксидных слоев (таблица 2 и рис. 5). При модифицировании электролита наночастицами SiO_2 микротвердость оксидных слоев увеличилась приблизительно на 30–35 %.

Трибологические испытания показали, что оксидные слои на алюминиево-кремниевых сплавах (на примере силумина АК9пч), полученные в модифицированном наночастицами SiO_2 электролите, обладают существенно более высокой износостойкостью по сравнению с базовым вариантом (рис. 5). Приведенный износ образца оксидного слоя уменьшился при модифицировании электролита с $19,3 \cdot 10^{-6}$ г/(м·Н) до $5,7 \cdot 10^{-6}$ г/(м·Н), то есть более чем в три раза (рис. 5 а). Линейная интенсивность изнашивания уменьшилась более чем в 3 раза – с 14,2 мкм/м до 4 мкм/м (рис. 5 б). Необходимо отметить снижение износа индентора приблизительно в 7 раз при модифицировании электролита нанодисперсным SiO_2 .

Исследование теплоизоляционных свойств оксидных слоев на силуминах показало, что модифицирование электролита нанодисперсным SiO_2 приводит к существенному снижению коэффициента теплопроводности более чем в 5 раз по сравнению с базовым вариантом (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ

Обнаруженное ускорение роста оксидного слоя свидетельствует о росте температуры в реакционной зоне и, соответственно, интенсификации химических реакций, протекающих при МДО.

О росте температур в реакционной зоне свидетельствуют результаты фазового анализа. Известно [15], что оксиды алюминия образуются при температурах 600–1200 °С. Переход метастабильных полиморфных модификаций (γ -, δ -, χ -, η -) Al_2O_3 в стабильную форму $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) начинается при 800–900 °С, а наиболее интенсивно протекает при 1100–1200 °С и выше. Именно увеличение количественного содержания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в оксидном слое почти в 2 раза при одновременном снижении количества $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и муллита свидетельствует о значительном возрастании температур в реакционной зоне МДО, что приводит к уменьшению содержания нежелательных по своим свойствам фаз [15] в синтезированном оксидном слое. Это объясняет существенное повышение механических и трибологических свойств модифицированных покрытий, т. к. именно корунд обладает превосходными механическими свойствами для использования в парах трения при экстремальных нагрузках (твердость корунда по шкале Мооса составляет 9 единиц). От концентрации $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в оксидном слое прямо зависит микротвердость, износостойкость и, как следствие, качество работы в парах трения [2; 9]. Повышение однородности фазового состава слоя также способствует уменьшению количества дефектов вследствие снижения содержания хрупких

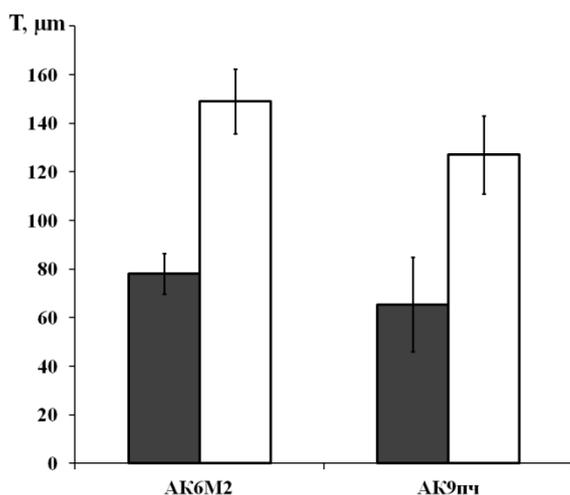


Рис. 1. Толщина оксидных слоев, полученных в базовом и модифицированном Т20 электролитах на силуминах при длительности МДО 5400 с
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите

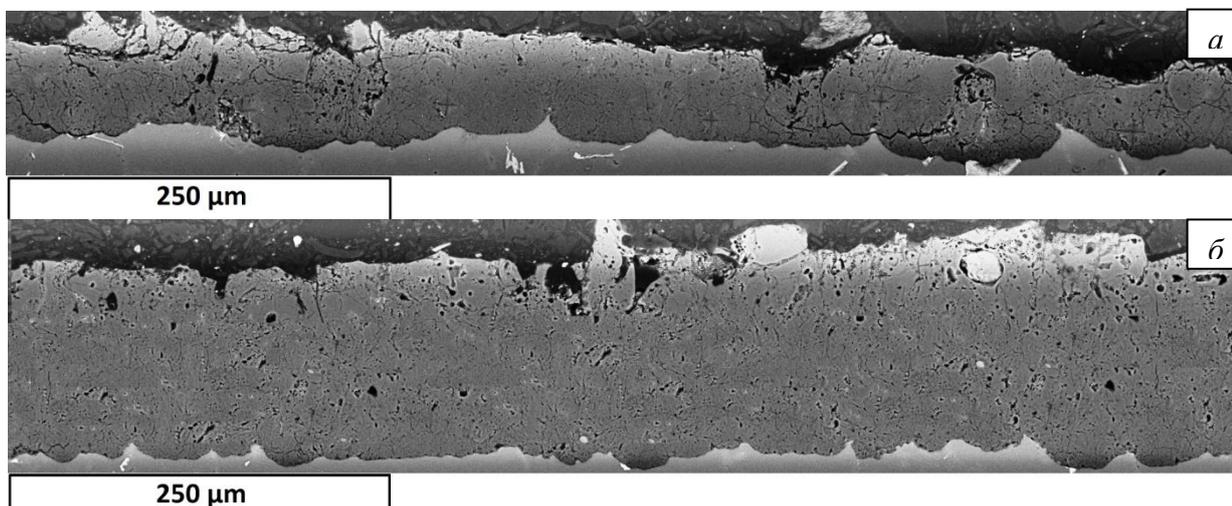


Рис. 2. Макроструктура оксидного слоя на алюминиево-кремниевом сплаве АК6М2:
 а – базовый электролит; б – модифицированный наночастицами SiO₂ электролит

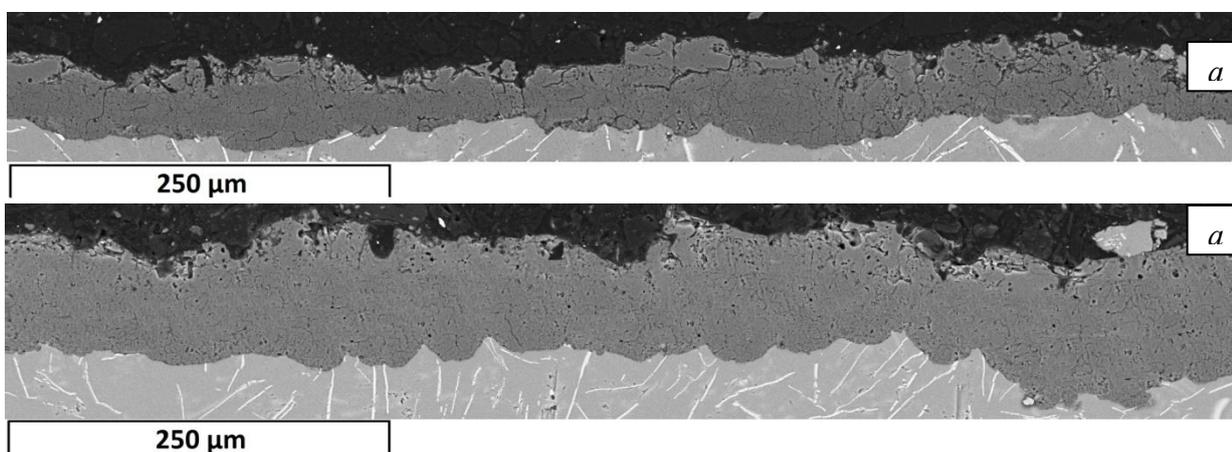


Рис. 3. Макроструктура оксидного слоя на алюминиево-кремниевом сплаве АК9пч:
 а – базовый электролит; б – модифицированный наночастицами SiO₂ электролит

Таблица 1. Шероховатость Rz и Ra, мкм, оксидного слоя после его синтеза

Электролит	Материал			
	АК6М2		АК9пч	
	Rz	Ra	Rz	Ra
Базовый	26	5,5	36	7,5
Модифицированный SiO ₂	15	3	20	4

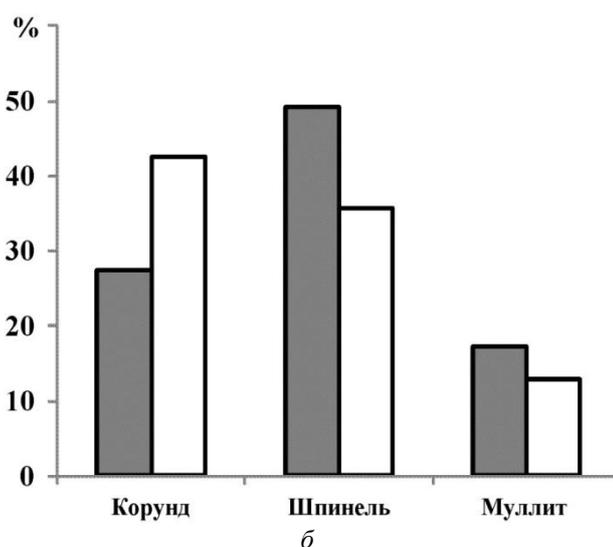
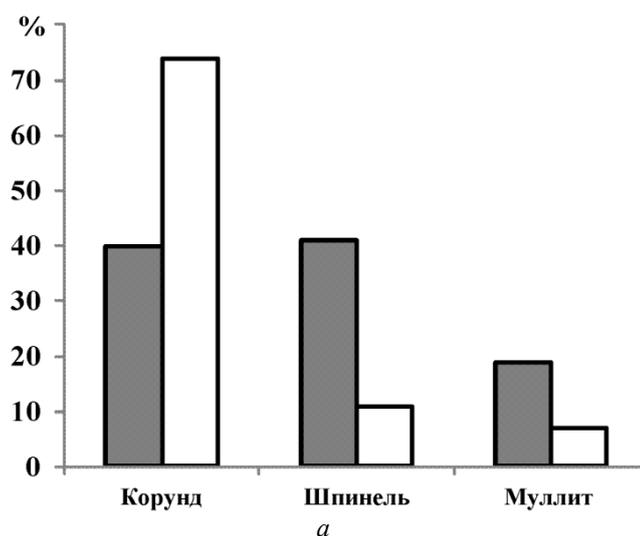


Рис. 4. Фазовый состав оксидных слоев на алюминиево-кремниевых сплавах:
 а – АК6М2; б – АК9пч
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите)

Таблица 2. Микротвердость HV0.1, МПа, оксидного слоя на алюминиево-кремниевых сплавах АК6М2 и АК9пч

Электролит	Материал	
	АК6М2	АК9пч
Базовый	690...740 (719*)	360...410 (390*)
Модифицированный SiO ₂	880...930 (900*)	500...550 (520*)

* Среднее значение по результатам 10-ти измерений

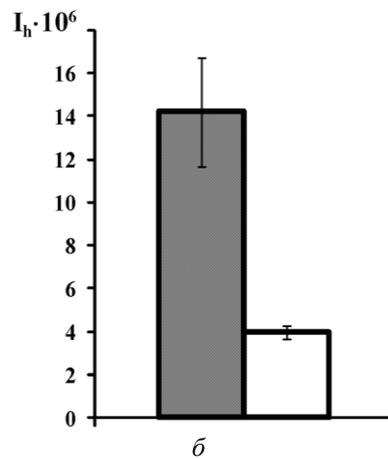
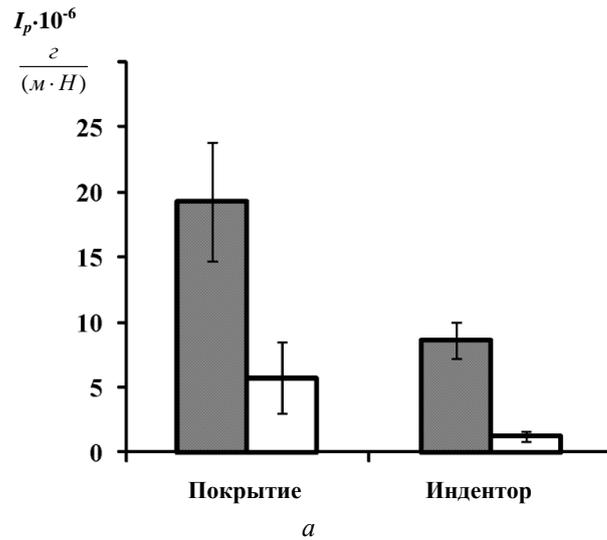


Рис. 5. Приведенный износ (а) и линейная интенсивность изнашивания (б) в паре трения «МДО-слой – сталь SCH12»
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите

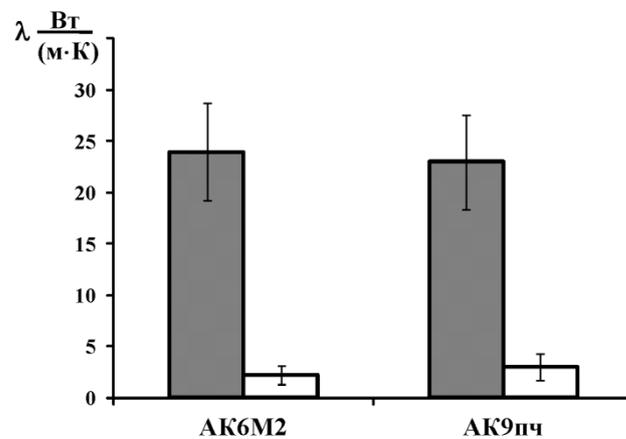


Рис. 6. Теплопроводность оксидных слоев на силуминах АК6М2 и АК9пч при температуре 100 °С
 ■ – оксидный слой, полученный в базовом электролите,
 □ – в модифицированном наночастицами SiO₂ электролите

и пористых метастабильных фаз большего удельного объема, чем корунд. Например, γ - Al_2O_3 имеет почти на 10 % меньшую плотность, чем α - Al_2O_3 (3,68 г/см³ и 3,99 г/см³ соответственно).

Возможно, повышение температур в зоне синтеза оксидного слоя до значений 1200–1500 °С в щелочной среде приводит к интенсификации процессов разложения муллита на корунд и прочие высокотемпературные фазы [16], о чем свидетельствует снижение содержания муллита в оксидном слое при одновременном увеличении содержания корунда α - Al_2O_3 (рис. 4), а также образование высокотемпературных фаз – тридимита и других.

Снижение количества структурных дефектов и фазовой неоднородности, а также выравнивание микро рельефа оксидного слоя свидетельствует о повышении однородности температурного поля на обрабатываемой поверхности во время формирования оксидного слоя, что может быть объяснено изменениями в процессах зажигания и горения микродуговых разрядов.

Резкое снижение теплопроводности оксидного слоя, вероятнее всего, обусловлено двумя причинами: внедрением в него нанодисперсного диоксида кремния и изменением его макроструктуры. Известно [17], что вводимый в электролит нанопорошок SiO_2 обладает крайне низкой теплопроводностью и является прекрасным теплоизолятором. Вероятно, в процессе синтеза оксидного слоя наноразмерные частицы SiO_2 внедряются в оксидный слой, распределяются по нему, заполняя дефекты и пустоты, что влияет на теплопроводность слоя. Изменение макроструктуры оксидного слоя при добавке нанопорошка SiO_2 в электролит выражается в формировании более рыхлой наружной части (шубы). Эта структура имеет больше, чем базовая, мелких воздушных пузырей и тонких перемычек, что обеспечивает низкую теплопроводность слоя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Наблюдается значительное ускорение процесса формирования оксидного слоя на силуминах при введении в электролит добавки нанодисперсного диоксида кремния.

2. При применении нанодисперсного диоксида кремния в качестве добавки в электролит выявлено улучшение поперечной макроструктуры и микро рельефа формируемых оксидных слоев.

3. Введение в электролит незначительной добавки наночастиц SiO_2 приводит к существенному увеличению содержания наиболее прочной фазы α - Al_2O_3 в составе формируемых оксидных слоев и снижению фазовой неоднородности.

4. Установлено, что сформированные в модифицированном нанодиоксидом кремния электролите оксидные слои отличаются увеличенной \approx на 30 % микротвердостью, существенно возросшей износостойкостью (\approx в 3 раза) и улучшенными теплоизоляционными свойствами (коэффициент теплопроводности снижается более чем в 5 раз).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение производительности процесса МДО, механических и теплоизоляционных свойств оксидных

слоев на силуминах обуславливает практическую значимость полученных результатов.

Увеличение содержания высокотемпературной и наиболее прочной фазы α - Al_2O_3 , образование в оксидном слое высокотемпературной фазы SiO_2 тридимита и других уникальных фаз, а также повышение скорости формирования оксидного слоя свидетельствуют о росте температур в зоне его синтеза. Данный факт является нетривиальным и, видимо, связан с влиянием наночастиц диоксида кремния на микродуговые разряды и кинетику окисления в реакционной зоне МДО. Механизм этого влияния требует дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации высшим учебным заведениям и научным организациям в сфере научной деятельности. Код проекта 887.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А., Савченко С.В., Белов В.Д. Атлас микроструктур промышленных силуминов. М.: МИСиС, 2009. 204 с.
2. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 2 / под ред. И.В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
3. Криштал М.М., Рюмкин М.О. Влияние исходной структуры Al-Si сплавов на свойства получаемых методом микродугового оксидирования оксидных слоев и торможение частицами кремния роста оксидного слоя // Материаловедение. 2008. № 12. С. 50–61.
4. Dehnavi V., Luan B., Shoesmith D., Liu X.Y., Rohani S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior // Surface & Coatings Technology. 2013. V. 226. P. 100–107.
5. Monfort F., Berkani A., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H., Shimizu K. Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte // Corros. Sci. 2007. Vol. 49. № 2. P. 672–693.
6. Руднев В.С., Ваганов-Вилькинс А.А., Яровая Т.П., Недозоров П.М. Способ получения композитных полимер-оксидных покрытий на вентильных металлах и их сплавах: патент РФ № 2483144, 16.12.2011.
7. Мамаев А.И., Бутягин П.И. Способ получения оксидных каталитически активных слоев и каталитически активный материал, полученный данным способом: патент РФ № 2152255, 14.07.1998.
8. Matykina E., Arrabal R., Skeldon P. Incorporation of zirconia nanoparticles into coatings formed on aluminium by AC plasma electrolytic oxidation // Journal of Applied Electrochemistry. 2008. Vol. 38. № 10. P. 1375–1383.
9. Полунин А.В., Ивашин П.В., Растегаев И.А., Боргардт Е.Д., Криштал М.М. Исследование износостойкости оксидных слоев, сформированных микродуговым оксидированием на силумине АК9ПЧ в модифицированном наночастицами диоксида кремния электролите // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 2. С. 21–25.

10. Рудяк В.Я., Белкин А.А., Томилина Е.А. Сила, действующая на наночастицу в жидкости // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 2. С. 69–74.
11. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Дзюба В.П., Краева Н.П. Релаксация скорости неравновесных наночастиц в жидкости // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 12. С. 58–66.
12. Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Орлов М.А. Наночастица в плазме // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 6. С. 542–546.
13. Бардаханов С.П., Лысенко В.И., Номоев А.В., Труфанов Д.Ю. Керамика из нанопорошков и ее свойства // Стекло и керамика. 2008. № 12. С. 10–13.
14. Криштал М.М., Ивашин П.В., Павлов Д.А., Полунин А.В. О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования на силумине АК9ПЧ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 169–172.
15. Чукин Г.Д. Строение оксида алюминия и катализаторов гидрообессеривания. Механизмы реакций. М.: Принта, 2010. 288 с.
16. Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. 3-е изд. М.: Металлургия, 1978. 376 с.
17. Бардаханов С., Завьялов А., Зобов К., Лысенко В., Номоев А., Обанин В., Труфанов Д. Определение коэффициента теплопроводности нанопорошков диоксида кремния // Наноиндустрия. 2008. № 5. С. 24–27.
6. Rudnev V.S., Vaganov-Vilkins A.A., Yarovaya T.P., Nedorozov P.M. *Sposob polucheniya kompozitnykh polimer-oksidnykh pokritiy na ventilnykh metallakh i ikh splavakh* [Method of production of composite polymer-oxide coatings on the valve metals and their alloys], patent RF no. 2483144, 2011.
7. Mamaev A.I., Butyagin P.I. *Sposob polucheniya oksidnykh kataliticheskikh aktivnykh sloev i kataliticheskikh aktivnykh material, poluchennykh dannim sposobom* [Method of production of oxide catalytically-active layers and catalytically-active material produced by this method], patent RF no. 2152255, 1998.
8. Matykina E., Arrabal R., Skeldon P. Incorporation of zirconia nanoparticles into coatings formed on aluminum by AC plasma electrolytic oxidation. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 38, no. 10, pp. 1375–1383.
9. Polunin A.V., Ivashin P.V., Rastegayev I.A., Borgardt E.D., Krishtal M.M. Durability study of oxide layers formed by microarc-oxidation on silumin AK9pch with addition of nano-sized silicon dioxide in electrolyte. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2015, no. 2, pp. 21–25.
10. Rudyak V.Ya., Dubtsov S.N., Baklanov A.M. Temperature dependence of the diffusion coefficient of nanoparticles. *Technical physics letters*, 2008, vol. 34, no. 6, pp. 519–521.
11. Kulchin Yu.N., Vitrik O.B., Dzyuba V.P., Kraeva N.P. Speed relaxation of nonsynchronous nanoparticles in fluid. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, vol. 37, no. 12, pp. 58–66.
12. Martynenko Y.V., Nagel' M.Y., Orlov M.A. A nanoparticle in plasma. *Plasma Physics Reports*, 2009, vol. 35, no. 6, pp. 494–498.
13. Bardakhanov S.P., Lysenko V.I., Nomoev A.V., Trufanov D.Yu. Properties of the nanopowder ceramics. *Steklo i keramika*, 2008, no. 12, pp. 10–13.
14. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Pavlov D.A., Polunin A.V. Thermal conductivity of oxide coatings obtained by micro-arc oxidation, on silumin AK9. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 169–172.
15. Chukin G.D. *Stroenie oksida alyuminiya i katalizatorov gidroobesserivaniya. Mekhanizmy reaktsiy* [Composition of aluminum oxide and hydrodesulphurization catalytic agents. Reactions mechanisms]. Moscow, Printa publ., 2010, 288 p.
16. Strelor K.K., Mamykin P.S. *Tekhnologiya ogneuporov* [Refractories technology]. 3rd ed. Moscow, Metallurgiya publ., 1978, 376 p.
17. Bardahanov S., Zavyalov A., Zobov K., Lisenko V., Nomoev A., Obanin V., Trufanov D. Determination of Heat Transfer Coefficient of Silica Nanopowders. *Nanoindustriya*, 2008, no. 5, pp. 24–27.

REFERENCES

1. Belov N.A., Savchenko S.V., Belov V.D. *Atlas mikrostruktur promyshlennikh siluminov* [Atlas of microstructures of industrial silumins]. Moscow, MISiS publ., 2009, 204 p.
2. Suminov I.V., ed. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov* [Plasma-electrolytic modification of metals and alloys surface]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2011, vol. 2, 512 p.
3. Krishtal M.M., Ryumkin M.O. Influence of the starting structure of Al-Si alloys on the properties of oxide layers obtained by the microarc oxidation, and retardation of the oxide growth by the silicon particles. *Materialovedenie*, 2008, no. 12, pp. 50–61.
4. Dehnavi V., Luan B., Shoesmith D., Liu X.Y., Rohani S. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior. *Surface & Coatings Technology*, 2013, vol. 226, pp. 100–107.
5. Monfort F., Berkani A., Matykina E., Skeldon P., Thompson G.E., Habazaki H., Shimizu K. Development of anodic coatings on aluminium under sparking conditions in silicate electrolyte. *Corros. Sci.*, 2007, vol. 49, no. 2, pp. 672–693.

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF MICRO-ARC OXIDATION TECHNOLOGY ON ALUMINUM-SILICON ALLOYS

© 2015

M.M. Krishtal, Doctor of Physics and Mathematics,
professor of the Department «Nanotechnologies, materials sciences and mechanics», Rector
P.V. Ivashin, candidate of technical sciences, Head of the Research division № 4
A.V. Polunin, junior researcher of the Research division № 4
E.D. Borgardt, assistant researcher of the Research division № 4
A.Y. Tverдохлебов, junior researcher of the Research division № 4
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: microarc oxidation; silumin; nanoparticles; dioxide silica; oxide layer; microhardness; wear resistance; thermal conductivity.

Abstract: The work is devoted to the question of improving of oxidizable the most used cast aluminum alloys – aluminium-silicon alloys (silumin). The specimens of aluminium-silicon alloys 361.0 and 319.0 with oxide layers, synthesized with MAO-method in the base-composition electrolyte and in the electrolyte with addition of a small amount of nano-sized silica dioxide powder SiO_2 , were obtained. The experimental analysis of performance of micro-arc oxidation process was carried out with the base-composition electrolyte and with the modified electrolyte. The analysis of transverse structure of the obtained oxide layers, phase composition, surface morphology, microhardness, tribological and thermal insulating characteristics was performed. Founded that modification of the electrolyte with nanoscale dioxide silica powder SiO_2 significantly increases productivity of micro-arc oxidation process. Oxide layers formed in the modified electrolyte exhibit improved transverse macrostructure and microrelief compared to the base case. Adding of the nanoparticles in the electrolyte promotes formation of high-temperature phases and reduces content of metastable low-temperature phases in the oxide layers. This indicates increasing of effective temperature in a synthesis zone of the oxide layers during a process of micro-arc oxidation. The positive effect of additives SiO_2 nanoparticles in the electrolyte on microhardness was revealed. Has been founded that addition into the electrolyte of small nano-sized silica dioxide powder SiO_2 significantly increases wear resistance of the oxide layers formed on aluminum-silicon alloys. Also oxide layers formed in the modified electrolyte have a relatively high thermal insulating properties comparing with base electrolyte composition layers.

Д.Г. Левашкин, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: перекомпоновываемые производственные системы; автоматически сменный модуль; многосторонняя обработка деталей; точность базирования; базлирующие отверстия.

Аннотация: Рассмотрены вопросы обеспечения точности базирования автоматически сменных узлов при перекомпоновании рабочей позиции перекомпоновываемых производственных систем. Показано влияние взаимного расположения базлирующих отверстий на точность базирования автоматически сменных узлов при многосторонней обработке деталей. Для решения вопросов многосторонней обработки деталей предложена модель автоматически сменного узла – носителя деталей для моделирования вопросов обеспечения точности базирования на рабочей позиции перекомпоновываемой производственной системы. Приведена конструкция носителя, выполненного в виде правильной прямоугольной призмы, где на боковых гранях расположены базлирующие отверстия, а установку комплекта приспособления и детали выполняют в плоскости каждой грани. При этом обеспечивается пространственная повторяемость положения деталей относительно технологических узлов рабочей позиции и равная жесткость корпуса носителя в направлениях многосторонней обработки деталей. В статье рассмотрена модель системы равнорасположенных базлирующих отверстий для моделирования точности базирования носителя. На основе размерного анализа определены параметры, характеризующие точность обработки каждого базлирующего отверстия.

Показано влияние взаимного расположения каждого базлирующего отверстия носителя на точность обработки детали. Для условий обработки базлирующих отверстий на автоматизированном оборудовании определены параметры обработки, которые необходимо обеспечить для решения вопросов точности базирования носителя на рабочей позиции. На основе моделирования размерных связей определены требования для технологического процесса изготовления базлирующих отверстий. При этом показана необходимость учета снижения точности их взаимного расположения в результате обработки.

Согласно результатам моделирования, обеспечение требуемого взаимного расположения базлирующих отверстий при их обработке позволит выполнить заложенные требования на взаимное расположение носителей перекомпоновываемых производственных систем.

Одной из тенденций развития современного машиностроения является создание перекомпоновываемых производственных систем (RMS), создаваемых на основе внедрения автоматически сменных станочных систем и узлов в производственный процесс. При этом обеспечивается быстросменность технологической базы, расширение номенклатуры выпускаемой продукции, сокращение времени на подготовку производства [1–17].

В данной работе предложены технические решения с применением в качестве узлов базирования, крепления и транспортировки деталей – автоматически сменные узлы (носители) призматической формы [18]. Конструкцию носителя призматической формы [19] можно представить в виде куба (рисунок 1), где на каждой грани-плоскости имеются базлирующие отверстия $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$.

По двум несмежным отверстиям одной грани G , например $(T_n, T_{(n+2)})$ и $(T_{(n+1)}, T_m)$, происходит базирование носителя на рабочей позиции по схеме «два отверстия и плоскость» (рисунок 1). Для повышения эффективности автоматизированной обработки носитель с установленными на боковых гранях деталями кантуют на рабочей позиции. При кантовании носителя происходит чередование комплекта базлирующих отверстий и грани G с сохранением теоретической схемы базирования. Кантование носителя обеспечивает смену пространственного положения детали и выполнение технологического маршрута ее обработки.

Изготовление носителей призматической формы связано с проблемой обеспечения требуемого взаимного расположения базлирующих отверстий со стороны каждой грани его корпуса.

Для решения проблемы рассмотрим в системе XOY множество координированных отверстий m , расположение которых определено линейными взаимосвязями (рисунок 2). Выделим в системе XOY группу отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ в качестве простейшей, характеризующей всю совокупность m -отверстий. Каждое отверстие группы характеризуют линейные OX и OY взаимосвязи с соседними отверстиями, которые необходимо выдержать в ходе обработки. Данное утверждение также справедливо для всего множества отверстий $\{M\}$. Так, в системе XOY группу отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ определяют взаимосвязи: A_{ij}^n – непересекающиеся межцентровые расстояния между отверстиями ($i \neq j = 1, 2, 3, 4, m$), A_{ij}^n – пересекающиеся межцентровые расстояния. Также положение отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ определяют размеры L_{xij}, L_{yij} , а также габаритные размеры B_{ij} .

Очевидно, для решения проблемы необходимо рассмотреть особенности процесса обработки базлирующих отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ с учетом заданных и фактических значений параметров точности обработки $A_{ij}^n, A_{ij}^n, L_{xij}, L_{yij}, B_{ij}$ на автоматизированном оборудовании [20].

Для этого выделим технологические признаки системы координированных отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ (рисунок 3):

1. Наименьшей структурной единицей координированных отверстий является система из четырех отверстий, остальные случаи – частные (система, имеющая пять и более отверстий, рассматривается система отверстий, образованная из $(4+1+...+m)$ отверстий).

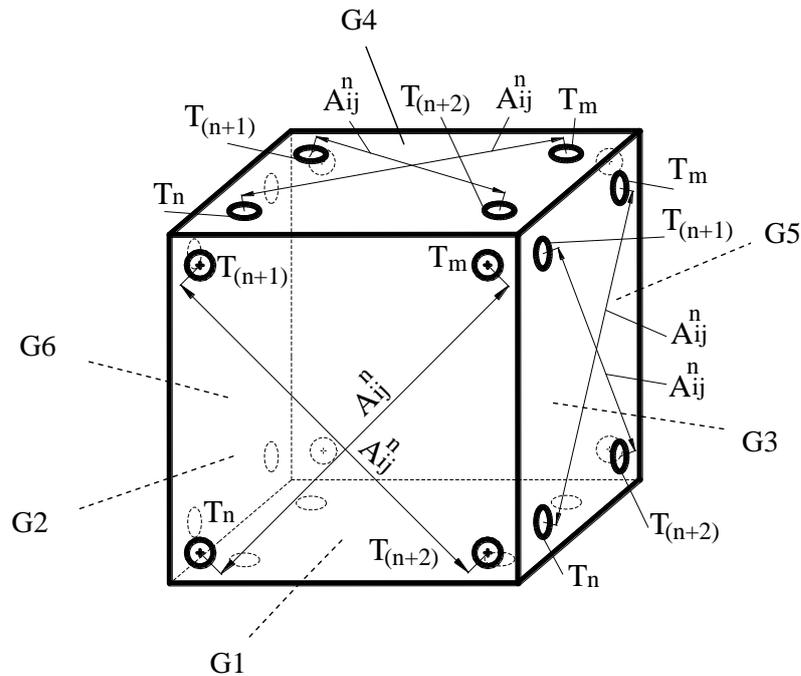


Рис. 1. Модель носителя с базисуемыми отверстиями, расположенными на боковых гранях G призматического корпуса

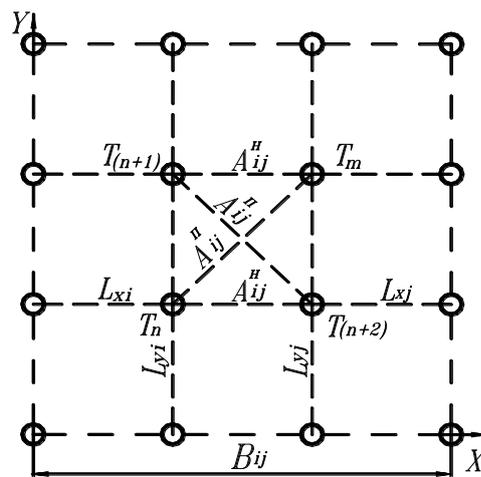


Рис. 2. Система координированных отверстий m

2. Система отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ определяет адекватно возможные взаимосвязи, имеющие место в системе множества отверстий $\{M\}$. Всего для каждого отверстия системы можно выделить пять параметров, определяющих точность его обработки и положение относительно соседних. Так, точность обработки отверстия T_m характеризуется параметрами $(2A_{ij}^n, A_{ij}^n, L_{xij}, L_{yij})$.

3. В случае перехода от квадратоугольной системы расположения базисуемых отверстий на грани носителя к пентагональной (система из пяти отверстий), гексагональной (система из шести отверстий) и т. д. изменяется передаточное число системы – ξ ($\xi = \sqrt{2}$ для квадратоугольной системы).

4. При обработке отверстий возможно несколько вариантов последовательности их обработки: $T_n, T_{(n+1)} \rightarrow T_m$; $T_n, T_{(n+2)} \rightarrow T_m$; $T_{(n+1)}, T_{(n+2)} \rightarrow T_m$. Это позво-

ляет рассматривать в расчетах точности набор взаимосвязанных размерных цепей, где замыкающими являются межцентровые размеры A_{ij}^n, A_{ij}^n .

5. Каждое обработанное отверстие T_{ij} обладает набором задаваемых параметров $A_{ij}^n, A_{ij}^n, L_{xij}, L_{yij}, B_{ij}$. Параметры определяют в целом положение каждого отверстия внутри множества отверстий $\{M\}$.

6. Анализ взаимосвязей системы отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$ позволяет выделить параметры, влияющие на точность взаимного расположения отверстий внутри множества $\{M\}$: межцентровые расстояния A_{ij}^n, A_{ij}^n системы отверстий, задаваемое поле допуска обрабатываемого отверстия $T_i - T_{\Delta m}^i$.

7. Система отверстий ограничена размерами B_{ij} в плоскости обработки с определенной величиной их отклонений – ω_{Bij} .

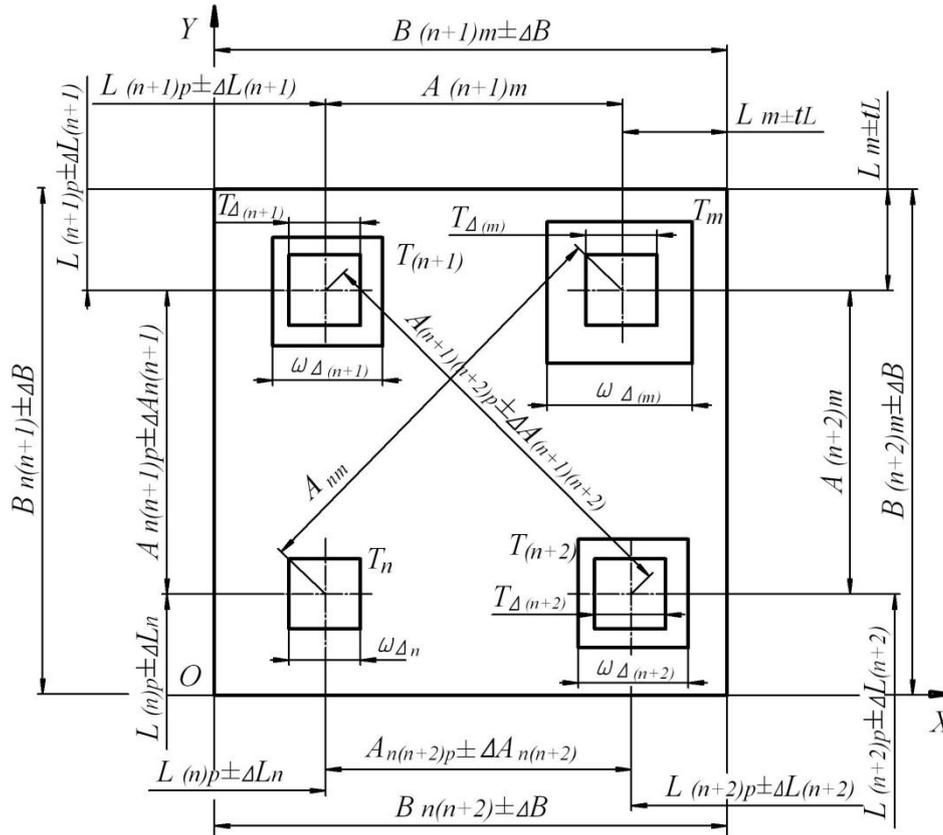


Рис. 3. Образование области ω_{Δ} при обработке отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$

При обработке базирующих отверстий одной грани носителя (рисунок 3) имеет место область ω_{Δ} расположения осей отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$.

Согласно рисунку 3, область ω_{Δ} ограничена пределами допусков на расположение каждого отверстия T_{Δ} . Однако в случае применения традиционных методов обработки точность взаимного расположения системы координированных отверстий - площадь области ω_{Δ} после обработки каждого отверстия последовательно увеличивается. Например, для рассматриваемого случая (рисунок 3): от обработки отверстия T_n к обработке отверстия $T_{(n+1)}$, от отверстия $T_{(n+1)}$ к обработке отверстия $T_{(n+2)}$ и т. д. к обработке замыкающего отверстия T_m [18].

Увеличение площади области ω_{Δ} происходит вследствие наложения погрешности обработки отверстий, обработанных на предыдущих переходах, на точность обрабатываемого отверстия на данном переходе. Область ω_{Δ} определяет геометрическое место оси каждого обработанного отверстия $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}, T_m$, грани носителя.

Однако реализация технологического процесса изготовления базирующих отверстий должна предусматривать сохранение точности их взаимного расположения в результате обработки [20]. Как показано на рисунке 3, при обработке, например, отверстия T_n на грани носителя применение известных методов обеспечения точности позволяет обеспечить равенство номиналов $L_{(np)}$ и полей $T_{\Delta n} = \omega_{\Delta n}$. Обработка отверстия $T_{(n+1)}$ осуществляется с учетом полученного поля $\omega_{\Delta n}$ и допуска на изготовление отверстия $T_{(n+1)} - T_{\Delta(n+1)}$ [21].

В результате наложения поля $\omega_{\Delta n}$ на поле допуска $T_{\Delta(n+1)}$ получена область $\omega_{\Delta(n+1)}$, при этом выполняются неравенства (1):

$$\begin{aligned} T_{\Delta(n+1)} &< \omega_{\Delta(n+1)}, \\ \omega_{\Delta n} &< \omega_{\Delta(n+1)}, \\ L_{np} &\neq L_{(n+1)p}. \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, согласно (1), в результате обработки отверстий $T_n, T_{(n+1)}$ обеспечить равенство номиналов $L_{(np)}, L_{(n+1)p}$ невозможно вследствие неравенства полей $\omega_{\Delta n} \neq \omega_{\Delta(n+1)}$.

Если говорить об обработке отверстия $T_{(n+2)}$, то с учетом вышесказанного в результате наложения поля $\omega_{\Delta n}$ и $\omega_{\Delta(n+1)}$ на поле допуска $T_{\Delta(n+2)}$ получена область $\omega_{\Delta(n+2)}$, при этом можно записать неравенства (2):

$$\begin{aligned} T_{\Delta(n+2)} &< \omega_{\Delta(n+2)}, \\ \omega_{\Delta n} &< \omega_{\Delta(n+2)}, \\ \omega_{\Delta(n+1)} &< \omega_{\Delta(n+2)}, \\ L_{np} &\neq L_{(n+2)p}, \\ L_{(n+1)p} &\neq L_{(n+2)p}. \end{aligned} \quad (2)$$

На данном этапе обработки отверстий $T_n, T_{(n+1)}, T_{(n+2)}$ обеспечить равенство номиналов $L_{(np)}, L_{(n+1)p}, L_{(n+2)p}$ невозможно вследствие неравенства полей $\omega_{\Delta n} \neq \omega_{\Delta(n+2)}, \omega_{\Delta(n+1)} \neq \omega_{\Delta(n+2)}$.

В процессе обработки отверстия T_m наблюдается наложение полей $\omega_{\Delta n}, \omega_{\Delta(n+1)}, \omega_{\Delta(n+2)}$ на поле допуска $T_{\Delta(m)}$. Также при этом характерно выполнение ряда неравенств (3):

$$\begin{aligned}
 &T_{\Delta(m)} < \omega_{\Delta(m)} \\
 &\omega_{\Delta n} < \omega_{\Delta(m)} \\
 &\omega_{\Delta(n+1)p} < \omega_{\Delta(m)} \\
 &L_{np} \neq L_{(m)p}, \\
 &L_{(n+1)p} \neq L_{(m)p}, \\
 &L_{(n+2)p} \neq L_{(m)p} \\
 &A_{(n+1)(n+2)p} \neq A_{(nm)p}.
 \end{aligned} \quad (3)$$

В данном случае нарушается требование к обработке базирующих отверстий $A_{(n+1)(n+2)p} \neq A_{(nm)p}$ вследствие неравенства номиналов $L_{np} \neq L_{(m)p}$, $L_{(n+1)p} \neq L_{(m)p}$, $L_{(n+2)p} \neq L_{(m)p}$. Вследствие этого также невозможно выполнить заложенные требования на взаимное расположение базирующих отверстий T_n , $T_{(n+1)}$, $T_{(n+2)}$, T_m по равенству параметров точности обработки A_{ij}^n , A_{ij}^m , L_{xij} , L_{yij} , B_{ij} базирующих отверстий, используя традиционные методы изготовления базирующих отверстий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Развитие RMS основано на перекомпоновке рабочей позиции, где в качестве узла базирования и транспортировки деталей применяют автоматически узлы призматической формы (носители).

Многосторонняя обработка деталей на носителе характеризуется многовариантностью взаимного расположения инструмента относительно установленной на носителе обрабатываемой детали. При этом наибольшая концентрация технологических переходов достигается при кантовании носителя на одной рабочей позиции RMS.

Показано, что применение известных методов обработки координированных отверстий не позволяет выполнить требования по точности взаимного расположения базирующих отверстий носителя.

По результатам моделирования показано, что для обеспечения требуемой точности базирования носителя на рабочей позиции с учетом его кантования одной из задач обеспечения точности взаимного расположения базирующих отверстий носителя является минимизация области ω_{Δ} возможного положения каждого из отверстий T_n , $T_{(n+1)}$, $T_{(n+2)}$, T_m в результате их обработки на каждой грани G корпуса носителя.

В результате моделирования системы координированных отверстий m сформулированы исходные данные и начальные условия для дальнейших расчетов точности базирования носителя.

Показано влияние параметров взаимного расположения базирующих отверстий на точность базирования носителя. Данный аспект является определяющим для реализации многосторонней обработки деталей на носителе.

Таким образом, совместное рассмотрение представленных аспектов обеспечения точности обработки базирующих отверстий носителя позволит решить задачи обеспечения точности многосторонней обработки деталей в RMS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Царев А.М., Левашкин Д.Г. Перекомпоновываемые производственные системы реконфигурируемого производства. Обеспечение жесткости автоматически сменных узлов призматической формы. М.: Спутник+, 2007. 304 с.

2. Царев А.М., Левашкин Д.Г. Многоместное приспособление-спутник : патент РФ № 2258593, заяв. 2003127477/02, 10.09.2003.
3. Зотов А.В. Влияние параметров проволочного инструмента на величину упругопластической деформации // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. Ижевск, 2015. С. 27–31.
4. Бойченко О.В., Драчев О.И. Гранченко Д.В. Экспериментальное исследование процессов виброобработки // Проведение научных исследований в области машиностроения. Т. 2. Тольятти, 2009. С. 134–135.
5. Царев А.М., Самарцев И.А. Способ многоярусного компонования и перекомпонования рабочей позиции автоматической линии и перекомпонованная рабочая позиция автоматической линии для реализации способа : патент РФ № 2487004, заяв. 2011108821/02, 09.03.2011.
6. Зотов А.В., Драчев О.И. Оценка износостойкости направляющих скольжения, подвергнутых плакированию // Металлообработка. 2013. № 3. С. 5–10.
7. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies // International journal of manufacturing technology & management. 2000. Vol. 1. № 1. P. 114–131.
8. Mustapha N, Daoud A-K., Wassy I. S. Availability modeling and optimization of reconfigurable manufacturing systems // Journal of quality in maintenance engineering. 2003. Vol. 9. № 3. P. 284–302.
9. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing // Journal of intelligent manufacturing. 2000. Vol. 11. № 11. P. 403–419.
10. Pérez R., Dávila O., Molina A., Ramírez-Cadena M. Reconfigurable micro-machine tool design for desktop machining micro-factories // 7th IFAC conference on manufacturing modelling, management, and control. St. Petersburg, 2013. P. 1417–1422.
11. Sung-Yong S., Tava L.O., Derek Y-H. An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems // Integrated manufacturing systems. 2001. Vol. 12. № 7. P. 500–511.
12. Yigit A.S., Ulsoy A.G., Allahverdi A. Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing // Journal of Intelligent Manufacturing. 2002. Vol. 13. № 4. P. 309–316.
13. Wang Y., Wang Z., Gindy N., Tang R., Gu X.-J. Automated discrete-pin adjustment for reconfigurable moulding machine // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2010. Vol. 23. № 3. P. 229–236.
14. Abrishambaf R. Hashemipour M., Bal M. Structural modeling of industrial wireless sensor and actuator networks for reconfigurable mechatronic systems // The international journal of advanced manufacturing technology. 2013. Vol. 64. № 5-8. P. 793–811.
15. Plitea N. Lese D., Pislea D., Vaida C. Structural design and kinematics of a new parallel reconfigurable robot // Robotics and computer-integrated manufacturing. 2013. Vol. 29. № 1. P. 219–235.
16. Balasubramanian S., Brennan R.W., Norrie D.H. An architecture for metamorphic control of holonic

- manufacturing systems // *Computers in industry*. 2001. Vol. 46. P. 13–31.
17. Abdi M.R., Labib A.W. Performance evaluation of reconfigurable manufacturing systems via holonic architecture and the analytic network process // *International journal of production research*. 2011. Vol. 49. № 5. P. 1319–1335.
 18. Царев А.М. Основные положения метода распределенного базирования и обеспечения точности базирования автоматически сменных узлов на рабочих позициях перекомпоуемых производственных систем // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2011. № 2. С. 61–72.
 19. Царев А.М. Вопросы разработки классификационных признаков базирования и обработки деталей на многогранных носителях призматической формы // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2013. № 2. С. 94–106.
 20. Матвеев В.В. Размерный анализ технологических процессов. М.: Машиностроение, 1982. 264 с.
 21. Левашкин Д.Г. Обеспечение точности базирования сменных узлов призматической формы на основе анализа размерных цепей обработки их базирующих отверстий // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. 2015. Т. 15. № 2. С. 5–12.
- REFERENCES**
1. Tsarev A.M., Levashkin D.G. *Perekomponuemie proizvodstvennye sistemi rekonfiguriruemogo proizvodstva. Obespechenie zhestkosti avtomaticheskikh smennikh uzlov prizmaticheskoy formi* [The reconfigurable manufacturing systems of reconfigurable production. Ensuring rigidity of automatically replaceable knots of a prismatic form]. Moscow, Sputnik+ publ., 2007, 304 p.
 2. Tsarev A.M., Levashkin D.G. *Mnogomestnoe prisposoblenie-sputnik* [Satellite]. Patent RF, no. 2258593, 2003.
 3. Zotov A.V. Influence of parameters of wire tool on the value of elastoplastic deformation. *Molodye uchenie – uskoreniyu nauchno-tehnicheskogo progressa v XXI veke*. Izhevsk, 2015, pp. 27–31.
 4. Boychenko O.V., Drachev O.I., Granchenko D.V. Experimental investigation of vibroprocessing. *Provedenie nauchnikh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya*. Tolyatti, 2009, vol. 2, pp. 134–135.
 5. Tsarev A.M., Samartsev I.A. *Sposob mnogoyarusnogo komponovaniy i perekomponovaniya rabochey pozitsii avtomatizirovannoy linii i perekomponuemaya rabochaya pozitsiya avtomaticheskoy linii dlya realizatsii sposoba* [Method of multi-stage package and repackage of the work station of the automatic line and the repackage work station of the automatic line for this method implementation]. Patent RF, no. 2487004, 2011.
 6. Zotov A.V., Drachev O.I. Estimation of wear resistance sliding elements finished by cladding. *Metalloobrabotka*, 2013, no. 3, pp. 5–10.
 7. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. // *International journal of manufacturing technology & management*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 114–131.
 8. Mustapha N., Daoud A-K., Wassy I. S. Availability modeling and optimization of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of quality in maintenance engineering*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 284–302.
 9. Mehrabi M.G., Ulsoy A.G., Koren Y. Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. *Journal of intelligent manufacturing*, 2000, vol. 11, no. 11, pp. 403–419.
 10. Pérez R., Dávila O., Molina A., Ramírez-Cadena M. Reconfigurable micro-machine tool design for desktop machining micro-factories. *7th IFAC conference on manufacturing modelling, management, and control*. St. Petersburg, 2013, pp. 1417–1422.
 11. Sung-Yong S., Tava L. O., Derek Y-H. An approach to scalability and line balancing for reconfigurable manufacturing systems. *Integrated manufacturing systems*. 2001, vol. 12, no. 7, pp. 500–511.
 12. Yigit A.S., Ulsoy A.G., Allahverdi A. Optimizing modular product design for reconfigurable manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2002, vol. 13, no. 4, pp. 309–316.
 13. Wang Y., Wang Z., Gindy N., Tang R., Gu X.-J. Automated discrete-pin adjustment for reconfigurable moulding machine. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2010, vol. 23, no. 3, pp. 229–236.
 14. Abrishambaf R., Hashemipour M., Bal M. Structural modeling of industrial wireless sensor and actuator networks for reconfigurable mechatronic systems. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2013, vol. 64, no. 5-8, pp. 793–811.
 15. Plitea N., Lese D., Pisla D., Vaida C. Structural design and kinematics of a new parallel reconfigurable robot. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2013, vol. 29, no. 1, pp. 219–235.
 16. Balasubramanian S., Brennan R.W., Norrie D.H. An architecture for metamorphic control of holonic manufacturing systems. *Computers in industry*, 2001, vol. 46, pp. 13–31.
 17. Abdi M.R., Labib A.W. Performance evaluation of reconfigurable manufacturing systems via holonic architecture and the analytic network process. *International journal of production research*, 2011, vol. 49, no. 5, pp. 1319–1335.
 18. Tsaryev A.M. Basic Proposition of a Method of the Distributed Basing and Ensuring Accuracy of Basing in Automatically Replaceable Knots on Working Positions of the Rearranged Production Systems. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2011, no. 2, pp. 61–72.
 19. Tsaryev A.M. The research works tasks of classification characteristics for basing and tooling of workpieces on multisided bearers of prismatic form. *Problemi mashinostroeniya i avtomatizatsii*, 2013, no. 2, pp. 94–106.
 20. Matveev V.V. *Razmerniy analiz tekhnologicheskikh protsessov* [Dimensional analysis of Technological processes: manual]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 264 p.
 21. Levashkin D.G. Ensure accuracy based replaceable prismatic units on the basis of analysis dimensional chains based holes processing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2015, vol. 15, no. 2, pp. 5–12. (In Russian).

SIMULATION OF INFLUENCE OF BASING HOLES RELATIVE POSITION ON THE ACCURACY OF LOCATION OF RMS AUTOMATICALLY CHANGEABLE UNITS

© 2015

D.G. Levashkin, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Equipment and technology of engineering production»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: reconfigurable manufacturing systems; automatically replaceable module; multisided treatment of parts; accuracy of location; basing holes.

Abstract: The article covers the issues of provision of accuracy of location of automatically changeable units when repackaging the work station of reconfigurable manufacturing systems. The study showed the influence of basing holes relative position on the accuracy of location of automatically changeable units during multisided treatment of parts. To resolve the issues of multisided treatment of parts, the author suggested the model of automatically changeable unit – part carrier for simulation of issues of assurance of accuracy of location on the work station of repackaged production system. The author offers the carrier design in the form of a prism where the basing holes are located on the side edges, and the tool set and the parts are installed in the plane of each edge. In this case, the parts position dimensioned repetitiveness against the work station production units and the equal structural stiffness of carrier body in the directions of parts treatment. The article considers the model of system of equally spaced basing holes for simulation of the carrier accuracy of location. The parameters characterizing the accuracy of processing of each basing hole are defined on the basis of dimensional analysis. The study showed the influence of relative position of each basing hole of the carrier on the accuracy of the part processing. To specify the conditions of treatment of basing holes using the automated equipment, the author determined the parameters of treatment which should be ensured to resolve the issues of accuracy of location of the carrier on the work station. The requirements for technology process of production of basing holes were determined on the basis of simulation of dimensional conjunctions. The study showed the necessity of taking into account the decrease of accuracy of their relative position in the result of processing.

According to the simulation results, the ensuring of required relative position of basing holes during their processing will allow to meet the requirements for relative position of the carriers of the reconfigurable manufacturing systems.

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТКИ ПРИ ГЛУБИННОМ ПРОФИЛЬНОМ ШЛИФОВАНИИ

© 2015

В.Ф. Макаров, доктор технических наук, профессор

С.П. Никитин, кандидат технических наук, доцент

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь (Россия)

Ключевые слова: технология обработки; глубинное шлифование; многокоординатная обработка; динамическая система станка; динамические характеристики.

Аннотация: Представлена методика системного анализа качества обработки поверхностей при глубинном профильном шлифовании на многокоординатном станке профилей сложной формы. Предложены алгоритм действий по обеспечению качества глубинного профильного шлифования лопаток, математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка в виде структурной схемы при учете процесса резания. Алгоритм предполагает выяснение динамического состояния технологической системы на основе математической модели теплодинамической системы шлифовального станка с учетом динамики упругих, тепловых и рабочих процессов. Динамическое состояние технологической системы определяет условия осуществления процесса глубинного шлифования. Как известно, с увеличением глубины процесс шлифования может становиться неустойчивым. В условиях неустойчивости выполнение обработки или достижение заданных параметров качества невозможно. При обеспечении устойчивости процесса необходимо на основе математической модели получить статические и динамические характеристики, которые будут определять взаимные смещения шлифовального круга и заготовки, текущую глубину резания, колебания силы и температур в зоне резания. Далее приведенная математическая модель позволяет спрогнозировать съем материала, износ шлифовального круга и шероховатость каждой поверхности на основе режимов резания, характеристики круга, динамики упругих, тепловых и рабочих процессов в технологической системе. Знание влияния режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей позволяет аналитически определить наиболее оптимальные характеристики круга и режимы шлифования для обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя лопатки газотурбинного двигателя: шероховатость поверхности, физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения), точность. Данная методика позволяет управлять процессом глубинного профильного шлифования для достижения заданных параметров качества поверхностей, размерной точности профиля лопаток газотурбинных двигателей и повышения производительности обработки на многокоординатном станке профилей сложной формы.

Для окончательной обработки лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) широко используется глубинное профильное шлифование. Для повышения точности, гибкости и производительности обработка осуществляется на многокоординатных обрабатывающих центрах с ЧПУ. При этом возникают проблемы с размерной точностью сложного профиля лопатки, а также с дефектами поверхностного слоя в виде прижогов и трещинообразования на ряде поверхностей [1–5]. Для обеспечения заданной размерной точности и качества поверхностного слоя при обработке лопаток ГТД приходится реализовывать множество проходов [1], что снижает производительность глубинного шлифования.

Задача заключается в том, чтобы при многокоординатной обработке глубинным профильным шлифованием установить такие режимы резания и характеристики шлифовального круга, которые бы обеспечили заданные параметры качества поверхностей, размерную точность и максимальную производительность. Для этого нужно учесть влияние режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей [3; 6].

При глубинном профильном шлифовании контура сложной формы одновременно формируется несколько различных поверхностей, которые определяют форму элементов лопаток (рис. 1): плоские, торцовые, радиусные поверхности и их комбинации. К этим поверхностям предъявляются заданные требования по точности расположения и качеству поверхностного слоя. При их одновременной обработке создаются различные условия реализации процесса шлифования: варьирование

режимов резания, припусков, длины контакта шлифовального круга с заготовкой и др. Это приводит к различию сил резания, действующих на зерно; упругих и динамических деформаций; величины съема; температур в зоне контакта, которые определяют размерную точность и качество поверхностного слоя [1–3; 6]. Поэтому возникает вопрос, какие режимы шлифования и характеристику круга необходимо задать, чтобы обеспечить приемлемые размерную точность и качество поверхностного слоя.

Знание влияния режимов резания и характеристик круга на качество каждой из обработанных поверхностей позволяет аналитически определить наиболее оптимальные характеристики круга и режимы шлифования для обеспечения заданных параметров качества поверхностного слоя лопатки ГТД: шероховатость поверхности, физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения), точность [4; 6; 7]. Математически данную задачу можно сформулировать в виде системы неравенств (1).

Первые два неравенства определяют обеспечение заданных параметров шероховатости R_a , где β_R , α_R – максимально и минимально допустимые параметры шероховатости.

$$\left. \begin{aligned} R_a &\leq \beta_R; \quad R_a \geq \alpha_R \\ \sum_i \Delta R &\leq \Delta R_{\text{пр}}; \quad \theta \leq \theta_{\text{пр}} \\ t_{\phi} &\geq \xi_{\text{кр}} \cdot \rho_3; \quad t_{\phi} \leq \psi_{\text{кр}} \cdot \rho_3 \\ \eta \cdot W_c &\leq W_{\text{п}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Параметр точности поверхностей при глубинном профильном шлифовании будет определяться сохранением формы круга при шлифовании, т. е. радиальным износом $\Sigma\Delta R$, который должен быть примерно равным при обработке разных поверхностей сложного профиля лопатки и не должен превышать допустимый уровень $\Delta R_{пр}$.

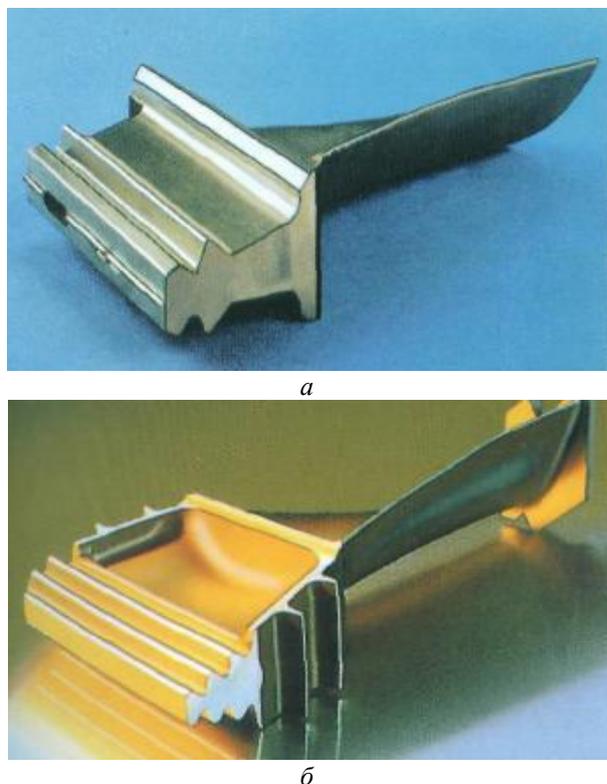


Рис. 1. Общий вид рабочих лопаток турбины: а – без бандажной полки, б – с бандажной полкой

Необходимо физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения) поверхностного слоя, исключающее появление прижогов и трещин, прежде всего, нужно ограничивать температуру в зоне шлифования $\theta \leq \theta_{пр}$.

Помимо этого характеристика шлифовального круга должна обеспечивать оптимальные условия для стружкообразования: требуемые величину микрорезания зерен круга t_{ϕ} и объем пространства между зерен для размещения стружки W_c . Глубина микрорезания должна быть больше минимальной $\xi_{кр} \cdot \rho_3$, обеспечивающей сьем материала, и меньше предельной $\psi_{кр} \cdot \rho_3$, при которой происходит интенсивное удаление или разрушение зерен. Предельные значения определяются в виде величины по отношению к радиусу закругления зерен ρ_3 .

Для обеспечения заданных значений качества, размерной точности и производительности при глубинном профильном шлифовании лопаток газотурбинных двигателей на многокоординатных станках можно предложить следующий алгоритм действий (рис. 2).

На первом этапе разрабатывается предварительная операционная технология обработки контура сложного профиля на многокоординатном станке с ЧПУ. Выби-

рается схема, назначаются режимы резания, выбирается характеристика круга на основе традиционных, сложившихся методик. На втором этапе разрабатывается математическая модель теплодинамической системы глубинного профильного шлифования, которая учитывает динамику механических, тепловых и рабочих процессов [8–18]. Третий этап связан с использованием полученной математической модели для изучения условий осуществления процесса глубинного шлифования. Как известно, с увеличением глубины процесс шлифования может становиться неустойчивым [10; 19–21].

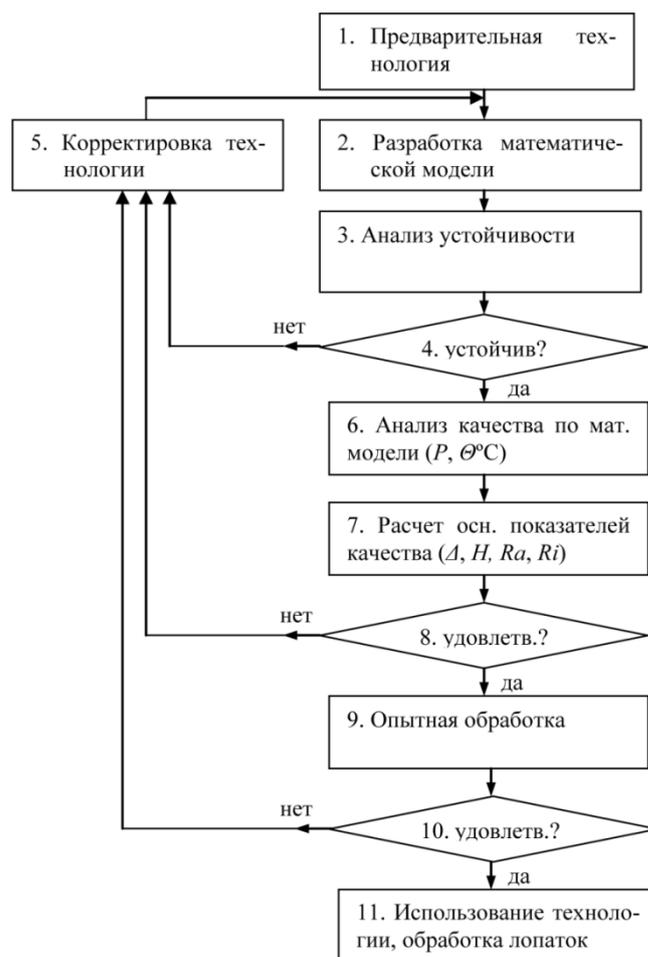


Рис. 2. Алгоритм действий по обеспечению качества глубинного профильного шлифования лопаток

В условиях неустойчивости выполнение обработки или достижение заданных параметров качества невозможно, поэтому требуется корректировка исходной технологии (этап 5). Для преодоления этой проблемы можно снизить глубину шлифования и производить обработку за несколько проходов, что снижает производительность и эффективность глубинного шлифования. Математическое моделирование позволяет добиться устойчивости процесса глубинного шлифования за счет изменения других параметров обработки, в том числе конструктивных параметров технологической системы, при сохранении максимально возможной производительности. После корректировки технологии

необходимо уточнить математическую модель и заново проверить систему на устойчивость.

При обеспечении устойчивости процесса необходимо на основе математической модели получить статические и динамические характеристики [20; 21], которые будут определять взаимные смещения шлифовального круга и заготовки, текущую глубину резания t_{ϕ} , колебания силы и температур в зоне резания θ_i (этап 6).

На этапе 7 определяются основные показатели размерной точности и качества поверхностного слоя для каждой из обрабатываемых поверхностей с учетом схемы шлифования (круглое, торцовое шлифование, плоское шлифование периферией круга). Рассчитывают величину съема материала, вероятность удаления материала, величину слоя микронеровностей, среднее арифметическое отклонение профиля, оценивают величину износа круга по каждой обрабатываемой поверхности [7].

При удовлетворении заданных требований размерной точности и качества поверхностного слоя по каждой из обрабатываемых поверхностей, образующих профиль сложного контура лопатки, необходимо провести пробную обработку заготовки по выбранной технологии (этап 9). Если контроль подтверждает достижение требуемых параметров качества лопатки, то данная технология используется для дальнейшей обработки (этап 11). При этом использование многокоординатных станков с ЧПУ сокращает время и затраты на технологическую подготовку производства.

Предложенная методика позволяет определять данные показатели для каждой поверхности при абразивной обработке сложного контура в условиях самозатачивания на основе исходных значений характеристики шлифовального круга, режимов резания, физико-механических свойств материала и динамического состояния системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ).

Для выяснения динамического состояния системы СПИЗ целесообразно математическое моделирование процесса глубинной обработки с учетом динамики упругих, тепловых и рабочих процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.310016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства» от 12.02.13 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов. СПб.: Лань, 2013. 320 с.
- Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
- Полетаев В.А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
- Капанец Э.Ф., Кузьмич К.К., Прибыльский В.И., Тилигузов Г.В. Точность обработки при шлифовании. Минск: Наука и техника, 1987. 152 с.
- Зубарев Ю.М., Приемышев А.В. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. СПб.: Лань, 2010. 304 с.

- Безъязычный В.Ф. Определение технологических условий обработки, обеспечивающих заданную величину предела выносливости материала исследуемых образцов // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 8. С. 3–8.
- Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та, 1972. 232 с.
- Никитин С.П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12. № 4. С. 61–65.
- Никитин С.П. Моделирование динамики процесса механической обработки с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем станка // СТИН. 2008. № 6. С. 8–13.
- Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
- Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
- Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
- Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
- Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
- Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждение инструментов. М.: Машиностроение, 1963. 198 с.
- Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки. Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
- Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск: Выш. шк., 1990. 512 с.
- Попов В.М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. М.: Энергия, 1971. 216 с.
- Никитин С.П. Теоретическое исследование устойчивости при обработке шлифованием // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17. № 8. С. 38–44.
- Tawakoli T. HochleistungsFlachschleifen – Technologie, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1988. 137 s.
- Dietrich W. Analyse selbsterregter Schwingungen beim Aussenrund-Einsteichschleifen: diss. Braunschweig, 1984. 164 s.

REFERENCES

- Makarov V.F. *Sovremennye metody vysokoэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов* [Modern methods of high-performance abrasion of resistant steels and alloys]. S. Peterburg, Lan' publ., 2013, 320 p.
- Starkov V.K. *Shlifovanie visokoporistimi krugami* [Grinding with highly porous grinding circles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2007, 688 p.
- Poletaev V.A., Volkov D.I. *Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin* [Deep grinding of turbine blades]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2009, 272 p.
- Kapanets E.F., Kuzmich K.K., Pribylskiy V.I., Tiliguzov G.V. *Tochnost obrabotki pri shlifovanii* [Pro-

- cessing accuracy in grinding]. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1987, 152 p.
5. Zubarev Yu.M., Priemyshev A.V. *Teoriya i praktika povisheniya effektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of increasing the efficiency of materials grinding]. S. Peterburg, Lan' publ., 2010, 304 p.
 6. Bezjazychnyi V.F. Calculation of processing conditions to provide required value of fatigue strength of the material studied samples. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2014, no. 8, pp. 3–8.
 7. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of surface shaping in grind process]. Saratov, Saratovskiy universitet publ., 1972, 232 p.
 8. Nikitin S.P. Modeling of cutting operation in grinding subject to coupling elastic and thermal systems. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 61–65.
 9. Nikitin S.P. Modeling of machining process dynamics with reporting the interaction of elastic and thermal systems of the machine. *STIN*, 2008, no. 6, pp. 8–13.
 10. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1967, 360 c.
 11. Kedrov S.S. *Kolebaniya metallorezhushchikh stankov* [Fluctuations in metal-cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1978, 199 p.
 12. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of processes of materials machining]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 279 p.
 13. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovie protsessi v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 288 p.
 14. Reznikov A.N. *Teplofizika rezaniya* [Thermophysics of cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1969, 288 p.
 15. Reznikov A.N. *Teploobmen pri rezanii i okhlazhdenii instrumentov* [Heat transfer in cutting and cooling of tools]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1963, 198 p.
 16. Yakimov A.V., Slobodyanik P.T., Usov A.V. *Teplofizika mekhanicheskoy obrabotki* [Thermophysics of machining]. Odessa, Lybid' publ., 1991, 240 p.
 17. Yashcheritsin P.I. *Teoriya rezaniya. Fizicheskie i teplovie protsessi v tekhnologicheskikh sistemakh* [Theory of cutting. Physical and thermal processes in technological systems]. Minsk, Visheyshaya shkola publ., 1990, 512 p.
 18. Popov V.M. *Teploobmen v zone kontakta razyemnykh i nerazyemnykh soedineniy* [Heat transfer in the contact zone of detachable and permanent joints]. Moscow, Energiya publ., 1971, 216 p.
 19. Nikitin S.P. Theoretical study of stability when processing by grinding. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 17, no. 8, pp. 38–44.
 20. Tawakoli T. *HochleistungsFlachschleifen – Technologie, Verfahrensplanung und wirtschaftlicher Einsatz*. Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH, 1988, 137 s.
 21. Dietrich W. *Analyse selbsterregter Schwingungen beim Aussenrund-Einsteichschleifen*: diss. Braunschweig, 1984, 164 s.

QUALITY MANAGEMENT OF THE BLADES SURFACE LAYER UNDER DEEP PROFILE GRINDING

© 2015

V.F. Makarov, Doctor of Engineering, Professor
S.P. Nikitin, candidate of technical sciences, Associate Professor
 Perm National Research Polytechnic University, Perm (Russia)

Keywords: processing technology; deep grinding; multiaxis machine; machine dynamic system; dynamic behavior.

Abstract: The article provides the system oriented analysis regarding surface treatment quality after deep profile grinding of complex shapes on a multiaxis machine. This method implies using an algorithm of actions to ensure the quality of deep profile grinding of blades, a mathematical model of heat-dynamic system of a grinding machine in a block diagram form, taking into account the cutting process. The algorithm involves elucidation of the dynamic state of a technological system based on the mathematical model of heat-dynamic system of the grinding machine with consideration of dynamics of elastic, thermal and working processes. The dynamic state of the technological system determines the conditions of deep grinding process. As it is well known, with increasing depth the grinding process can become unstable. In conditions of instability, execution or achievement of specified quality parameters is impossible. To ensure stability of the process it is necessary to receive on the basis of a mathematical model the static and dynamic characteristics which will define the mutual displacement of the grinding disk and a workpiece, the current cutting depth, strength and temperature fluctuations in the cutting zone. The proposed mathematical model allows predicting the removal of material, grinding disk wear and roughness of each surface, based on the cutting modes, characteristics of the disk, dynamics of elastic, heat and work processes in the technological system. Knowledge of the impact of the cutting modes and disk characteristics on the quality of each of the treated surfaces enables to determine analytically the optimal characteristics of the grinding disk and grinding modes to ensure the specified quality parameters of the surface layer of the gas turbine engine blades: surface roughness, physical and mechanical condition (cold hardening, residual stresses), accuracy. This technique allows managing the process of deep profile grinding to achieve the desired surface quality parameters, dimensional accuracy of the profile of the gas turbine engines blades, and increase of processing performance on multi-axis machine of complex shape profiles.

П.А. Мельников, кандидат технических наук, доцент

А.Н. Пахоменко, кандидат технических наук, доцент

А.А. Лукьянов, магистрант

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; выглаживание; моделирование обработанной поверхности; микрорельеф; шейка вала.

Аннотация: Эксплуатационные характеристики изделий в значительной мере определяются технологическим процессом их изготовления. В современном машиностроении все чаще выдвигаются требования к поверхностям деталей, работающих в условиях трения, наличие регулярного микрорельефа. В данной работе предложена технология и математическая модель для расчета микрорельефа обработанной поверхности шейки вала под манжетное уплотнение. При рассмотрении пары трения манжета – вал были определены основные причины ее износа.

Рассмотрены схемы нанесения регулярного микрорельефа при алмазном выглаживании. Рассмотрены схемы и профилограммы поверхностей с получаемыми системами канавок. Выполнена классификация получаемых микрорельефов при вибровыглаживании. Определена зависимость характера микрорельефа от параметров обработки.

В соответствии с тенденцией развития машиностроения, авторами предложен переход от одного параметра, описывающего требования к микрогеометрии поверхности детали, к требованию в виде наличия регулярного микрорельефа.

Показаны результаты расчета математической модели процесса обработки алмазным выглаживанием, позволяющей моделировать рельеф обработанной поверхности в зависимости от параметров и условий обработки.

Авторами получены результаты моделирования поверхности обработанной детали в процессе алмазного выглаживания с наложением колебаний. Сопоставляя результаты моделирования с теоретическими результатами, можно судить об адекватности расчетов математической модели.

Сделаны выводы о возможности с помощью математической модели прогнозировать получаемый микрорельеф на поверхности детали после обработки выглаживанием с наложением колебаний. Результаты теоретических исследований, на основе которых разработана математическая модель процесса выглаживания с наложением колебаний, коррелируют с теми, что получены на практике.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные характеристики изделий в значительной мере определяются технологическим процессом их изготовления.

При рассмотрении узла трения «манжетное уплотнение – шейка вала» в силу значительного различия механических свойств (твердости, модуля упругости) трущихся материалов решающую роль на трение и износ резин оказывает шероховатость металлической поверхности вала [1–3].

Согласно изложенным представлениям о природе трения, коэффициент трения:

$$f = \frac{F}{N} = \frac{(F_{\text{мол}} + F_{\text{деф}})}{N} = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}}, \quad (1)$$

где F – суммарная сила трения;

N – нагрузка, создаваемая силой прижатия кромки манжеты к валу;

$F_{\text{мол}}$ и $f_{\text{мол}}$ – молекулярно составляющая соответственно силы трения и коэффициента трения;

$F_{\text{деф}}$ и $f_{\text{деф}}$ – деформационные составляющие.

Адгезионная составляющая коэффициента трения зависит от сил адгезионного взаимодействия и коэффициента упрочнения образовавшейся связи под нагрузкой:

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_0}{Pr} + \beta, \quad (2)$$

где τ_0 – прочность фрикционной связи, возникающей на фактической площади контакта, при сдвиге;

β – коэффициент упрочнения адгезионной связи;

Pr – давление на пятне фактического контакта.

Деформационная составляющая коэффициента трения $f_{\text{деф}}$ зависит от отношения глубины внедрения h микронеровности при скольжении к радиусу скругления ее вершины R :

$$f_{\text{деф}} = K \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (3)$$

где K – коэффициент.

Таким образом, очень гладкие поверхности (параметр шероховатости $Ra=0,04\dots0,16$ мкм) при контакте с манжетой в процессе работы за счет увеличения фактической площади контакта (следовательно, увеличивается τ_0) имеют большую молекулярную составляющую силы трения. Кроме того, такие поверхности не способны в процессе работы удержать и транспортировать смазку малой вязкости в зону контакта уплотняющего элемента, в результате чего возникает большое сопротивление сдвигу при так называемом пленочном голодании.

Шероховатые, грубые поверхности вала (параметр шероховатости $Ra=2,5\dots1,25$ мкм) удерживают смазку, но под действием нормальных и сдвиговых усилий возникают значительные деформации поверхностного слоя более мягкого материала пары. Коэффициент трения увеличивается вследствие увеличения его деформационной составляющей (т. к. увеличивается отношение h/R).

Возможен разрыв смазочной пленки. В результате возникает повышенный износ уплотнения. Шероховатость вала приводит к тому, что контактная поверхность манжеты изнашивается и также становится шероховатой. Это способствует шаржированию манжеты частицами износа и абразива. Таким образом, повышенная шероховатость вала оказывает на износ манжеты «двойное» влияние, выражающееся в проявлении упомянутых явлений. Максимальная долговечность манжетного уплотнения достигается при параметре шероховатости $Ra=0,16...0,63$ мкм [1], при этом в данной работе указывается, что шероховатость вала под герметизатором должна иметь значение $Ra \leq 0,32$.

Если рассмотреть пару трения манжета – вал, то можно отметить, что износ вала также связан с тем, что в месте установки манжеты собираются продукты износа, образовавшиеся в процессе работы зубчатых передач и подшипников в редукторах, коробках передач и шпиндельных головок [4]. Этому способствует вертикальное расположение валов (шпинделей). С другой стороны в уплотнения собираются частицы внешней среды (грязь, абразивные частицы, стружка и т. п.). Попадая в зону контакта манжеты с валом, эти частицы застревают в резине и изнашивают вал.

Вместе с этим обеспечение высокой износостойкости вала в условиях абразивного изнашивания требует повышения твердости его поверхности.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что наилучшие эксплуатационные характеристики уплотнений достигаются в том случае, когда поверхность трения является гладкой, но в то же время имеет масляные карманы для удержания смазки в сопряжении. Проявлению гидродинамического эффекта в сопряжении способствует нанесение на гладкую поверхность вала микрорельефа определенного вида.

Процесс алмазного выглаживания кинематически аналогичен точению, только вместо резца применяется алмазный выглаживатель, который, пластически деформируя поверхностный слой, выравнивает и упрочняет его [5–9].

По сравнению с традиционными методами финишной обработки (тонкое шлифование, хонингование, суперфиниширование, полирование), метод выглаживания имеет ряд преимуществ:

- обеспечивается более эффективное снижение шероховатости заготовки, что позволяет в ряде случаев сокращать количество переходов и операций [10];

- обработанная поверхность характеризуется округлым профилем и относительно большой опорной поверхностью [11];

- поверхностный слой изделий упрочняется, формируется мелкозернистая структура, образуются благоприятные остаточные напряжения сжатия [12; 13].

Указанные преимущества проявляются в улучшении эксплуатационных характеристик изделий: повышении долговечности, износостойкости и усталостной прочности [14].

При обработке поверхностей, работающих в условиях трения, долгое время основным параметром, описывающим требования к микрогеометрии поверхности детали, являлся параметр шероховатости Ra , мкм. Однако, как показывает тенденция развития машиностроения, в настоящее время одного параметра недос-

точно и все чаще к поверхностям деталей машин, работающих в условиях трения, предъявляют требования в виде наличия регулярного микрорельефа.

В работе [6] предложен метод алмазного выглаживания с наложением продольных колебаний (рис. 1), в результате которых на поверхности детали формируется микрорельеф.

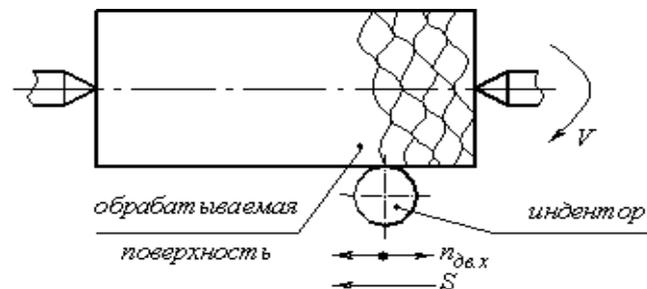


Рис. 1. Схема нанесения микрорельефа алмазным выглаживанием

Согласно экспериментальным и теоретическим исследованиям, приведенным в работах [1; 6], можно классифицировать получаемые микрорельефы при вибровыглаживании на несколько видов (рис. 2). При этом на практике характер микрорельефа зависит от параметров обработки и прежде всего от следующих параметров: S – подача выглаживающего индентора, мм/об; R – радиус индентора, мм; h – глубина внедрения индентора, мм; A – амплитуда колебания инструмента, мм; ω – частота колебаний инструмента, Гц.

Для обеспечения прогнозирования получаемого микрорельефа поверхностей деталей в зависимости от указанных параметров обработки возникает необходимость в разработке математической модели [15–17]. В работах [4; 18; 19] представлен алгоритм построения математической модели построения микрорельефа поверхности, обработанной алмазным выглаживанием, в зависимости от параметров обработки. Ниже (рис. 3–8) показаны результаты расчета математической модели процесса обработки алмазным выглаживанием, позволяющей моделировать рельеф обработанной поверхности в зависимости от параметров и условий обработки.

Для обеспечения регулярного микрорельефа на поверхности детали [4; 20] при усложнении кинематики движения инструмента (придания индентору в процессе выглаживания возвратно-поступательных колебаний вдоль оси обрабатываемой детали) в математическую модель [4] необходимо внести изменение, обеспечивающее изменение траектории движения индентора, описываемое уравнением:

$$\Delta y_{instr} = \frac{1}{2} A \sin(2\pi \cdot \omega t), \quad (4)$$

где Δy_{instr} – корректировка положения инструмента в процессе обработки с учетом совершения колебательных движений, мм; A – амплитуда колебания инструмента, мм; ω – частота колебаний инструмента, Гц.

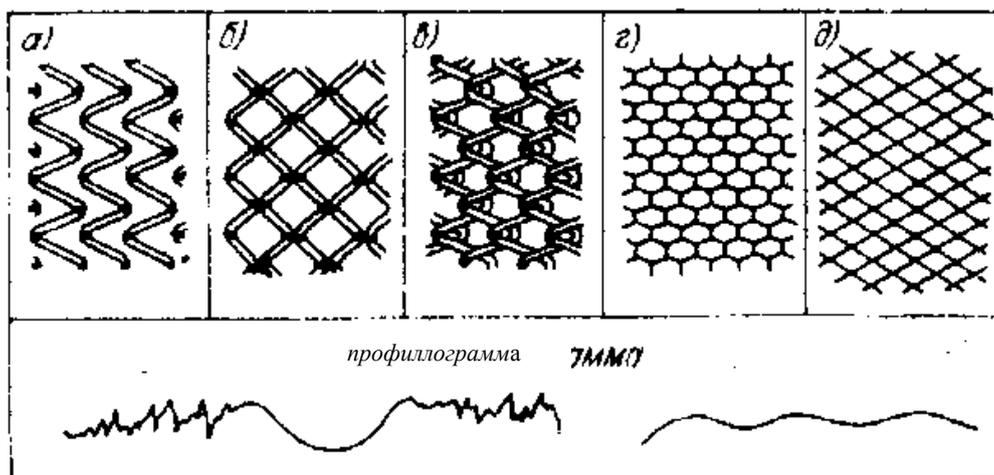


Рис. 2. Схемы и профилограммы поверхностей с системами канавок (а, б, в) и полностью новым регулярным микрорельефом (г, д), регламентированные ГОСТ 24773-81 поверхности с регулярным микрорельефом

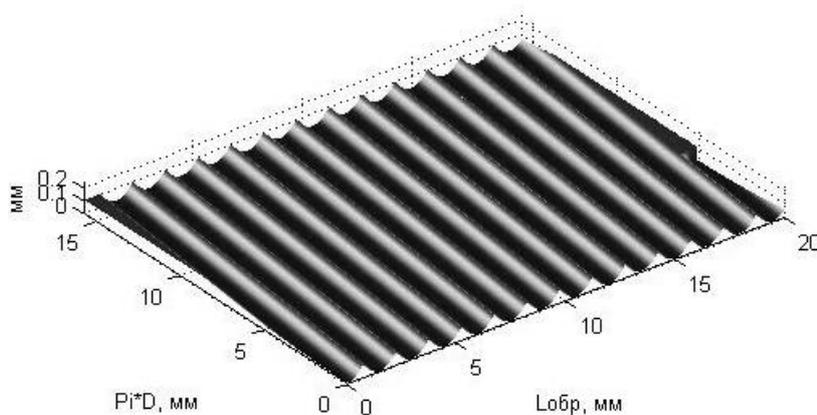


Рис. 3. Пример поверхности, полученной с помощью математической модели, при следующих режимах обработки: $S=1,5$ мм/об; $R=3$ мм; $h=0,1$ мм [4]

Представлены результаты моделирования поверхности обработанной детали в процессе алмазного выглаживания с наложением колебаний (рис. 4). В целом, сопоставляя результаты моделирования (рис. 4) с теоретическими результатами (рис. 2 б), можно судить об адекватности расчетов математической модели. Однако, анализируя фотографии микрорельефа поверхности (рис. 5), обработанной выглаживанием, видно, что для повышения адекватности расчетов необходимо внести в математическую модель алгоритмы, учитывающие микрорельеф исходной поверхности обрабатываемой детали, получаемой на предыдущих операциях.

При математическом моделировании абразивной обработки процесс формообразования целесообразнее рассмотреть как стохастическое воздействие зерен абразивного круга на поверхность обрабатываемой детали [15]. Таким образом, с помощью математической модели можно прогнозировать получаемый микрорельеф на поверхности детали после обработки выглаживанием с наложением колебаний. Так, при частоте колебания индентора, кратной частоте вращения детали, и амплитуде колебаний меньше продольной подачи на поверхности детали форми-

руется частично регулярный микрорельеф в виде серии паролных волновых канавок (рис. 6). Данный рельеф сопоставим с тем, что приведен в ГОСТ 24773-81 (рис. 2 а).

При амплитуде колебания индентора, равной подаче инструмента, а частоте колебаний индентора, равной частоте вращения детали, но смещенной по фазе на пол-оборота, на поверхности детали формируется частично регулярный микрорельеф в виде касающихся друг друга канавок (рис. 7). Данный рельеф сопоставим с тем, что приведен в ГОСТ 24773-81 (рис. 2 б).

Чтобы обеспечить микрорельеф в виде пересекаемых канавок, необходимо увеличить амплитуду колебания индентора (рис. 8).

Данный рельеф сопоставим с тем, что приведен в ГОСТ 24773-81 (рис. 2 в). Для получения полностью нового регулярного микрорельефа, регламентированного ГОСТ 24773-81, необходимо, чтобы в процессе выглаживания полностью пластически деформировались микронеровности и следы от предыдущей обработки. Это можно обеспечить, увеличив силу прижатия выглаживателя к обрабатываемой поверхности и как следствие – увеличив глубину внедрения инструмента.

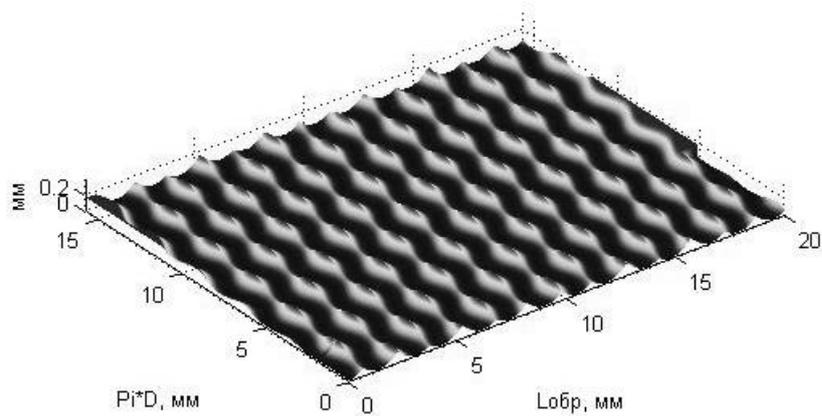
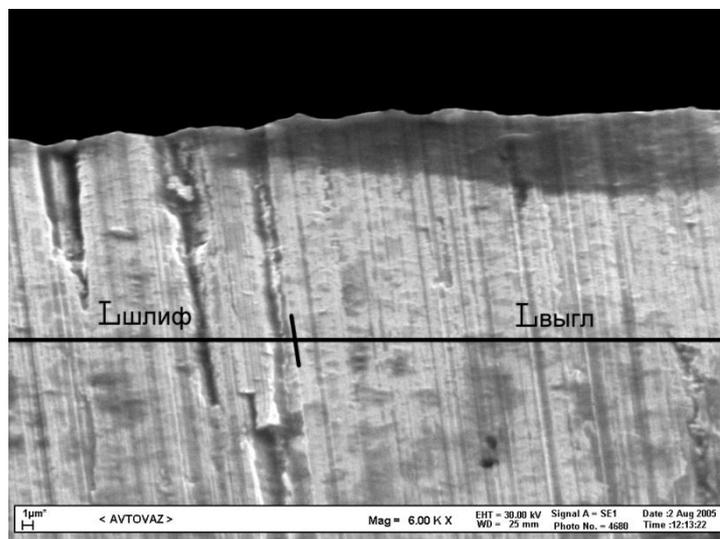
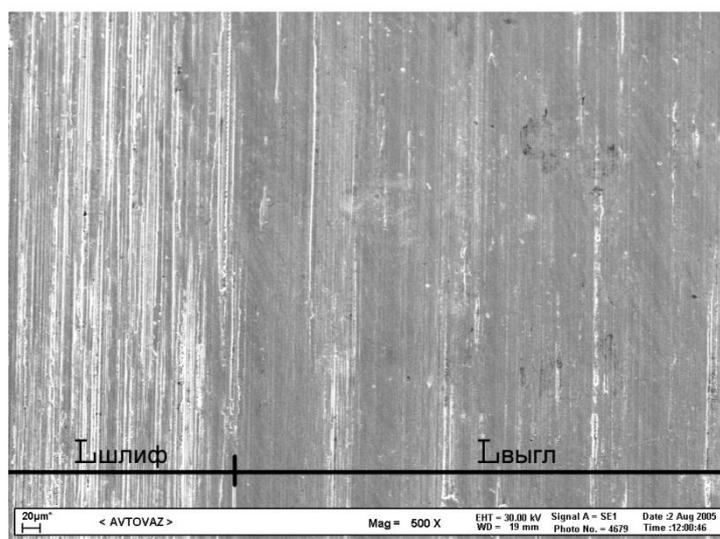


Рис. 4. Пример поверхности, полученной с помощью математической модели, при следующих режимах обработки: $S=1,5$ мм/об; $R=3$ мм; $h=0,1$ мм; $\omega=15$ Гц; $A=0,5$ мм [4]



а



б

Рис. 5. Фотографии микрорельефа выглаженных поверхностей: а – профиль, б – вид сверху

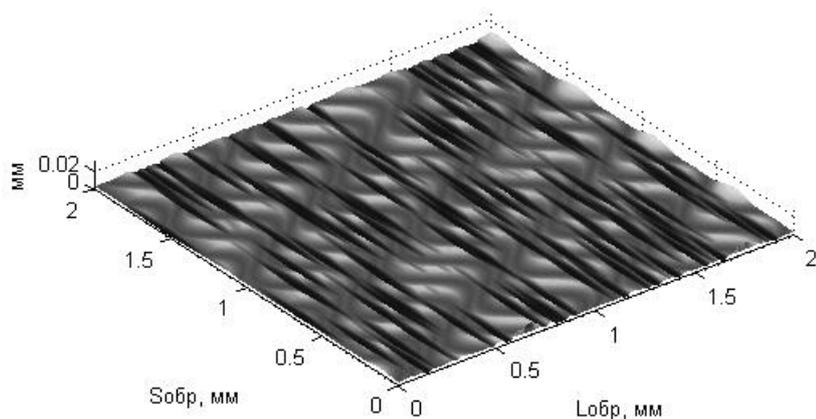


Рис. 6. Пример поверхности, полученной с помощью математической модели процесса выглаживания с учетом технологической наследственности, при следующих режимах обработки: $S=0,15$ мм/об; $R=2$ мм; $h=0,01$ мм; $\omega=15$ Гц; $A=0,15$ мм

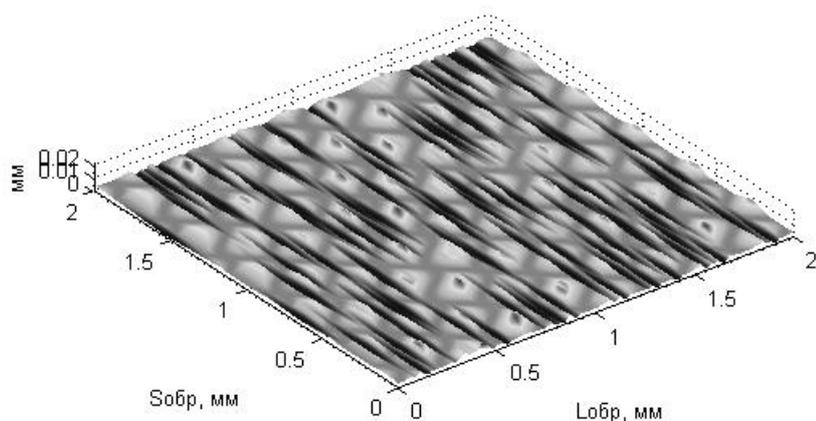


Рис. 7. Пример поверхности, полученной с помощью математической модели процесса выглаживания с учетом технологической наследственности, при следующих режимах обработки: $S=0,15$ мм/об; $R=2$ мм; $h=0,01$ мм; $\omega=14,5$ Гц; $A=0,15$ мм

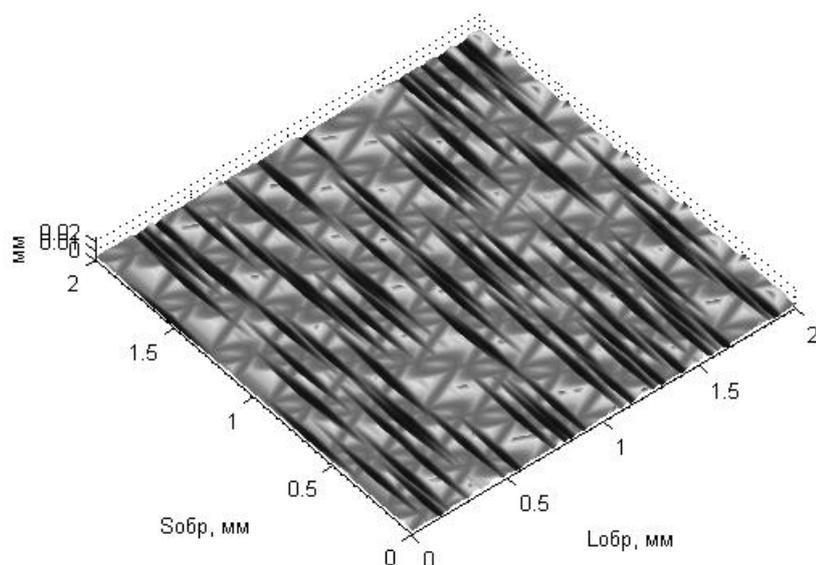


Рис. 8. Пример поверхности, полученной с помощью математической модели процесса выглаживания с учетом технологической наследственности, при следующих режимах обработки: $S=0,15$ мм/об; $R=2$ мм; $h=0,01$ мм; $\omega=14,5$ Гц; $A=0,3$ мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно, результаты теоретических исследований, на основе которых разработана математическая модель процесса выглаживания с наложением колебаний, коррелируют с теми, что получены на практике.

При проведении дальнейших исследований предполагается внести в математическую модель ряд алгоритмов, учитывающих упруго-пластические свойства обрабатываемой поверхности.

Проведение научно-исследовательской работы осуществляется при поддержке стипендии Президента Российской Федерации СП-2627.2015.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобровский Н.М. Повышение долговечности наружных поверхностей валов методом выглаживания широким самоустанавливающимся инструментом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 16 с.
2. Бобровский Н.М., Барабанов С.И., Максименко Н.Н., Бобровский И.Н. Оценка качества методов обработки ППД без использования смазочно-охлаждающих жидкостей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. № 56. С. 37–43.
3. Мельников П.А., Селиванов А.С., Хамидуллова Л.Р. Повышение эксплуатационных свойств сальниковых шеек коленчатых валов путем оптимизации технологии изготовления // Объединенный научный журнал. 2003. № 29. С. 15–17.
4. Бобровский Н.М. Выглаживание как способ повышения долговечности пар «Сальник-вал» // Автомобильная промышленность. 2003. № 9. С. 30–31.
5. Горгоц В.Г., Кузнецов В.П., Губанов В.Ф., Ильичев С.А. Оптимизация процесса алмазного выглаживания деталей компрессорной техники // Компрессорная техника и пневматика. 2006. № 8. С. 33.
6. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением. СПб.: Политехника, 1998. 413 с.
7. Селиванов А.С., Малышев В.И., Даньшина Е.А. Формирование дислокационной структуры при ультразвуковом алмазном выглаживании стали 08X12N10T // Проведение научных исследований в области машиностроения. Т. 1. 2009. С. 231–236.
8. Селиванов А.С. Технологическое обеспечение шероховатости поверхности, обработанной выглаживанием без применения традиционных смазочных охлаждающих технологических сред // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005. № 39. С. 139–146.
9. Кузнецов В.П., Макаров А.В., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А., Роговая С.А., Кирыков А.Е. Упрочнение и повышение качества поверхности деталей из аустенитной стали алмазным выглаживанием на токарном/фрезерном центре // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 11. С. 16–26.
10. Бобровский Н.М. Повышение долговечности наружных поверхностей валов методом выглаживания широким самоустанавливающимся инструментом : дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 161 с.
11. Бобровский И.Н., Мельников П.А., Бобровский Н.М., Лукьянов А.А., Ежелев А.В. Технологическое

обеспечение трибологических свойств сальниковых шеек деталей машин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 340–343.

12. Малышев В.И., Селиванов А.С., Петрова А.С. Физические особенности пластической деформации поверхностного слоя при механической обработке в ультразвуковом поле // Сборник научных трудов SWorld. 2012. Т. 7. № 3. С. 36–43.
13. Малышев В.И., Селиванов А.С. Анализ развития пластической деформации в поверхностном слое при ультразвуковом алмазном выглаживании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4-1. С. 233–236.
14. Бобровский Н.М., Бобровский И.Н., Мельников П.А. Определение площади износа рабочей поверхности деталей машин и инструментов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2009. № 1. С. 17–23.
15. Широков А.В. Повышение эффективности шлифования заготовок на основе имитационного моделирования процесса формирования шероховатости поверхности : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2012. 18 с.
16. Абульханов С.Р., Воронин В.Н., Горяинов Д.С., Денисенко А.Ф., Папшев В.А., Сорокин И.П., Шапошников С.Д. Твердотельное моделирование микрорельефа цилиндрических поверхностей различной кривизны // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4-2. С. 303–306.
17. Дьяконов В.П. Matlab: Современное средство математического моделирования процессов. СПб.: Питер, 2001. 553 с.
18. Мельников П.А., Попов А.Н., Липандина Н.В. Моделирование процесса формирования микрорельефа обработанной поверхности при алмазном выглаживании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 112–114.
19. Кузнецов В.П. Методика определения параметров инструмента для упругого выглаживания на основе моделирования нелинейной динамики процесса // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 3. С. 18–26.
20. Кузнецов В.П., Никонов А.Ю., Дмитриев А.И., Псахье С.Г., Макаров А.В. Исследование механизмов наноструктурирования поверхностного слоя при пластическом деформировании скользящим индентором. Моделирование на атомном масштабе // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 3. С. 59–69.

REFERENCES

1. Bobrovsky N.M. *Povishenie dolgovechnosti naruzhnikh poverkhnostey valov metodom viglazhivaniya shirokim samoustanavlivayushchimsya instrumentom*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of life time of outer surfaces of shafts using the method of burnishing with the extended self-adjusting tool]. Moscow, 1999, 16 p.
2. Bobrovsky N.M., Baranov S.I., Maksimenko N.N., Bobrovsky I.N. Estimation of quality of method forming manufacture without using of lubricoolant. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2008, no. 56, pp. 37–43.

3. Melnikov P.A., Selivanov A.S., Khamidullova L.R. Improvement of performance characteristics of gland journals of crankshafts using the optimizing of production technology. *Obyedinennyi nauchnyi zhurnal*, 2003, no. 29, pp. 15–17.
4. Bobrovsky N.M. Burnishing as a method of life time improvement of “Gland - shaft” couples. *Avtomobilnaya promishlennost*, 2003, no. 9, pp. 30–31.
5. Gorgots V.G., Kuznetsov V.P., Gubanov V.F., Ilyichev S.A. Optimization of the process of diamond burnishing of parts of compressor machines. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2006, no. 8, p. 33.
6. Sheyder Yu.G. *Tekhnologiya finishnoy obrabotki davleniem* [Technology of finishing pressure processing]. S. Peterburg, Politehnika publ., 1998, 413 p.
7. Selivanov A.S., Malyshev V.I., Danshina E.A. Development of dislocation structure during the diamond burnishing of 08X12H10T steel. *Rrovedenie nauchnikh issledovaniy v oblasti mashinostroeniya*, 2009, vol. 1, pp. 231–236.
8. Selivanov A.S. Technology support of surface roughness processed by burnishing without using of customary lubricating cooling process media. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Tekhnicheskije nauki*, 2005, no. 39, pp. 139–146.
9. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Osintseva A.L., Yurovskikh A.S., Savrai R.A., Rogovaya S.A., Kiryakov A.E. The increase of strength and surface quality of austenitic stainless steel parts by diamond burnishing on the turning/milling center. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2011, no. 11, pp. 16–26.
10. Bobrovsky N.M. *Povishenie dolgovechnosti naruzhnykh poverkhnostey valov metodom viglazhivaniya shirokim samoustanavlivayushchimsya instrumentom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of life time of outer surfaces of shafts using the method of burnishing with the extended self-adjusting tool]. Moscow, 1999, 161 p.
11. Bobrovskiy I.N., Melnikov P.A., Bobrovskiy N.M., Lukyanov A.A., Ezhelev A.V. Technological support of tribological properties of machines details omental necks. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 1-2, pp. 340–343.
12. Malyshev V.I., Selivanov A.S., Petrova A.S. Physical characteristics of plastic deformation of surface layer during mechanical processing in ultrasonic field. *Sbornik nauchnikh trudov Sworld*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 36–43.
13. Malyshev V.I., Selivanov A.S. Analysis of plastic deformation on the surface in the process of ultrasonic diamond burnishing. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2010, vol. 12, no. 4-1, pp. 233–236.
14. Bobrovskiy N.M., Bobrovskiy I.N., Melnikov P.A. Definition of deterioration area on machine component and tools. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 1, pp. 17–23.
15. Shirokov A.V. *Povishenie effektivnosti shlifovaniya zagotovok na osnove imitatsionnogo modelirovaniya protsessa formirovaniya sherokhovatosti poverkhnosti*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of effectiveness of blank parts grinding on the basis of imitation modeling of the process of surface roughness development]. Ulyanovsk, 2012, 18 p.
16. Abulkhanov S., Voronin V., Goryainov D., Denisenko A., Papshev V., Sorokin I., Shaposhnikov S. Macrorelief solid-state modeling of different curvature cylindrical surfaces. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, vol. 15, no. 4-2, pp. 303–306.
17. Dyakonov V.P. *Matlab: sovremennoe sredstvo matematicheskogo modelirovaniya protsessov* [Matlab: Modern means of mathematical modeling of processes]. S. Peterburg, Piter publ., 2001, 553 p.
18. Melnikov P.A., Popov A.N., Lipandina N.V. Simulation of forming microrelief treated with diamond surface smoothin. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 112–114.
19. Kuznetsov V.P. Method of equipment parameter determination for the detail elastic burnishing on the basis of nonlinear dynamics modeling of the process. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2009, no. 3, pp. 18–26.
20. Kuznetsov V.P., Mikonov A.Yu., Dmitriev A.I., Psakhie S.G., Makarov A.V. Nanostructuring mechanisms of a surface layer under plastic deformation with a gliding indenter. Atomic scale simulation. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2012, vol. 15, no. 3, pp. 59–69.

**MATHEMATICAL MODEL OF FORMING OF MICRORELIEF OF SHAFT JOURNAL
WHILE PROCESSING BY DIAMOND BURNISHING**

© 2015

P.A. Melnikov, candidate of technical sciences, Associate Professor
A.N. Pahomenko, candidate of technical sciences, Associate Professor
A.A. Lukyanov, undergraduate student
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: surface plastic deformation; burnishing; simulation of processed surface; microrelief; shaft journal.

Abstract: The performance characteristics of the products are determined considerably by the technology process of their production. Modern machine industry sets the requirements to the parts surfaces operating in the friction conditions and the availability of regular microrelief. This work offers the technology and the mathematical model for calculation of the microrelief of processed surface of shaft journal for the cup-type seal. While studying the cup-type seal – shaft friction couple, the main causes for its wear were determined.

The authors considered the schemes of applying of regular microrelief using diamond burnishing and the schemes and profilograms of surfaces with obtained grooves systems. The authors classified the microreliefs obtained in the result of vibro-burnishing and determined the dependence of microrelief nature on the processing parameters.

According to the mechanical engineering development trend, the authors proposed the change from one parameter describing requirements to the part's surface microgeometry to the requirement in the form of regular microrelief availability.

The article shows the results of the mathematical model calculation of the diamond burnishing processing which allows to simulate the relief of processed surface depending on the parameters and processing conditions.

The authors obtained the results of simulation of processed part during diamond burnishing with mode superposition. Comparing the simulation results with the theoretical results, it is possible to estimate the adequacy of mathematical model calculations.

The authors made the conclusions on the possibility of using a mathematical model to estimate the obtained microrelief on the part surface after the burnishing with the mode superposition. The results of theoretical research which are used as the base for mathematical model of the burnishing process with the mode superposition correlate with those obtained in reality.

АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ СВАРКИ С МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ПРИВОДОМ

© 2015

Р.В. Меркулов, старший преподаватель*Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт, Невинномысск (Россия)*

Ключевые слова: высоковольтная импульсная сварка; магнитно-импульсный привод; цветные металлы; сварка в твердой фазе.

Аннотация: Целью работы является анализ процесса импульсной сварки высоковольтным разрядом конденсаторов с использованием магнитно-импульсного привода для получения соединений разнотолщинных и разнородных деталей.

Анализ процесса высоковольтной импульсной сварки осуществлялся на основе электродинамики, теории электроэрозионной обработки, дислокационной теории образования соединений в твердой фазе. Качество сварного соединения оценивалось по результатам испытаний на механическую прочность, термоциклированием, металлографическими исследованиями оптической и электроннолучевой микроскопии.

Обработка данных экспериментальных исследований технологического процесса, анализ выражения магнитного давления через параметры оборудования определили необходимость исследования характеристик переналаживаемого генератора импульсных токов. Определялась собственная и рабочая частота разрядного контура при подключении определенного числа секций с различными типами стандартных импульсных конденсаторов с использованием малоиндуктивных токоподводов. Регистрацию измерений собственных и рабочих параметров контура при подключении секций накопителя и индукционно-динамического привода производили с использованием современного цифрового оборудования.

В результате анализа высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом установлено, что при использовании магнитно-импульсного привода с исходным зазором за счет изменения массы толкателя и величины зазора можно регулировать энерговыделение в зону сварки. Чем больше исходный зазор и масса подвижных элементов, тем больше доля теплового воздействия. При сварке крупногабаритных стержневых деталей ($d=15-20$ мм) необходимо использовать высокочастотные генераторы импульсов тока (собственной частотой более 50 кГц), обеспечивающих смену полярности дугового разряда и, как следствие, увеличение площади разогрева плоской детали за счет эффекта «магнитного дутья».

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении конструкций современной техники наряду с использованием традиционных способов их сварки требуется модернизация или разработка принципиально новых способов, обладающих более широкими возможностями. Особенно остро стоит вопрос о получении разнородных деталей. Получение таких соединений связано с различными условиями теплоотвода. Сложность представляет сварка цветных однородных и разнородных металлов [1; 2]. Конструктивные виды разнородных сварных соединений представлены на рисунке 1.

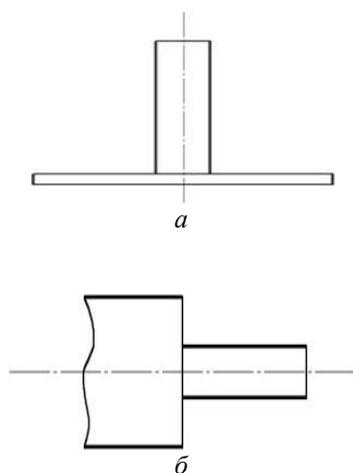


Рис. 1. Конструктивные виды разнородных соединений:
а – стержень – диск; б – стержни встык;
в – трубчатые детали или гайки полые с пластиной

На практике чаще всего встречаются соединения типа «стержень – диск». Для получения соединений «стержень – диск» необходимо использование импульсных процессов, сочетающих силовое и тепловое воздействия на соединяемые поверхности. Именно таким способом является высоковольтная импульсная сварка (ВИС) [1]. Для получения таких сварных соединений целесообразно использовать колебательный затухающий разряд. Он легко реализуется при разряде батарей конденсаторов на индуктивную нагрузку [2].

В статье представлены исследования процесса ВИС без формирования выступа с исходным зазором. При сварке цветных металлов сварное соединение должно быть получено в твердой фазе [3; 4].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения импульсной механической нагрузки в цепь генератора импульсных токов со свариваемыми деталями был последовательно включен магнитно-импульсный привод (МИП) [5–7].

Магнитно-импульсный привод состоит из плоского индуктора, поверх которого размещен толкатель. В процессе разряда батарей конденсаторов (рисунок 2) наводятся вихревые токи в толкателе. Взаимодействие вихревых токов в толкателе с магнитным полем индуктора приводит к возникновению магнитного давления тем самым механического воздействия на стержневой элемент [8].

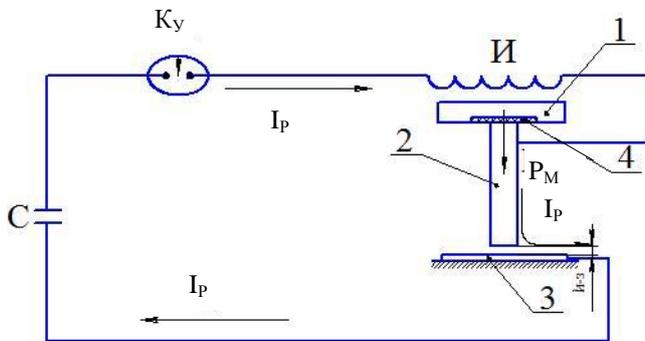


Рис. 2. Разрядный контур устройства ВИС с МИП:
 1 – толкатель; 2 – стержневой элемент;
 3 – пластина; 4 – диэлектрическая вставка;
 I_p – разрядный ток; P_m – магнитное давление;
 K_y – коммутирующее устройство;
 C – емкостный накопитель энергии

В процессе сварки выявлены энергетические и геометрические параметры [9], влияющие на качество получаемых сварных соединений: рабочее напряжение, $U=1\div 10000$ В; емкость накопительного блока, $C=12\div 2400$ Ф; число витков индуктора МИП, $N=3\div 10$ вт; диаметр стержня, $D_{cm}=4\div 25$ мм; частота разряда, $f=1000\div 20000$ Гц; масса толкателя, $M=0,5\div 2,0$ кг; диаметр индуктора, $D_u=50\div 250$ мм; скорость перемещения толкателя, $V_n=20\div 100$ м/с [10].

Параметры режимов ВИС с МИП были следующие: емкость накопительного блока $C=2400$ мкФ; число витков индуктора $N=7$ вт; толщина пластин $\delta_{п}=0,8$ мм; сплав ЛБ3; диаметр стержневого элемента $D_{cm}=10$ мм; масса толкателя $M=0,5$ кг; исходный зазор $\Delta=0,2\div 2$ мм [4].

Зависимости прочности сварного соединения от исходного зазора [4] при постоянной вводимой энергии $W=8100$ Дж и числе витков индуктора МИП $N=7$ вт для различных материалов приведены на рисунке 3.

Полученные сварные соединения были исследованы микроструктурным оптическим и электроннолучевым методами [11; 12].

Микроструктурные исследования образцов, полученных на рациональных режимах сварки, показали, что граница на участках соединения характерна для высокоскоростной сварки металлов в твердой фазе [13–15], имеется четкая линия раздела – зона «схватывания» (рисунок 4).

Микротвердость в зоне сварки повышена, что типично для классической магнитно-импульсной сварки и сварки взрывом [16; 17].

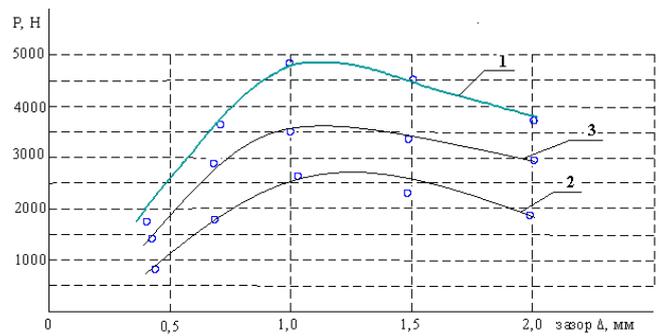


Рис. 3. Зависимость прочности сварного соединения от исходного зазора:

1 – сплав ЛБ3; 2 – сплав АМг6; 3 – сплав М1; $D_{cm}=10$ мм

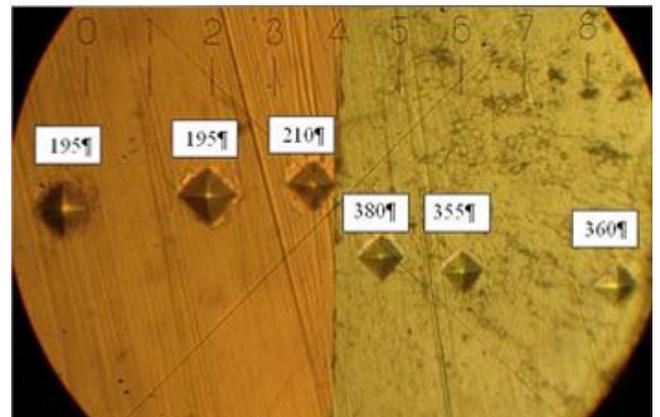


Рис. 4. Микроструктура зоны сварного соединения медного сплава М1 со сплавом ЛБ3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе проведенных экспериментальных исследований процесса высоковольтной импульсной сварки, теоретического анализа аналогичных разрядно-импульсных процессов, таких как ударная конденсаторная сварка, сварка взрывом, магнитно-импульсная сварка, выдвинута гипотеза о формировании соединения в процессе ВИС с МИП [18; 19]. Гипотеза позволила вскрыть механизм образования сварного соединения, который условно можно разбить на три стадии (рисунки 5, 6 и 7).

При сварке с исходным зазором (рисунок 5) за счет автоэлектронной эмиссии осуществляется пробой исходного зазора – цепь замыкается, возбуждается импульсная дуга [20].

Горение импульсной дуги на второй стадии (рисунок 6 а, б) обеспечивает оплавление стыкуемых поверхностей и электроэрозионную очистку – выплеск жидкого металла с загрязнениями за счет давления паров металла $P_{п.м}$ [20].

Протекание синусоидального тока обуславливает возникновение эффекта «магнитного дутья» [4], то есть отклонение импульсной дуги (рисунок 6 в, г) в различные периоды разряда тока, что позволяет увеличить площадь разогрева.

На третьей стадии [20] под действием магнитного давления происходит сближение очищенных поверхностей,

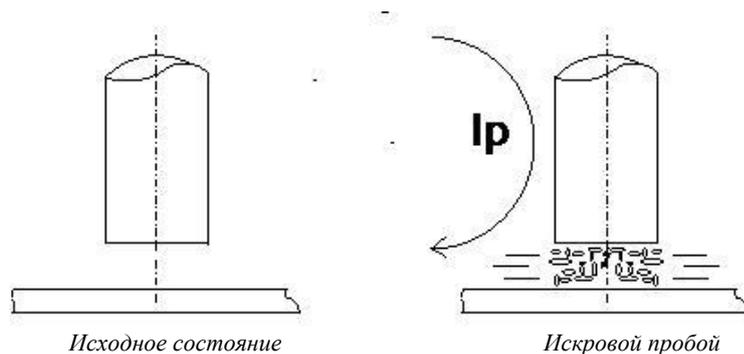


Рис. 5. Первая стадия процесса высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом

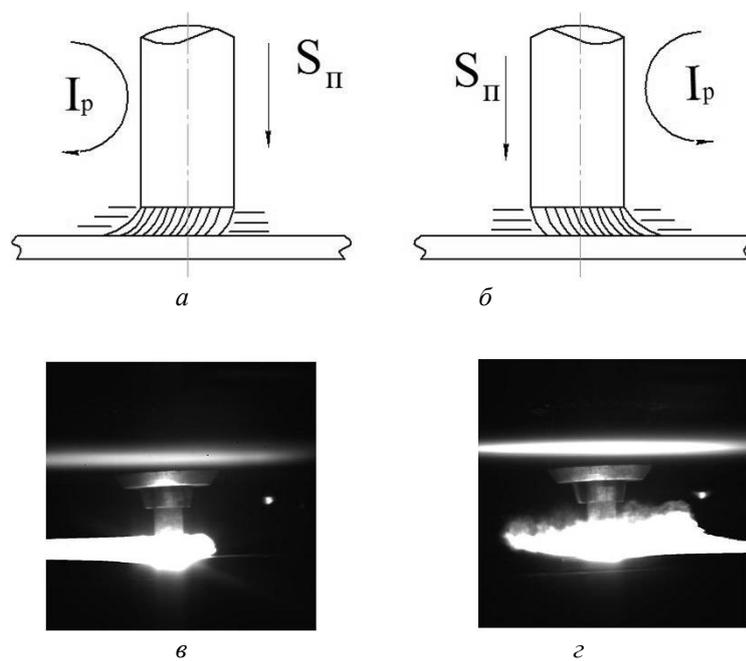


Рис. 6. Вторая стадия высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом

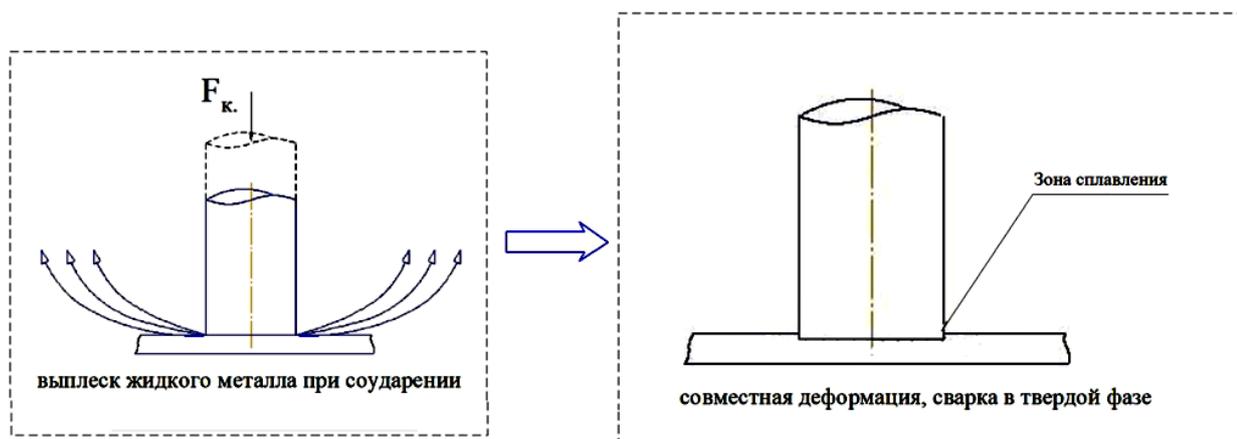


Рис. 7. Третья стадия процесса высоковольтной импульсной сварки с магнитно-импульсным приводом

выплеск жидкого металла при соударении, совместная деформация, образование сварного соединения в твердой фазе (рисунок 7).

ВЫВОДЫ

В результате проведенных экспериментальных исследований [4] получения сварных соединений стержневых деталей с листовыми из цветных металлов и их сплавов в однородном и разнородном сочетаниях можно сделать вывод, что технологию сварки с исходным зазором целесообразно использовать для сварки разнородных цветных сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strizhakov E.L., Neskromnyi S.V., Merkulov R.V. Percussion capacitor discharge welding with a magnetic-pulsed drive // *Welding International*. 2010. Vol. 24. № 9. P. 718–720.
2. Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л. Специальные методы магнитно-импульсной сварки. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.
3. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением. М.: Ай Пи Эр Медиа, 2009. 632 с.
4. Стрижаков Е.Л., Меркулов Р.В., Нескоромный С.В. Электроразрядные методы обработки. Невинномысск: Невинномысский гос. гуманитарно-техн. ин-т, 2014. 148 с.
5. Стрижаков Е.Л., Хахин Н.А., Бацемакин М.Ю., Хохлов Д.С. Установка для магнитно-импульсной обработки металлов : патент РФ № 2003108069/20; заявл. 27.03.03; опубл. 27.09.2003.
6. Стрижаков Е.Л., Евченко В.М., Плотников В.В. Исследование работы генератора импульсных токов для магнитно-импульсной сварки. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2001. 8 с.
7. Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л., Меркулов Р.В. Устройство для ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом : патент РФ № 96515; опубл. 10.08.2010.
8. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. Харьков: Вища школа, 1979. 198 с.
9. Ленивкин В.А., Стрижаков Е.Л. Электротехнологические процессы и оборудование. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2007. 283 с.
10. Меркулов Р.В., Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В. Высоковольтная импульсная конденсаторная сварка разнородных деталей // *Сварка и диагностика*. 2012. № 4. С. 43–46.
11. Меркулов Р.В. Высоковольтная конденсаторная сварка разнотолщинных деталей // *Современная техника и технология: исследования, разработка и их использование в комплексной подготовке специалистов : материалы III междунар. научно-практ. конф.* Невинномысск: НГГТИ, 2014. С. 326–330.
12. Нескоромный С.В., Меркулов Р.В., Сальник А.В. Исследования процесса ударной конденсаторной сварки с магнитно-импульсным приводом // *Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования : труды междунар. научно-техн. конф.* Самара: СГАУ, 2009. С. 158–162.
13. Дудин А.М. Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Энергия, 1979. 128 с.
14. Калеко Д.М., Моравский В.Э., Чертко Н.А. Ударная конденсаторная сварка. Киев: Наукова думка, 1984. 307 с.
15. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твердой фазе. М.: Металлургия, 1976. 264 с.
16. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005. 495 с.
17. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
18. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Нескоромный С.В. Гипотеза образования соединений и методы выбора и расчета параметров режимов и оборудования магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2005. Спец. вып. С. 72–74.
19. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Хохлов Д.С. Классификация приемов и исследование контактной магнитно-импульсной сварки // *Сварочное производство*. 2003. № 8. С. 11–14.
20. Стрижаков Е.Л., Яценко О.В., Плотников В.В., Юсупова Р.К. Основные стадии образования соединения в процессе сварки импульсными индуцированными токами с использованием магнитного давления // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2001. № 2. С. 21–22.

REFERENCES

1. Strizhakov E.L., Neskromnyi S.V., Merkulov R.V. Percussion capacitor discharge welding with a magnetic-pulsed drive. *Welding International*, 2010, vol. 24, no. 9, p. 718–720.
2. Neskromny S.V., Strizhakov E.L. *Spetsialnie metodi magnitno-impulsnoy svarki* [Special methods of magnetic pulse welding]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012, 152 p.
3. Konyushkov G.V., Musin R.A. *Spetsialnie metodi svarki davleniem* [Special methods of pressure welding]. Moscow, IPR Media publ., 2009, 632 p.
4. Strizhakov E.L., Merkulov R.V., Neskromny S.V. *Elektrozryadnie metodi obrabotki* [Electrodischarge methods of treatment]. Nevinnomissk, Nevinnomisskiy gosudarstvenniy gumanitarno-tekhicheskiy institut publ., 2014, 148 p.
5. Strizhakov E.L., Khakhin N.A., Batsmakin M.Yu., Khokhlov D.S. *Ustanovka dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Machine for magnetic pulse treatment of metals]. Patent RF no. 2003108069, 2003.
6. Strizhakov E.L., Evchenko V.M., Plotnikov V.V. *Issledovanie raboti generatora impulsnikh tokov dlya magnitno-impulsnoy svarki* [Study of operation of pulse current generator for magnetic pulse welding]. Rostov-na-Donu, DGTU publ., 2001, 8 p.
7. Neskromny S.V., Strizhakov E.L., Merkulov R.V. *Ustroystvo dlya udarnoy kondensatornoy svarki s magnitno-impulsnim privodom* [Device for electrostatic percussion welding with magnetic pulse drive]. Patent RF no. 96515, 2010.
8. Mikhaylov V.M. *Impulsnie elektromagnitnie polya* [Pulsed electromagnetic fields]. Kharkov, Vishcha shkola publ., 1979, 198 p.
9. Lenivkin V.A., Strizhakov E.L. *Elektrotekhnologicheskie protsessy i oborudovanie* [Electrotechnology processes and equipment]. Rostov-na-Donu, DGTU publ., 2007, 283 p.

10. Merkulov R.V., Strizhakov E.L., Neskromniy S.V. High-voltage pulse electrostatic welding of different-type parts. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 4, pp. 43–46.
11. Merkulov R.V. High-voltage pulse electrostatic welding of parts of different thicknesses. *Materiali mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya: issledovaniya, razrabotka i ikh ispolzovanie v kompleksnoy podgotovke spetsialistov"*. Nevinnomyssk, 2014, pp. 326–330.
12. Neskromniy S.V., Merkulov R.V., Salnik A.V. Study of the process of electrostatic percussion welding with magnetic pulse drive. *Trudi mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Metallofizika, mekhanika materialov, nonostruktur i protsessov deformirovaniya"*. Samara, SGAU publ., 2009, pp. 158–162.
13. Dudin A.M. *Magnitno-impulsnaya svarka metallov* [Magnetic pulse welding of metals]. Moscow, Energiya publ., 1979, 128 p.
14. Kaleko D.M., Moravsky V.E., Chvertko N.A. *Udarnaya kondensatornaya svarka* [Shock capacitor welding]. Kiev, Naukova dumka publ., 1984, 307 p.
15. Karakozov E.S. *Soedinenie metallov v tverdoy faze* [Solid phase metal joining]. Moscow, Metallurgiya publ., 1976, 264 p.
16. Lysak V.I., Kuzmin S.V. *Svarka vzrivom* [Explosion Welding]. Moscow, Mashinostroenie-1 publ., 2005, 495 p.
17. Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Pressure welding of metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986, 280 p.
18. Strizhakov E.L., Batsemakin M.Yu., Neskromniy S.V. Hypothesis of joints formation and the methods of selection and calculation of modes parameters and equipment for magnetic pulse welding of lap joints. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazsky region*, 2005, no. 5, pp. 72–74.
19. Strizhakov E.L. et al. Classification of methods and study of contact magnetic pulse welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 8, pp. 11–14.
20. Strizhakov E.L. et al. Key steps of joint formation in the process of pulse induced current welding using magnetic pressure. *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazsky region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2001, no. 2, pp. 21–22.

THE ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE PULSE WELDING WITH THE MAGNETIC PULSE DRIVE

© 2015

R.V. Merkulov, senior lecturer

Nevinnomyssk State Institute of Humanities and Engineering, Nevinnomyssk (Russia)

Keywords: high-voltage pulse welding; magnetic pulse drive; nonferrous metals; solid phase welding.

Abstract: The goal of this work is to analyze the process of pulse high-voltage compensator discharge welding using the magnetic pulse drive to obtain the joints of heterogenic parts of different thickness.

The analysis of high-voltage pulse welding was carried out on the basis of electrostatics, the theory of electric erosion machining, and the dislocation theory of solid phase joints formation. The quality of welded joints was evaluated according to the results of mechanical performance tests, thermal cycling tests, metallographic examination of optical and electron-beam microscopy.

Experimental research data processing, the analysis of expression of magnetic pressure in terms of equipment parameters specified the necessity of research of characteristics of versatile surge-current generator. The author determined the natural and operating frequency of discharge circuit when connecting a certain number of sections with different types of standard pulse condensers using low-inductance tubes. Records of measurements of natural and operating circuit parameters when connecting accumulator and induction dynamic drive sections were carried out using modern digital equipment.

In the result of analysis of high-voltage pulse welding with magnetic pulse drive it was established that when using magnetic pulse drive with origin gap, it is possible to control energy input into welding area at the account of variation of push bar mass and the gap width. The more are the origin gap and the moving elements mass, the more is the thermal action quantity. When welding the large-sized core parts ($d=15-20$ mm), it is necessary to use high-frequency current pulse generators (with natural frequency of more than 50 kHz) ensuring arc discharge polarity inversion and, as a consequence, the extension of area of flat part heating at the account of the "magnetic blow" effect.

**ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**
© 2015

С.Г. Митин, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов»
П.Ю. Бочкарев, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов»
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов (Россия)

Ключевые слова: технологическая подготовка производства; автоматизация проектирования; САПР ТП; технологическая операция; многономенклатурное производство.

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы повышения эффективности многономенклатурных механообработывающих производственных систем путем комплексной автоматизации технологической подготовки. В результате анализа возможностей современных программных средств автоматизации проектирования выявляются их недостатки и формулируются принципы создания интегрированной системы конструкторского и технологического проектирования, обеспечивающие эффективное взаимодействие на различных стадиях проектирования. В качестве основы для принятия рациональных решений обозначается система автоматизированного проектирования технологических операций, занимающая центральное место в интегрированной системе планирования технологических процессов. В ходе разработки системы автоматизированного проектирования технологических операций формируются подходы к формализации проектных процедур на основе использования математического моделирования. Важной особенностью предлагаемых моделей и методик является учет всей запланированной номенклатуры обрабатываемых деталей и ориентация на текущее состояние производственной системы. Для процедуры генерации комплектов технологической оснастки описывается модель с применением сетей Петри, которая позволяет сформировать множество возможных вариантов режущего и вспомогательного инструмента для всей запланированной номенклатуры обрабатываемых деталей. Отсев нерациональных вариантов предлагается осуществлять по критерию однородности, который обеспечивает инвариантность структур операций. Для моделирования процедуры генерации возможных последовательностей технологических переходов используется теория графов. Моделирование процедур выбора рациональных комплектов оснастки и структур операций осуществляется совместно. Для этого предлагается использование аппарата динамического программирования, в результате чего оптимизируется система в целом и отсутствует необходимость перебора всех возможных вариантов. Критериями оптимизации являются суммарное время обработки всех запланированных деталей и количество смен инструмента. В заключении статьи определяются пути дальнейшего развития и применения разрабатываемой системы.

В условиях рыночной экономики для повышения эффективности предприятий машиностроения на первый план выходит задача увеличения производительности и сокращения длительности производственного цикла, большую часть которого в многономенклатурном производстве составляют затраты времени на конструкторско-технологическую подготовку [1]. Развитие новых направлений технологии машиностроения, которые позволят выйти на создание конкурентоспособной промышленности является актуальной задачей [2]. Повышение конкурентоспособности машиностроительного производства связано не только с разработкой прогрессивных технологических процессов (ТП) и методов механической обработки, но и с созданием эффективной системы технологической подготовки производства (ТПП), которая способствует использованию новых технологий и обеспечивает автоматизированное проектирование технологических процессов механической обработки с целью сокращения затрат времени и рационализации проектных решений.

Анализ мировых тенденций в области автоматизации планирования технологических процессов [3; 4] и возможностей современных программных продуктов автоматизации ТПП показал, что за последние десятилетия удалось существенно ускорить разработку ТП на основе новых подходов к формализации проектирования [5–13] и упростить разработку технологической документации за счет введения электронного докумен-

тооборота и обеспечения взаимодействия между конструкторской и технологической системами автоматизированного проектирования.

Однако на данный момент автоматизированы этапы, которые легко поддаются формализации, например, расчет режимов обработки, трудовое и материальное нормирование, заполнение технологической документации. Вместе с тем остаются нерешенными задачи автоматизации творческого характера, например, формирование маршрута обработки деталей, выбор оборудования и технологической оснастки, разработка структуры технологической операции.

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) предоставляют лишь удобную среду для работы с базой данных аналогов ТП и справочной информацией об оборудовании и технологической оснастке, а проектирование ТП выполняет технолог, который принимает решения, основываясь на субъективном опыте. Кроме того, существующие САПР не имеют возможности учитывать особенности каждого конкретного предприятия и не позволяют оперативно реагировать на изменение условий производства.

Выход из этой ситуации видится в создании системы сквозного автоматизированного проектирования, которая на любом из этапов подготовки производства может ориентироваться на возможности конкретной производственной системы и позволяет принимать рациональные решения задач проектирования в короткие

сроки [14]. На данный момент эта задача является актуальной и нерешенной в полной мере. Одним из путей ее решения является создание интегрированной системы автоматизированного планирования технологических процессов (ИСАППП).

На этапе разработки конструкции изделий ИСАППП путем анализа технологических возможностей конкретной производственной системы обеспечивает конструктору информационную поддержку при назначении требований точности и качества поверхностей деталей, способствующих рациональному использованию технологических возможностей [15].

При формировании комплекта обрабатываемых деталей ИСАППП оценивает производственную технологичность всего комплекта и дает рекомендации по изменению конструкции деталей или состава комплекта деталей, запланированного к обработке в рассматриваемой производственной системе, с целью повышения эффективности работы производственной системы [16].

Разработка ТП состоит из этапов, каждый из которых формализован: формирование оптимальных планов обработки деталей [17]; формирование комплекта технологических баз и кортежей технологических переходов [18]; разработка технологических операций механической обработки, где предлагаются многовариантные решения задач проектирования и существует возможность выбора рациональных вариантов структур операций, оборудования, технологической оснастки, режимов обработки в зависимости от складывающейся производственной ситуации [19].

В структуре ИСАППП центральное место занимает система проектирования технологических операций механообработки (рис. 1). Это связано с тем, что для обеспечения взаимодействий на указанных выше уровнях необходимо быстро оценить, как те или иные решения повлияют на технологию изготовления, а следовательно, для различных исходных параметров необходимо разработать варианты технологических операций и выбрать из них наиболее эффективный для реализации.

В рамках создания системы автоматизированного проектирования технологических операций нами проведены работы по формированию состава и формализации проектных процедур проектирования технологических операций, выполняемых на различных группах оборудования [20]. Наиболее важные проектные процедуры и модели для их формализации представлены на рис. 2.

Модель процедуры формирования комплектов технологической оснастки построена с применением аппарата сетей Петри. Множества мест отражают различные варианты сочетаний типоразмеров оснастки. События определяют наличие или отсутствие возможности обработки с помощью того или иного варианта оснастки на каждом технологическом переходе. Спроектированная сеть Петри состоит из нескольких уровней, на каждом из которых проверяется соответствие различных параметров, в результате чего генерируются возможные варианты технологической оснастки. Из сформированного множества производится отсев нерациональных



Рис. 1. Подсистема проектирования технологических операций в составе ИСАППП:

1 – разработка принципиальных схем обработки элементарных поверхностей деталей, 2 – формирование кортежей технологических переходов, 3 – выбор технологического оборудования

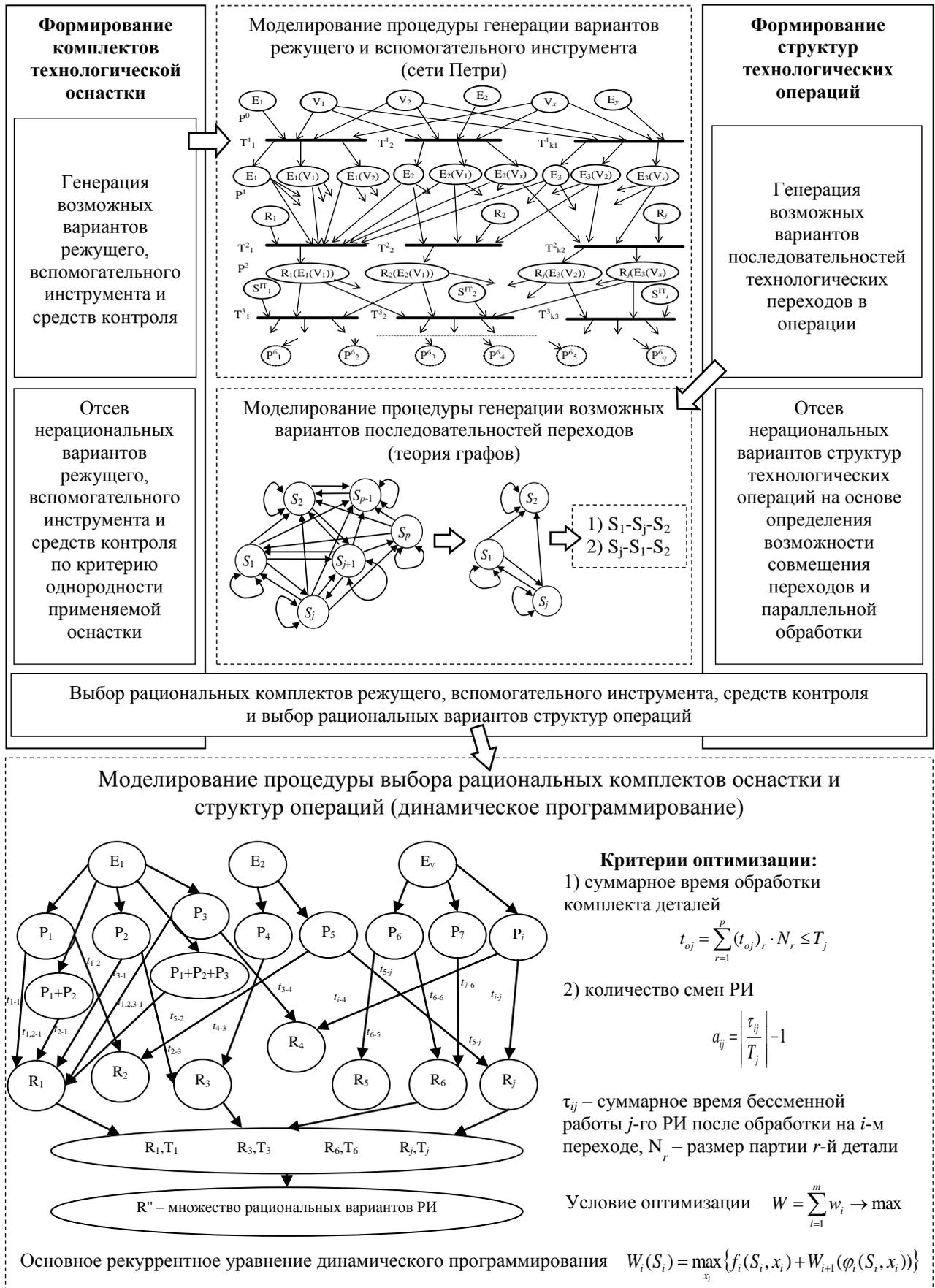


Рис. 2. Основные проектные процедуры проектирования технологических операций и модели для их формализации

вариантов по критерию однородности, который обеспечивает инвариантность структур операций и высокий уровень взаимозаменяемости вариантов технологических операций.

На этапе разработки рациональной структуры операции ключевой задачей является выбор рациональной последовательности технологических переходов в каждом кортеже. Модель строится с применением теории графов. Вершинам графа присваивается код элементарной обрабатываемой поверхности. Каждая дуга графа отражает возможную последовательность обработки. В результате задача генерации возможных последовательностей обработки сводится к задаче нахождения возможных путей между вершинами графа, соответствующими переходам в кортеже. После этого производится отсев нерациональных вариантов последовательностей обработки по критерию минимизации штучно-калькуляционного времени за счет нахождения возможности совмещения переходов и параллельной обработки.

Задача выбора рациональных комплектов режущего и вспомогательного инструмента и структур операций для всей номенклатуры обрабатываемых деталей решается с использованием аппарата динамического программирования, преимущество которого заключается в оптимизации системы в целом и отсутствии необходимости расчета параметров оптимизации для каждого сочетания вариантов.

Опыт создания моделей и методик автоматизации проектных процедур показал как их схожесть, так и значительное различие некоторых из них в зависимости от вида технологического оборудования и методов механической обработки. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку системы для формирования состава и распределения проектных процедур в зависимости от поступающего задания на проектирование. Решение этой задачи видится в применении математического аппарата кластерного анализа, который позволит провести классификацию проектных процедур и сформировать модель для автоматизации выбора необходимых из них для обеспечения проектирования технологических операций.

Таким образом, для решения задачи повышения эффективности машиностроительного производства существует необходимость комплексной автоматизации конструкторского и технологического проектирования. Это становится возможным на основе создания интегрированной системы автоматизированного планирования технологических процессов, обеспечивающей взаимодействие между системами конструкторской и технологической подготовки производства и конкретной производственной системой. Ключевым вопросом в обеспечении взаимодействия является разработка системы автоматизированного проектирования технологических операций механообработки, способной в кратчайшие сроки сгенерировать различные варианты и выбрать рациональные решения для складывающейся производственной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безъязычный В.Ф., Рябов А.Н. Исследование путей повышения производительности при различных типах производства // Вестник Рыбинской государствен-

венной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2012. № 2. С. 148–152.

2. Суслов А.Г. Направления дальнейшего развития технологии машиностроения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2010. № 1. С. 3–6.
3. Marri H.B., Gunasekaran A., Grieve R.J. Computer-Aided Process Planning: A State of Art // International journal of advanced manufacturing technology. 1998. № 14. P. 261–268.
4. Yusof Y., Latif K. Survey on computer-aided process planning // International journal of advanced manufacturing technology. 2014. № 75. P. 77–89.
5. Shaw C. Feng. A machining process planning activity model for systems integration // Journal of intelligent manufacturing. 2003. № 14. P. 527–539.
6. Deja M., Siemiatkowski M.S. Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture // Journal of intelligent manufacturing. 2003. № 24. P. 831–846.
7. Базров Б.М. Модульная технология // Научные исследования в машиностроении. 2011. № 4. С. 3–10.
8. Базров Б.М. Типовая технология в современных условиях // Научные исследования в машиностроении. 2014. № 4. С. 44–48.
9. Аверченков А.В., Аверченкова Е.Э. Автоматизированная подготовка производства инновационных изделий в условиях малых машиностроительных предприятий // Вестник Брянского государственного технического университета. 2010. № 3. С. 49–57.
10. Аверченков В.И., Жога В.Л. Автоматизация процедуры конструкторско-технологической классификации деталей с использованием самоорганизующейся нейронной сети // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 94–97.
11. Аверченков В.И., Подвесовский А.Т., Брундасов С.М. Автоматизация многокритериального выбора программно-технических решений на основе семантического расширения иерархических и сетевых моделей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 5. С. 105–111.
12. Аверченков В.И. Формализация методов технологического проектирования, обеспечивающих требуемое качество изделий // Научные исследования в машиностроении. 2012. № 9. С. 32–38.
13. Чигиринский Ю.Л. Возможность формализованного решения задач технологического проектирования // СТИН. 2009. № 12. С. 26–29.
14. Бочкарев П.Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки // Технология машиностроения. 2002. № 1. С. 10–14.
15. Митин С.Г., Бочкарев П.Ю. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем // Научные исследования в машиностроении. 2014. № 11. С. 44–47.
16. Бочкарев П.Ю., Митин С.Г., Бокова Л.Г. Разработка дополнительных показателей оценки производственной технологичности для учета особенностей многономенклатурных механообрабатывающих систем // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2014. № 4. С. 16–20.

17. Пластинкин А.В. Выбор оптимальных планов обработки поверхностей деталей в системе планирования многономенклатурных технологических процессов // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 81–85.
 18. Кочадаев А.В. Алгоритм поиска технологических баз в системе планирования технологических процессов // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 76–81.
 19. Шалунов В.В., Комаревцев Д.В., Семенихин И.М. Автоматизированное проектирование технологических операций, выполняемых на токарно-фрезерных автоматах продольного точения с ЧПУ // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 3. № 2. С. 146–150.
 20. Митин С. Г., Бочкарев П. Ю. Формирование методического обеспечения автоматизированной подсистемы проектирования операций фрезерной обработки // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 1. С. 32–39.
- REFERENCES**
1. Bez'yazichny V.F., Ryabov A.N. Study of ways of efficiency improvement in various types of production. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solovyeva*, 2012, no. 2, pp. 148–152.
 2. Suslov A.G. Trends of perfection development manufacturing engineering. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2010, no. 1, pp. 3–6.
 3. Marri H.B., Gunasekaran A., Grieve R.J. Computer-Aided Process Planning: A State of Art. *International journal of advanced manufacturing technology*, 1998, no. 14, pp. 261–268.
 4. Yusof Y., Latif K. Survey on computer-aided process planning. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2014, no. 75, pp. 77–89.
 5. Shaw C. Feng. A machining process planning activity model for systems integration. *Journal of intelligent manufacturing*, 2003, no. 14, pp. 527–539.
 6. Deja M., Siemiatkowski M.S. Feature-based generation of machining process plans for optimised parts manufacture. *Journal of intelligent manufacturing*, 2003, no. 24, pp. 831–846.
 7. Bazrov V.M. Modular technology. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2011, no. 4, pp. 3–10.
 8. Bazrov V.M. Typical technology in modern conditions. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2014, no. 4, pp. 44–48.
 9. Averchenkov A.V., Averchenkova E.E. Automated preparation for manufacturing of innovative products at small-scale machine building enterprises. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 49–57.
 10. Averchenkov V.I., Zhoga V.L. Automation of procedure of engineering and design classification of components with the use of self-organizing neural network. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 4, pp. 94–97.
 11. Averchenkov V.I., Podvesovsky A.T., Brundasov S.M. Automation of multicriterion selection of programme-engineering solution on the basis of conceptual expansion of hierarchical and network models. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 5, pp. 105–111.
 12. Averchenkov V.I. Formalization of technological design methods, providing the required products quality. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2012, no. 9, pp. 32–38.
 13. Chigirinsky Yu.L. Opportunity for formalized solution of production engineering issues. *STIN*, 2009, no. 12, pp. 26–29.
 14. Bochkarev P.Yu. System representation of planning technological machining process. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2002, no. 1, pp. 10–14.
 15. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Automation of design decision support in accordance with technological capabilities of multiproduct manufacturing systems. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2014, no. 11, pp. 44–47.
 16. Bochkarev P.Yu., Mitin S.G., Bokova L.G. Development of additional indices for assessment of technological effectiveness for recording peculiarities of multiproduct machining process systems. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Solovyeva*, 2014, no. 4, pp. 16–20.
 17. Plastinkin A.V. Selection of optimal plans for processing the surface of components in the planning system of multiproduct technological processes. *Progressivnie nauchnie napravleniya razvitiya tekhnologii mashinostroeniya*. Saratov, SGTU publ., 2005, pp. 81–85.
 18. Kochadaev A.V. Algorithm for search of technological bases in the system of planning technological processes. *Progressivnie nauchnie napravleniya razvitiya tekhnologii mashinostroeniya*. Saratov, SGTU publ., 2005, pp. 76–81.
 19. Shalunov V.V., Komarevtsev D.V., Semeniخين I.M. Automated design of production operations at CNC-milling machines CNC longitudinal turning. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 146–150.
 20. Mitin S.G., Bochkarev P.Yu. Formation of methodical support of automated subsystem of milling operations design. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2012, no. 1, pp. 32–39.

**PRINCIPLES OF CREATING THE SYSTEM OF COMPUTER-AIDED
DESIGN OF PRODUCTION OPERATIONS IN MULTIPRODUCT MANUFACTURING**

© 2015

S.G. Mitin, candidate of technical sciences, Associate Professor,
assistant professor of the Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Technologies
P.Y. Bochkaryov, Doctor of Engineering, Professor,
Head of the Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Technologies
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov (Russia)

Keywords: production preparation; design automation; CAPP system, production operation, multiproduct manufacturing.

Abstract: The article considers issues of increasing efficiency in multiproduct machining manufacturing systems by complex automation of production preparation stage. After analysis of modern software possibilities for design automation their shortcomings come to light and the principles are formulated for creation of integrated design and process planning system that ensures effective interaction at various design stages. As a basis for making rational decisions, the automated design system for production operation takes the central place in the integrated technological process planning system. In the course of development of the automated design system for production operations the approaches are found to formalization of design procedures by means of mathematical modeling. An important feature of the proposed models and techniques is the accounting of all planned nomenclature of the processed components as well as orientation to the current state of a production system. For the procedure of equipment generation the model is described with application of Petri nets that allows creating a set of feasible options of cutting and auxiliary tools for all planned nomenclature of the processed components. Elimination of irrational options can be carried out by using criterion of uniformity which ensures invariance of operation structures. For modeling the procedure of generating possible process steps sequences, the graph theory is used. Modeling of procedures for selection of rational equipment sets and operation structures is carried out simultaneously. To do this, the authors suggest using dynamic programming, therefore the system is optimized in general and there is no need for examining of all possible options. Criteria of optimization are the total processing time of all planned components and number of tool changes. In the conclusion of the article the ways of further development and application of the developed system are defined.

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ШТАМПОСВАРНЫХ ОБЛЕГЧЕННЫХ КОРПУСОВ
ЗАДЕЛКИ ЭЛЕКТРОКАБЕЛЯ**

© 2015

С.В. Нескоромный, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»
Е.Л. Стрижаков, доктор технических наук,
профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства»
Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону (Россия)

Ключевые слова: магнитно-импульсная сварка – формовка; эластомагнитно-импульсная штамповка; пресс двойного действия; магнитное давление; индукционно-динамический привод; сварка в твердой фазе.

Аннотация: Применение технологии изготовления облегченных экранирующих корпусов соединителей бортовой техники методом точения сопровождается низким коэффициентом использования материала, большими затратами труда, повышенной массой изделий.

Для снижения веса штепсельных разъемов предлагается изготавливать корпусную часть электросоединителя из тонколистового материала, обеспечивающего экранирование от радиопомех. Наилучшим показателем по малому удельному весу и экранированию является алюминиевая фольга толщиной $(0,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$ м.

Предлагаемая технология изготовления облегченных экранирующих корпусов включает следующие переходы: эластомагнитно-импульсную штамповку (ЭМИШ) заготовки, магнитно-импульсную сварку-формовку (МИСФ) и чеканку резьбы.

В реализуемой схеме МИСФ магнитное давление, действующее на стенки заготовки, является формообразующим в соответствии с конфигурацией матрицы, а в зоне перехлеста – сварочным.

Основными параметрами режимов МИСФ для различных типоразмеров корпусов из алюминиевой фольги являются запасаемая энергия в батареях конденсаторов, рабочая частота разряда тока и напряжение заряда емкостных накопителей.

В рамках соглашения с Министерством образования и науки Российской Федерации, по соглашению № 14.574.21.0049 от 19.06.2014 г., уникальный идентификатор RFMEFI57414X0049, разработано быстропереналаживаемое универсальное оборудование – пресс двойного действия, сочетающий в себе статическую и импульсную нагрузку в едином устройстве и позволяющий осуществить все этапы технологического процесса изготовления корпусов соединителей на одном устройстве.

Пресс двойного действия состоит из технологического блока для осуществления статического нагружения и генератора импульсных токов с индукционно-динамическим приводом для реализации импульсного нагружения.

Для отработки технологии разработан измерительный стенд разрядных процессов, включающий в себя устройство для регистрации тока разрядного контура и его частоты, магнитного давления и физических параметров прессы двойного действия: активного и индуктивного сопротивления разрядного контура, емкости накопительного блока.

Используемый измерительный стенд позволит провести анализ зоны сварных соединений.

ВВЕДЕНИЕ

Для развития современных систем управления в авиационной и космической промышленности требуется создание и внедрение бортовых кабельных систем БКС нового поколения. В частности, изготовление экранирующих корпусов соединителей бортовой техники методом точения приводит к низкому коэффициенту использования материала КИМ, большим затратам труда, повышенной массе изделий [1]. Авторами работы [2] показано, что для снижения веса штепсельных разъемов предлагается изготавливать корпусную часть электросоединителя из тонколистового материала, обеспечивающего экранирование от радиопомех.

Анализ литературных источников [3–10] показал, что наилучшим показателем по экранированию и дешевизне материала является алюминий, обладающий малым удельным весом и высокими пластическими свойствами. Выявлено, что наиболее удачным способом получения штампованных изделий является использование магнитно-импульсной сварки-формовки (МИСФ) [11], сочетающей тепловое и силовое воздействие на обрабатываемый материал.

Реализуемая принципиальная схема МИСФ для получения БКС приведена на рис. 1 [8; 9].

Предварительно выкроенная тонколистовая заготовка 1 методом эластомагнитно-импульсной штамповки (ЭМИШ) сворачивается с перехлестом Δ и устанавливается в матрицу 2, внутренняя форма которой аналогична форме изделия. В зоне обработки расположен рабочий инструмент-индуктор 3.

В зоне перехлеста имеется переменный исходный зазор h , зависящий от первоначальной сборки заготовки в матрице. В зоне обработки расположен рабочий инструмент-индуктор 3.

При разряде генератора импульсных токов (ГИТ) в индукторе 3 создается электромагнитное поле, под действием которого в свернутой с перехлестом Δ заготовке 1 наводится ЭДС самоиндукции, возникает электрический пробой переменного исходного зазора h , в результате чего электрическая цепь замыкается. По заготовке 1 протекает индуцированный импульс тока $I_{ин}$, в переменном зазоре возникает импульсная дуга, которая разогревает и оплавляет поверхности в зоне перехлеста. Возникающее при взаимодействии индуцированного тока I_p с магнитным полем индуктора 3 усилие P_{ϕ} деформирует заготовку в сторону матрицы 2. При этом выдавливается слой расплавленного металла вместе с адсорбированными и окисными пленками и другими

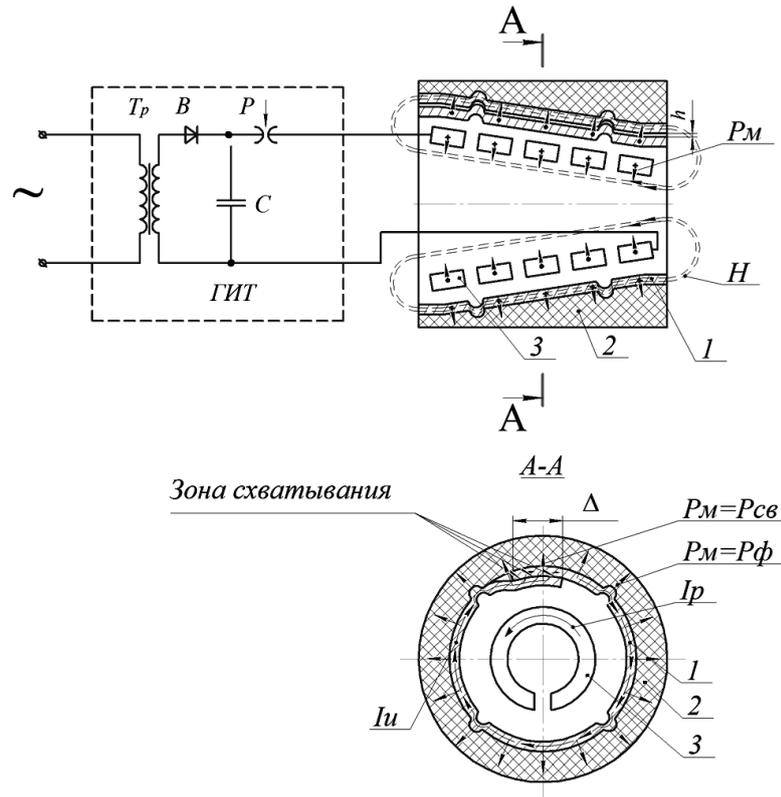


Рис. 1. Принципиальная схема совмещенного процесса МИСФ:

1 – заготовка, 2 – матрица, 3 – индуктор, h – исходный зазор, Δ – перехлест, ГИТ – генератор импульсных токов, T_p – трансформатор, B – выпрямитель, C – конденсаторы, P – разрядник, I_p – ток разряда, H – магнитный поток, $I_{и}$ – ток индуцированный, P_m – магнитное давление, P_{ϕ} – давление формовки, $P_{св}$ – сварочное давление

загрязнениями. Разогретые очищенные поверхности сдавливаются, прижимаются к матрице магнитным давлением P_m , происходит контактная электрическая сварка.

Магнитное давление P_m действует на всю поверхность заготовки и осуществляет формовку заготовки в соответствии с конфигурацией матрицы. Таким образом, за один разряд генератора импульсных токов длительностью $10 \div 200$ мкс, определяемый типом и толщиной материала, происходит процесс контактной электрической сварки и формовки замкнутых конструкций сложной формы из листового материала. Деталь изготавливается с одной установки – одним импульсом [11].

Таким образом, использование МИСФ позволит получить штамповарные облегченные экранирующие корпуса соединителей (ОЭКС) из металлической фольги толщиной $(0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-3}$ м взамен точеных корпусов, что является актуальной задачей и требует разработки энергетического оборудования и средств измерений импульсного процесса для отработки технологии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Конструкция предполагаемой заделки соединителя состоит из вилки 1, припаянных проводов 3, закрытых корпусом 2. Для механического усиления предусмотрено наливка компаундом 4 (рис. 2).

Разработанная технология изготовления ОЭКС включает следующие переходы: ЭМИШ заготовки ОЭКС, МИСФ корпуса и магнитно-импульсную опрес-

совку резьбового участка (чеканку) [12; 13]. Проведенный аналитический обзор литературы не выявил специализированного оборудования, сочетающего в себе статическую и импульсную нагрузку в едином устройстве для выполнения ЭМИШ [14].

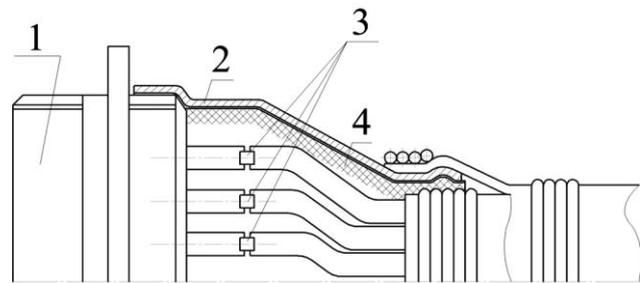


Рис. 2. Предполагаемая конструкция заделки кабеля соединителя

Специально в рамках соглашения № 14.574.21.0049 «Исследование процесса и разработка технологии магнитно-импульсной сварки-формовки облегченных корпусов бортовых кабелей» Министерства образования и науки Российской Федерации было разработано универсальное специальное оборудование – пресс двойного действия, позволяющий осуществить ЭМИШ, МИСФ и чеканку на одном устройстве (рис. 3) [15].

Пресс двойного действия состоит из технологического блока (ТБ) для осуществления статического нагружения 1, индукционно-динамического привода 2 и генератора импульсных токов (ГИТ) 3. Основные характеристики приведены в таблице 1

Асинхронный электродвигатель, расположенный в нижней части ТБ, через червячный редуктор приводит в движение верхнюю подвижную плиту, которая осуществляет статическое прижатие индукционно-динамического привода с оснасткой, расположенного на нижней неподвижной плите. Усилие предварительного прижима осуществляется установкой конечных выключателей – герконов.



Рис. 3. Общий вид прессы двойного действия

Создание импульсной нагрузки осуществляет индукционно-динамический привод (ИДП), который подключается через шины к ГИТ и состоит из диэлектрического бандаж, в который уложена плоская спираль с токоподводящими пластинами. Каждый виток спирали изолирован друг от друга. Поверх спирали через диэлектрическую проставку уложен толкатель. Для концентрации магнитного давления толкатель имеет форму усеченного конуса и изготовлен из дюралюминия со стальной вставкой в центре, воспринимающей импульсную нагрузку [16].

Таблица 1. Основные технические характеристики прессы двойного действия

Наименование, обозначение	Значение
Емкость накопителя C , мкФ	3÷600
Рабочее напряжение U_p , кВ	1÷25
Собственная частота разряда тока f_p , кГц	20÷200
Статическая нагрузка P , кг	6000
Импульсная нагрузка $P_{имп}$, 10^6 кг/м ²	10÷40

В процессе разряда батареи конденсаторов C по виткам индуктора протекает импульс тока, переменный магнитный поток которого обуславливает возникновение индуцированных токов в толкателе. Взаимодействие магнитного поля индуктора с индуцированным то-

ком в толкателе приводит к возникновению импульсного магнитного давления, которое воздействует на толкатель [17].

Эквивалентная схема разрядного контура оборудования приведена на рис. 4. Форма импульсов тока, напряженности магнитного поля и магнитного давления представлена на рис. 5. Для отработки технологии рассмотрим основные параметры разрядного контура оборудования с индуктором [18].

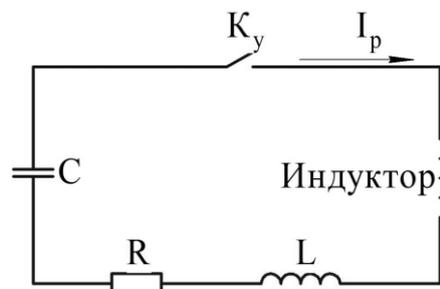


Рис. 4. Эквивалентная схема разрядного контура оборудования с индуктором:

- K_y – коммутационное устройство;
- ЕНЭ – емкостный накопитель энергии;
- I_p – ток разряда;
- R и L – активное и индуктивное сопротивление разрядного контура

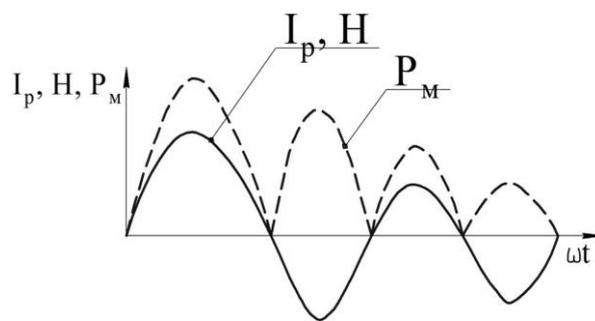


Рис. 5. Характер импульсов тока I_p , напряженности магнитного поля H и магнитного давления P_m

Величина I_p при разряде батарей конденсаторов на разрядный контур имеет вид единичного импульса и описывается зависимостью (рис. 5):

$$I_p = U \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \exp(-0,5r_a \frac{t}{L}) \sin \omega t, \quad (1)$$

где L , r_a – индуктивное и активное сопротивление разрядного контура;
 t – время;
 ω – круговая частота.

Частота разряда тока определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Необходимую для расчета давления напряженность магнитного поля H определяем по формуле:

$$H = \frac{B}{\mu_0}, \quad (3)$$

где B – индукция магнитного поля.

Магнитное давление:

$$P_m = \frac{\mu_0 H^2}{2}, \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Запасаемая энергия в емкостных накопителях энергии (ЕНЭ):

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (5)$$

где C – емкость конденсатора;

U_p – рабочее напряжение.

В аналитическом обзоре литературы не выявлено прототипов разрабатываемого измерительного стенда разрядных процессов для отработки технологии ОЭКС. Имеются лишь данные в литературе [19; 20] о лабораториях, оснащенных регистрирующими устройствами для исследования формовки, разделительных операций, калибровки, сборочных операций.

Для отработки технологии сварки ОЭКС разработан измерительный стенд разрядных процессов, позволяющий произвести измерения разрядного тока установки и напряженности магнитного поля в рабочей зоне индуктора. Эти параметры в конечном счете определяют тепловое и механическое воздействие на свариваемые поверхности.

На рис. 6 приведена структурная схема разработанного измерительного стенда (ИС). Разработанный измерительный стенд представляет собой полностью автономный комплекс измерительных и регистрирующих устройств.

Запоминающий осциллограф ОС с бесконтактным датчиком БД (поясом Роговского) используется для регистрации амплитуды и частоты тока, формулы (1), (2). Для измерения индукции магнитного поля служит тесламетр Т с датчиком поля ДП. Зафиксированное значение магнитной индукции используется для вычисления напряженности магнитного поля по формуле (3). Величина магнитного давления определяется по формуле (4). Величина разряда тока зависит от напряжения, емкости накопительного блока, индуктивности разрядного контура оборудования, формула (5). Индуктивность зависит в основном от числа витков индуктора. Измерение параметров разрядного контура осуществляется с использованием RLC-метра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Качество сварки ОЭКС оценивается визуально, механическими испытаниями, металлографическим анализом.

Исходя из опытных данных, параметры режимов МИСФ различных типоразмеров корпусов из алюминиевой фольги для разъемов типа 2РМ(Д) варьируются в следующих диапазонах: запасаемая энергия $W=100 \div 3000$ Дж; рабочая частота разряда тока $f_p=5 \div 20$ кГц; рабочее напряжение $U_p=1 \div 3$ кВ [21].

Металлографические исследования зоны соединения не выявили образования общих зерен (рис. 7). Микроструктурный анализ показал, что зона соединения алюминиевой фольги характерна для сварки в твердой фазе известными импульсными методами. Твердость на границе раздела поверхностей повышена, что свидетельствует о процессе «схватывания», аналогично сварке взрывом и классической магнитно-импульсной сварке [22].

Разработанная технология проходит апробацию в соответствии с реализацией федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы».

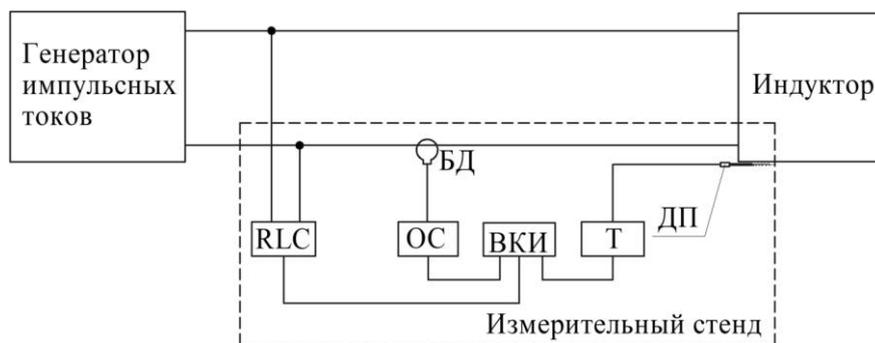


Рис. 6. Структурная схема ИС:

RLC – измеритель портативный АКПП 6104; БД – бесконтактный датчик (пояс Роговского);

ОС – осциллограф цифровой запоминающий АКПП-4126/А1;

Т – портативный универсальный тесламетр ТПУ-02;

ДП – датчик измерения напряженности магнитного поля;

ВКИ – устройство для ввода и корректировки информации

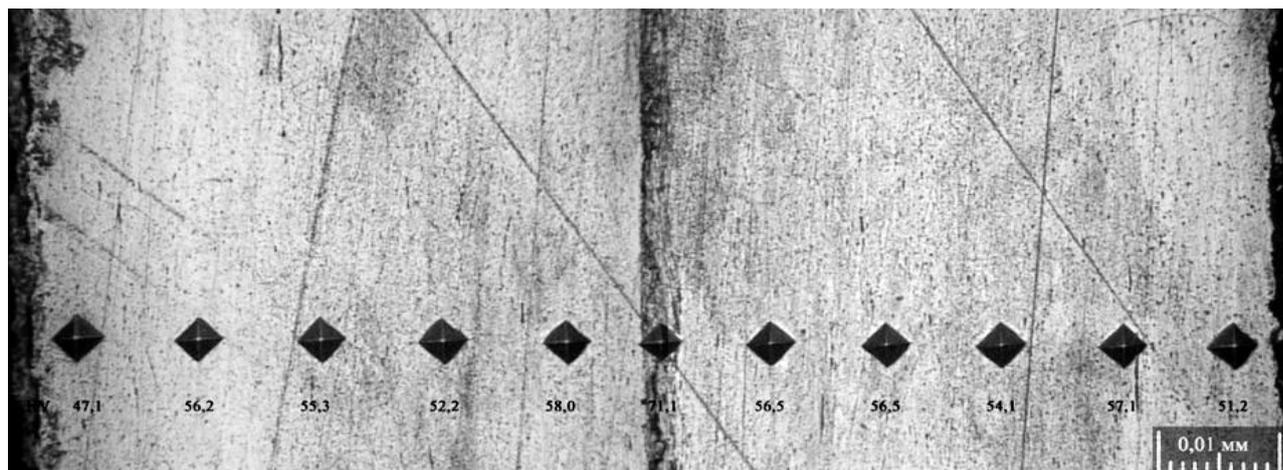


Рис. 7. Зона сварного соединения, Al+Al \times 100

ВЫВОДЫ

Для реализации предложенной технологии изготовления облегченных экранирующих корпусов разработано универсальное оборудование – пресс двойного действия, позволяющий осуществить процессы ЭМИШ, МИСФ и чеканки резьбы на одном устройстве.

Рассмотренные параметры разрядного контура оборудования с индуктором позволили определить параметры режимов импульсного процесса. Разработанный измерительный стенд разрядных процессов позволил осуществить регистрацию параметров процесса и определить их диапазон.

Произведенные металлографические исследования зоны соединения из алюминиевой фольги методом МИСФ позволяют утверждать, что характер формирования сварного соединения происходит в твердой фазе, что не влечет изменение структуры сварного соединения.

Данная разработка реализуется в Донском государственном техническом университете в соответствии с выполнением прикладных научных исследований (проекта) Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.574.21.0049 от 19.06.2014 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57414X0049.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахвалов Ю.О., Альбрехт А.В., Абросимов Ю.В. Научно-технические разработки КБ «Салют» 2009–2011 гг. Вып. 3. М.: Машиностроение, 2012. 512 с.
2. Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Агеев С.О. Технология магнитно-импульсной сварки-формовки облегченных экранирующих корпусов заделки кабеля в штепсельный разъем // Сварочное производство. 2014. № 12. С. 48–50.
3. Дудин А.А. Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Металлургия, 1979. 128 с.
4. Минин О.В., Минин В.Ф., Минин И.В. Магнитно-импульсная сварка (теория энергетических материалов). [Б. и.]: Palmarium Academic Publishing, 2013. 100 с.
5. Советченко П.Б. Возможности магнитно-импульсной обработки металлов. Томск: Издательство ТПУ, 2003. 93 с.
6. Глушечков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: ИД Федоров, 2014. 208 с.
7. Конюшков Г.В., Мусин Р.А. Специальные методы сварки давлением. М.: Ай Пи Эр Медиа, 2009. 632 с.
8. Казеев М.Н., Козлов В.Ф., Койдан В.С., Толстов Ю.С. Магнитно-импульсная сварка плоских образцов // Тезисы докладов XL Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 11–15 февраля 2013. Звенигород, 2013. С. 257–258.
9. Бадьянов Б.Н. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Ульяновск: Изд-во Ульяновского ГТУ, 2000. 405 с.
10. Квасницкий В.В. Специальные способы сварки. Николаев: УДМТУ, 2003. 437 с.
11. Технология магнитно-импульсной сварки-формовки облегченных экранирующих корпусов заделки кабеля штепсельный разъем / С.О. Агеев [и др.] // Волновые и виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сб. тр. междунар. науч. симпозиума технологов. машиностроителей и механиков. Ростов н/Д., 2014. С. 316–319.
12. Глушечков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: ИД Федоров, 2014. 208 с.
13. Егоров Ю.А., Карпухин В.Ф., Фомичева Л.Ф., Чуракова В.Г. Магнитно-импульсный привод для деформирования листовых и трубчатых заготовок // Магнитно-импульсная обработка материалов на современном этапе: труды 1-й Международной науч.-техн. конф. «Металлдеформ - 99». Самара, 1999. С. 46–50.
14. Юсупов Р.Ю., Глушечков В.А. Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: ИД Федоров, 2013. 128 с.
15. Плотников В.В. Экспериментальная установка магнитно-импульсной сварки // Вестник ДГТУ. 1999. № 1. С. 62.

16. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. М.: НТЦ Информтехника, 1992. 144 с.
 17. Глушечков В.А. Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов. Самара: Учебная литература, 2013. 148 с.
 18. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 168 с.
 19. Иванов Е.Г., Баландин Ю.А. Измерительный комплекс для исследования динамики магнитно-импульсного деформирования // Кузнечно-штамповое производство. 1984. №7. С. 14–15.
 20. Юсупов Р.Ю., Попов А.П. Методы и техника экспериментальных исследований быстропротекающих процессов МИОМ // Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития: тр. междунар. науч.-техн. конф. МИОМ-2007. Самара, 2007. С. 260–270.
 21. Стрижаков Е.Л., Бацемакин М.Ю., Нескоромный С.В. Условия качественной обработки и алгоритм расчёта и выбора параметров магнитно-импульсной сварки нахлесточных соединений // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 1. С. 64–67.
 22. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 2005. 544 с.
- REFERENCES**
1. Bakhvalov Yu.O., Albrecht A.V., Abrosimov Yu.V. *Nauchno-tekhnicheskie razrabotki KB "Salyut" 2009–2011 gg.* [Research and development projects of CD "Salyut" of 2009-2011]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2012, no. 3, 512 p.
 2. Strizhakov E.L., Neskoromny S.V., Ageev S.O. Technology of magnetic-pulse welding – forming of light weight shielding cases for electrical cable sealing in plug connector. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2014, no. 12, pp. 48–50.
 3. Dudin A.A. *Magnitno-impulsnaya svarka metallov* [Magnetic-pulse welding of metals]. Moscow, Metallurgiya publ., 1979, 128 p.
 4. Minin O.V., Minin V.F., Minin I.V. *Magnitno-impulsnaya svarka (teoriya energeticheskikh materialov)* [Magnetic-pulse welding (the theory of power metals)]. Palmarium Academic Publishing, 2013, 100 p.
 5. Sovetchenko P.B. *Vozможности magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Capabilities of magnetic-pulse metals processing]. Tomsk, TPU publ., 2003, 93 p.
 6. Glushchenkov V.A., Karpukhin V.F. *Tekhnologiya magnitno-impulsnoy obrabotki materialov* [Technology of magnetic-pulse metals processing]. Samara, Fedorov publ., 2014, 208 p.
 7. Konyushkov G.V., Musin R.A. *Spetsialnie metodi svarki davleniem* [Special methods of pressure welding]. Moscow, IPR Media publ., 2009, 632 p.
 8. Kazeev M.N., Kozlov V.F., Koydan Yu.S. Magnetic-pulse welding of test plates. *Tezisi dokladov XL mezhdunarodnoy (Zvenigorodskoy) konferentsii po fizike plazmi i UTS*. Zvenigorod, 2013, pp. 257–258.
 9. Badyanov B.N. *Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov* [Guide on magnetic-pulse processing of metals]. Ulyanovsk, Ulyanovskiy GTU publ., 2000, 405 p.
 10. Kvasnitsky V.V. *Spetsialnie sposobi svarki* [Special methods of welding]. Nikolaev, UDMTU publ., 2003, 437 p.
 11. Ageev S.O., Lemeshev S.V., Rachkov M.A., Perlov D.S., Neskoromny S.V. Technology of magnetic-pulse welding – forming of light weight shielding cases for electrical cable sealing in plug connector. *Sbornik trudov nauchnogo simpoziuma "Volnovie i vibrovolnovie tekhnologii v mashinostroenii, metalloobrabotke i drugikh otraslyakh"*. Rostov-na-Donu, 2014, pp. 316–319.
 12. Glushchenkov V.A., Karpukhin V.F. *Tekhnologiya magnitno-impulsnoy obrabotki materialov* [Technology of magnetic-pulse metals processing]. Samara, Fedorov publ., 2014, 208 p.
 13. Egorov Yu.A., Karpukhin V.F., Fomicheva L.F., Churakova V.G. Magnetic-pulse drive for plate and pipe blank parts deformation. *Magnitno-impulsnaya obrabotka materialov na sovremennom etape*. Samara, 1999, pp. 46–50.
 14. Yusupov P.Yu., Glushchenkov V.A. *Energeticheskie ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki materialov* [Power plants for magnetic-pulse processing of materials]. Samara, Fedorov publ., 2013, 128 p.
 15. Plotnikov V.V. Experimental plant for magnetic-pulse welding. *Vestnik DGTU*, 1999, no. 1, pp. 62.
 16. Talalaev A.K. *Induktory i ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Coils and plants for magnetic-pulse processing of metals]. Moscow, NTTs Informtekhnik publ., 1992, 144 p.
 17. Glushchenkov V.A. *Induktory dlya magnitno-impulsnoy obrabotki materialov* [Coils for magnetic-pulse processing of materials]. Samara, Uchebnaya literatura publ., 2013, 148 p.
 18. Bely I.V., Fertik S.M., Khimenko L.T. *Spravochnik po magnitno-impulsnoy obrabotke metallov* [Guide on magnetic-pulse processing of metals]. Kharkov, Vishcha shkola publ., 1977, 168 p.
 19. Ivanov E.G., Balandin Yu.A. Measuring complex for study of magnetic-pulse deformation dynamics. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1984, no. 7, pp. 14–15.
 20. Yusupov R.Yu., Popov A.P. Methods and technology of experimental research of high-speed processes of MPPM. *Magnitno-impulsnaya obrabotka materialov. Puti sovershenstvovaniya*. Samara, 2007, pp. 260–270.
 21. Strizhakov E.L., Batsemakin M.Yu., Neskoromny S.V. Conditions for quality processing and algorithm of estimation and selection of parameters of magnetic-pulse welding of lapped joints. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2007, no. 1, pp. 64–67.
 22. Lysak V.I., Kuzmin S.V. *Svarka vzrivom* [Explosion welding]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005, 544 p.

**THE TECHNOLOGY OF PRODUCING OF STAMP-WELDED LIGHT WEIGHT CASES
FOF ELECTRICAL CABLE SEALING**

© 2015

S.V. Nescoromniy, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Machinery and automation of welding production»
Y.L. Strizhakov, Doctor of Engineering,
Professor of the Department «Machinery and automation of welding production»
Don State Technical University, Rostov-on-Don (Russia)

Keywords: magnetic-pulse welding – forming; elastomagnetic-pulse stamping; double-acting press; magnetic pressure; induction dynamic drive; solid phase welding.

Abstract: The application of technology of production of light-weighted shielding cases for on-board equipment connectors using the turning method is accompanied by the low coefficient of material using, considerable labour costs, and the increased product weight.

For reduction in weight of electrical plug connectors the authors suggested to produce cases of electrical connectors from a sheet-like material which ensures radio interference caging. Aluminum foil with the thickness of $(0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-3}$ m has the best indices of low volume weight and shielding.

The suggested technology of production of light weight shielding cases includes the following processes such as the elastomagnetic-pulse stamping (EMPS) of a blank part, the magnetic-pulse welding – forming (EMPF) and the screwthread chasing.

Magnetic pressure in the suggested EMPF scheme influencing blank part walls has the shape-generating effect according to the matrix configuration and the welding effect in the zone of cross threading.

The basic parameters of EMPF modes for different size types of cases made of aluminum foil are the following: the energy stored in condensers batteries, the operating current frequency and the charging volume of capacity storages.

According to the agreement with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement № 14.574.21.0049 dated the 19.06.2014, the unique RFMEFI57414X0049 identifier, rapid adjusting universal equipment – a double-acting press was built. It ensures both static and pulse load in a single set and allows performing of all stages of technological process of connector cases production in one and the same device.

The double-acting press consists of the process unit for static loading and the pulse current generator with the induction dynamic drive for pulse loading.

To optimize the technology, a discharge processes measuring assembly was installed. It includes the devices for registration of discharge circuit current and its frequency, magnetic pressure and physical parameters of double-acting press, both active and inductive discharge circuit resistance and the capacity storage unit.

The measuring assembly will allow carrying out the analysis of welding joints.

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЗОН ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ
СТАЛЕЙ И ЧУГУНОВ**

© 2015

П.А. Огин, аспирант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: оптоволоконный лазер; зона термического влияния; лазерная закалка; термоупрочнение; микротвердость.

Аннотация: В статье рассмотрена проблема повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей машин, оснастки и металлорежущего инструмента. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является термическая обработка изнашиваемых поверхностей за счет воздействия концентрированными тепловыми потоками, создаваемыми лучом лазера. Наиболее перспективными с технологической точки зрения представляются современные оптоволоконные лазеры. Изучение и прогнозирование структуры зон перекрытия при многопроходной лазерной обработке является важным элементом подготовки технологического процесса и напрямую влияет на выбор режимов обработки. Приводятся результаты экспериментального исследования влияния параметров лазерной обработки оптоволоконным лазером на состояние поверхностного слоя зон перекрытия при многопроходной термической обработке сталей и чугунов. В экспериментальных исследованиях использовали оптоволоконный лазер ЛКД4-015.150. Обработку производили в непрерывном режиме с частичным оплавлением поверхности обработки. Режимы обработки выбирали исходя из данных работы «Модификация поверхности сталей и чугунов при помощи оптоволоконного лазера». В качестве образцов использовали пластины размерами 15x15x3 мм из стали Х12МФ и чугуна СЧ21. После обработки торцовую поверхность каждого образца шлифовали на минимальных режимах для исключения повторного термического влияния на структуру, после чего на ней изготавливали микрошлифы. В качестве травителя использовали 4 %-ный спиртовой раствор азотной кислоты HNO_3 . Твердость измеряли при помощи микротвердомера Shimadzu HМV-2. Структуру образцов изучали на микроскопе Zeiss AXIO Observer.D1m, а также на электронном сканирующем микроскопе Zeiss LEO1455VP. В ходе работы произведен анализ структуры зон перекрытия, измерена их микротвердость. Представлены расчетная схема и формула расчета коэффициента перекрытия при многопроходной обработке.

ВВЕДЕНИЕ

Узлы и механизмы современных машин работают в условиях повышенного износа. Его интенсивность напрямую зависит от качества предварительной обработки поверхности трения. Поэтому формирование специальных структур в поверхностном слое изнашиваемых поверхностей деталей машин, повышающих их износостойкость, является актуальной задачей. Одним из перспективных направлений в данной области является модификация изнашиваемой поверхности при помощи лазера [1–3]. При решении различных триботехнических задач лазерный луч обладает рядом преимуществ перед традиционными технологиями, к которым относятся стандартные методы термической обработки, технологии пластического деформирования и др.[3].

За прошедшие годы было выполнено большое количество исследований по лазерной термообработке. Для исследований применялись как широко изученные CO_2 и твердотельные лазеры, так и современные оптоволоконные и диодные лазеры. Технологий упрочнения при помощи твердотельных или газоразрядных CO_2 -лазеров посвящено множество работ [4–16]. К числу явных недостатков этих лазеров, в сравнении с современными оптоволоконными лазерами, можно отнести низкий КПД луча в зоне обработки, применение для доставки луча в зону обработки сложных оптических систем, низкую плотность мощности обработки, а также большое пятно контакта в зоне обработки [17–19].

Возможность обеспечения закалки локальной зоны является неоспоримым преимуществом лазерной обработки. Однако локальность обработки является как преимуществом лазерной обработки, так и недостатком. Если требуется обеспечить закалку достаточно большой области, обработку лазером производят с пе-

рекрытием. При этом очень важно обеспечить требуемые характеристики зон перекрытия.

Целью работы являлось определение влияния параметров лазерной упрочняющей обработки оптоволоконным лазером на структуру и свойства зон перекрытия инструментальной стали Х12МФ и серого чугуна СЧ21.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе экспериментального исследования изучали процесс лазерной закалки с перекрытием образцов из стали Х12МФ, а также чугуна СЧ21 с помощью оптоволоконного иттербиевого квазинепрерывного лазера ЛКД4-015.150 в режиме непрерывного действия. Изучали влияние плотности мощности излучения E и коэффициента перекрытия на микроструктуру и свойства зон перекрытия области обработки. Плотность мощности была равна $4,5 \cdot 10^3$ Вт/см², а перекрытие составило 10 %. Обработку образцов проводили с частичным оплавлением поверхности.

После обработки торцовую поверхность образца шлифовали на минимальных режимах для исключения повторного термического влияния на структуру, после чего на ней изготавливали микрошлифы. Твердость измеряли микротвердомером Shimadzu HМV-2. Структуру образцов изучали на микроскопе Zeiss AXIO Observer.D1m, а также на электронном сканирующем микроскопе Zeiss LEO1455VP.

Для обеспечения требуемого перекрытия лазерный луч смешали на величину l_1 , которую рассчитывали согласно формуле

$$x = \frac{(l - l_1) \cdot 100}{l}.$$

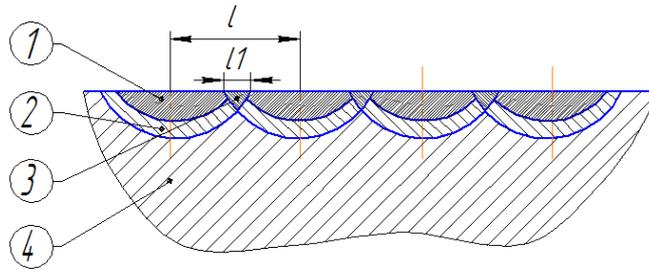


Рис. 1. Схема лазерного упрочнения с перекрытием.
1 – зона оплавления; 2 – зона термического влияния; 3 – зона перекрытия; 4 – основной материал

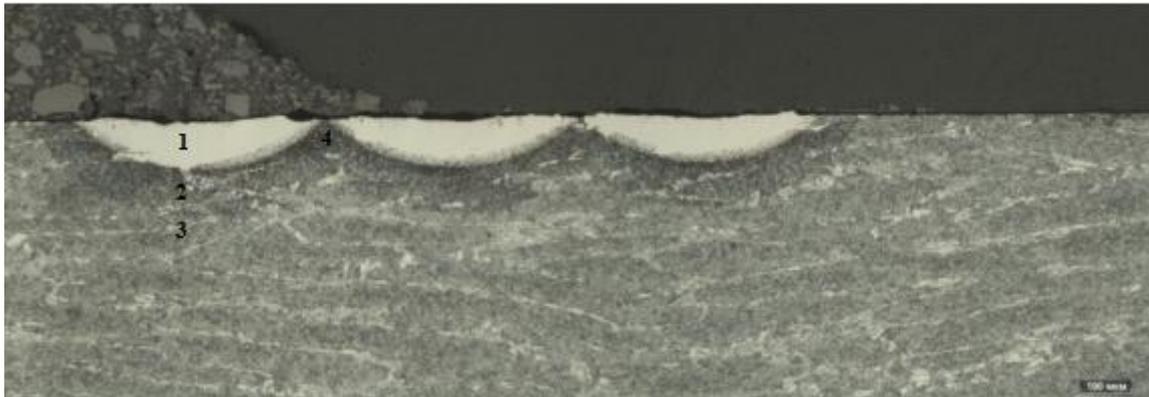


Рис. 2. Поперечное сечение зоны лазерной обработки стали X12MФ.
 $E=4,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$, перекрытие 10 %
1 – зона оплавления; 2 – ЗТВ; 3 – основная структура; 4 – переходная зона

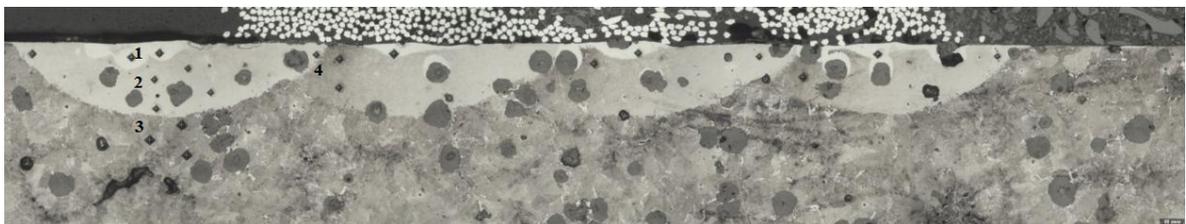


Рис. 3. Поперечное сечение зоны лазерной обработки чугуна СЧ21.
 $E=4,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$, перекрытие 10 %
1 – зона оплавления; 2 – ЗТВ; 3 – основная структура; 4 – переходная зона

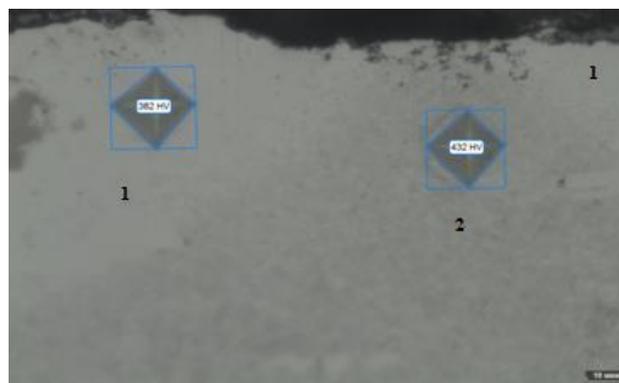


Рис. 4. Поперечное сечение переходной зоны образца стали X12MФ.
1 – зона оплавления; 2 – переходная зона

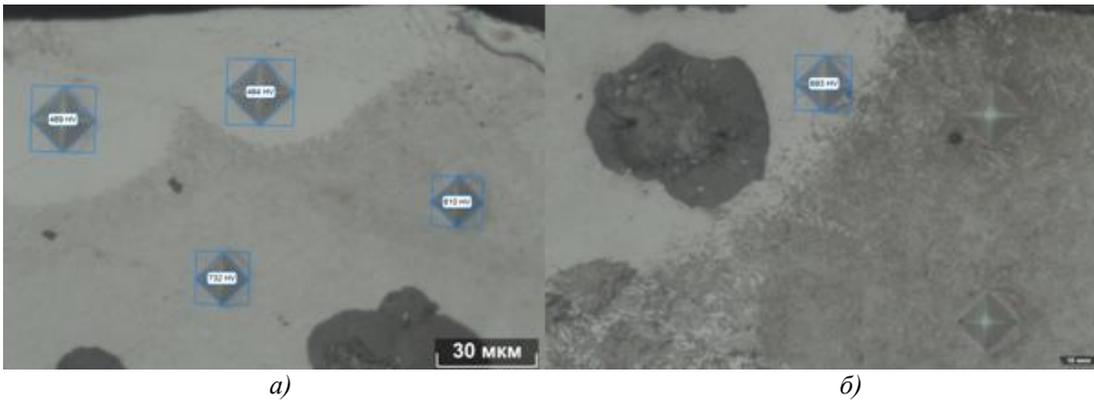


Рис. 5. Поперечное сечение переходных зон образца чугуна СЧ21:

а) – в непосредственной близости к зоне оплавления; б) – место стыка двух обрабатываемых участков

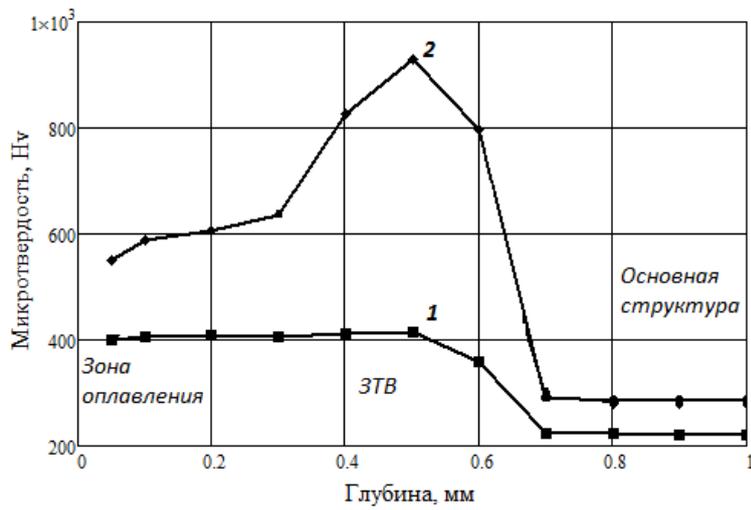


Рис. 6. Распространение микротвердости вглубь образца.

1 – X12MФ; 2 – СЧ21

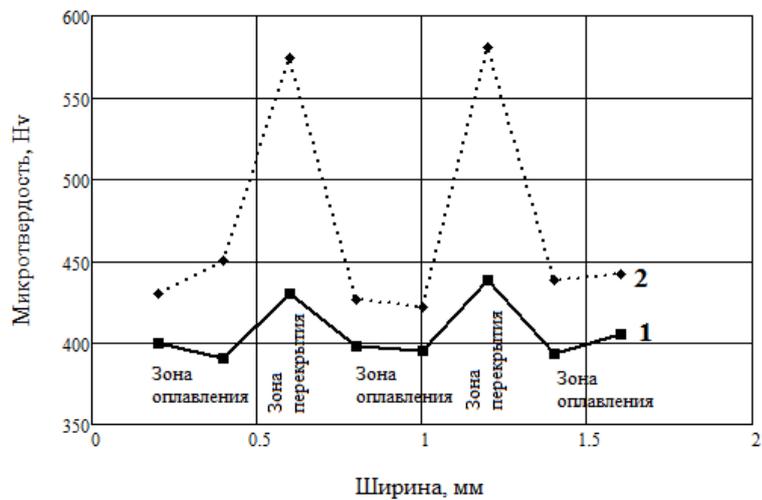


Рис. 7. Распространение микротвердости по ширине обработанного участка.

1 – X12MФ; 2 – СЧ21

Схема лазерной обработки с требуемым перекрытием показана на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 и 3 показаны поперечные сечения зоны обработки для стали Х12МФ (рис. 2) и чугуна СЧ21 (рис. 3). На рис. 4 показано поперечное сечение переходной зоны образца из стали Х12МФ. На рис. 5 показано поперечное сечение переходных зон образца чугуна СЧ21.

Измерение микротвердости образцов производили вглубь образца и вдоль поверхности на расстоянии 0,3 мм. Рис. 6 и 7 иллюстрируют полученные в ходе измерений значения.

Как видно из рис. 2, при равном тепловложении на поверхности стали Х12МФ характерно наличие ярко выраженной зоны оплавления, представляющей собой дендритную структуру глубиной до 170 мкм с микротвердостью 380–420 Нв. Далее следует зона термического влияния с микротвердостью 400 Нв. При схожих параметрах обработки доля оплавленной зоны чугуна СЧ21 невелика, состоит из ледебурита с микротвердостью 460–540 Нв. Зона термического влияния представляет собой реечный мартенсит с небольшим количеством аустенита остаточного и имеет микротвердость до 930 Нв. Зоны перекрытия образцов имеют структуру зон термического влияния с равной микротвердостью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительные исследования переходных зон [20, 21] указывали на наличие в них троостита, характерного для зоны отпуска, имеющего пониженную микротвердость, в сравнении с зонами лазерной закалки. Это связано с малой плотностью энергии в зоне лазерного воздействия. При повторном лазерном воздействии в переходной зоне из-за большой протяженности по ширине температура не успевает повторно достичь величин, характерных для образования закалочных структур, и поэтому возникает зона отпуска.

Исследуемые переходные зоны имеют общую структуру с зоной термического влияния. Микротвердость переходных зон равна микротвердости ЗТВ. Это обуславливается более высокой плотностью мощности лазерного излучения, введенной в зону обработки. Однако для стали характерна небольшая разница микротвердости зоны оплавления, зоны термического влияния и переходной зоны между двумя обработанными участками. Для чугуна характерно наличие ярко выраженной границы между микротвердостью составляющих элементов зоны обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования зон перекрытия образцов из сталей и чугунов после лазерной закалки позволили сделать заключение о возможности применения оптоволоконных лазеров для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин, технологической оснастки и металлорежущего инструмента. Отсутствие зон отпуска в переходных участках говорит о возможности закалки участка обрабатываемой поверхности по всей ширине обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев В.И., Бойченко О.В., Огин П.А. Модификация поверхности сталей и чугунов при помощи оптоволоконного лазера // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Т. 7. № 4. С. 56–61.
2. Огин П.А., Васькин К.Я. Повышение ресурса мелкогабаритного инструмента за счет модификации изнашиваемых поверхностей при помощи оптоволоконного лазера // IV Резниковские чтения: труды междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2015. С. 143–145.
3. Григорьянц А.Г., Щиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
4. Пинахин И.А., Тоекин С.А. Выбор режимов объемного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) по износостойкости режущих инструментов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 2. С. 78–81.
5. Ярьско С.И., Горяинов Д.С. моделирование процесса лазерного упрочнения режущего инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 921–926.
6. Ярьско С.И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2001. Т. 3. № 1. С. 27–37.
7. Ситкина Л.П., Ярьско С.И. Эффективность технологии лазерной упрочняющей обработки в инструментальном производстве // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 7. С. 40–43.
8. Lee J.-H., Jang J.-H., Joo B.-D., Son Y.-M., Moon Y.-H. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2009. Vol. 19. № 4. P. 917–920.
9. Kim J.-D., Lee M.-H., Lee S.-J., Kang W.-J. Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam // Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition). 2009. Vol. 19. № 4. P. 941–945.
10. Горынин В., Кондратьев С., Попов В. Лазерное модифицирование трибологических свойств сталей и цветных сплавов // Фотоника. 2010. № 3. С. 26–32.
11. Магин Д.Ю., Костромин С.В. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 256–261.
12. Чирков А. Лазерно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев сталей при атмосферных условиях // Фотоника. 2008. № 4. С. 28–30.
13. Синяков К.А. Влияние скорости нагрева на структуру и свойства инструментальных сталей // Инструмент и технологии. 2008. № 5. С. 151–158.
14. Бирюков В. Восстановление и упрочнение поверхностей лазерным излучением // Фотоника. 2009. № 3. С. 14–17.
15. Бирюков В. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении // Фотоника. 2012. № 3. С. 22–27.

16. Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J. The effect of laser surface hardening on the wear and friction characteristics of acicular bainitic ductile iron // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2009. Vol. 4. № 2. P. 167–171.
 17. Скрипченко А.И. Тестирование процесса закалки сталей излучением волоконных лазеров // *РИТМ*. 2007. № 5. С. 52–53.
 18. Попов В. Лазерное упрочнение сталей: сравнение волоконных и CO₂-лазеров // *Фотоника*. 2009. № 4. С. 18–21.
 19. Сомонов В.В., Цибульский И.А. Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // *Металлообработка*. 2014. № 1. С. 9–12.
 20. Майоров В.С. Лазерное упрочнение металлов // *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С. 439–469.
 21. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
- REFERENCES**
1. Malyshev V.I., Boychenko O.V., Ogin P.A. Steel and iron surface modification using the fiber optic laser. *Sbornik nauchnikh trudov Sworld*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 56–61.
 2. Ogin P.A., Vaskin K.Ya. Improvement of small-size tool resource by means of wearing surfaces modification using the fiber optic laser. *Trudi mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "IV Reznikovskie chteniya"*. Tolyatti, TGU publ., 2015, pp. 143–145.
 3. Grigoryants A.G., Shchiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnicheskie protsessi lazernoy obrabotki* [Technical processes of laser treatment]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman publ., 2006, 664 p.
 4. Pinahin I.A., Toeskin S.A. Selecting surround pulsed laser hardening (VPLH) for wear of cutting tools. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federalnogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 78–81.
 5. Yaresko S.I., Goryainov D.S. The laser hardening of the cutting tool modelling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 921–926.
 6. Yaresko S.I. Wear and wear resistance analysis of hard alloy tools after laser treatment. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2001, vol. 3, no. 1, pp. 27–37.
 7. Sitkina L.P., Yaresko S.I. Efficiency of laser hardening processing technology in tool production. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 9, no. 7, pp. 40–43.
 8. Lee J.-H., Jang J.-H., Joo B.-D., Son Y.-M., Moon Y.-H. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 917–920.
 9. Kim J.-D., Lee M.-H., Lee S.-J., Kang W.-J. Laser transformation hardening on rod-shaped carbon steel by Gaussian beam. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 941–945.
 10. Gorinin V., Kondratiev S., Popov V. Laser Modification of Tribological Behavior of Steel and Nonferrous Alloys. *Fotonika*, 2010, no. 3, pp. 26–32.
 11. Magin D.U., Kostromin S.V. Investigation of structure and properties of high heat resistant steel after heat treatment and laser surface hardening. *Trudi Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 4, pp. 256–261.
 12. Chirkov A. Laser-plasma steel surface layer nanostructuring under atmosphere conditions. *Fotonika*, 2008, no. 4, pp. 28–30.
 13. Sinyakov K.A. Influence of heating rate on the structure and characteristics of tool steels. *Instrument i tekhnologii*, 2008, no. 5, pp. 151–158.
 14. Birukov V. Surface Recover and Strengthening with Laser Emission. *Fotonika*, 2009, no. 3, pp. 14–17.
 15. Birukov V. Steels Structure and Properties Variations in the Process of Laser Hardening. *Fotonika*, 2012, no. 3, pp. 22–27.
 16. Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J. The effect of laser surface hardening on the wear and friction characteristics of acicular bainitic ductile iron. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2009, vol. 4, no. 2, pp. 167–171.
 17. Skripchenko A.I. Testing of the process of steel hardening by fiber lasering. *RITM*, 2007, no. 5, pp. 52–53.
 18. Popov V. Laser Hardening Steels. Comparison of Fiber and CO₂ Lasers. *Fotonika*, 2009, no. 4, pp. 18–21.
 19. Somonov V.V., Cybulsky I.A. The efficiency of the use of fiber lasers for laser hardening products in the industry. *Metalloobrabotka*, 2014, no. 1, pp. 9–12.
 20. Mayorov V.S. Laser hardening of metals. *Lazernie tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemi fundamentalnykh issledovaniy i prikladnykh razrabotok*. Moscow, FIZMATLIT publ., 2009, pp. 439–469.
 21. Grigoryants A.G. *Osnovi lazernoy obrabotki materialov* [Basic principles of laser processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989, 304 p.

**THE STRUCTURE AND CHARACTERISTICS OF THE OVELAP AREAS
DURING THE LASER HARDENING OF STEELS AND IRONS**

© 2015

P.A. Ogin, post-graduate student of the Department «Equipment and technology of machinery production»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: fiber optic laser; heat-affected zone; laser hardening; thermohardening; microhardness.

Abstract: The article considers the issue of wear resistance improvement of working surfaces of the parts of machines, equipment and metal cutting tools. One of the most prospective directions in this field is the thermal treatment of wearing surfaces by means of the action of focused heat flows created by laser light. Modern fiber optic lasers are the most advanced from technology viewpoint. The research and estimation of the structure of the overlap areas during multi-pass laser operation are the key elements of preparing of technology process and influences directly the selection of treatment modes. The author gives the results of experimental research of the influence of fiber optic laser treatment parameters on the state of surface layer of the overlap areas during the multi-pass heat treatment of steels and irons. LKD4-015.150 fiber optic laser was used for experimental research. The treatment was performed in the continuous mode with the partial fusion of processed surface. The process mode was selected according to the data of the work “Modification of steel and iron surfaces using the fiber optic laser”. X12MF steel and SCh21 iron plates 15x15x3 mm in size were used as the samples. After treatment, end surface of each sample was burnished at minimal modes in order to eliminate the additional thermal influence on the structure; after that, microslices were produced on the surface. 4-% alcohol solution of hydrogen nitrate (HNO₃) was used as an etchant. The hardness was measured using the Shimadzu HMV-2 microhardness tester. The samples’ structure was studied using the Zeiss AXIO Observer.D1m microscope and the Zeiss LEO1455VP electron scanning microscope. During this research, the author carried out the analysis of the overlap areas structure and measured their microhardness. The article displays the computational scheme and calculation formula of engagement factor during the multi-pass processing.

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ВЫЗОВЫ В СКОРОСТНОМ И УЛЬТРАСКОРОСТНОМ ШЛИФОВАНИИ

© 2015

А.В. Пилинский, магистр техники и технологии
Raymer Metals, Inc., Лос-Анджелес (США)

Ключевые слова: суперабразивные материалы; глубинное, высокоскоростное, сверх(ультра)скоростное шлифование; комбинированные методы сверхскоростного шлифования.

Аннотация: В обзоре представлены последние научные результаты в области шлифования. Уделено внимание созданию инновационных шлифовальных инструментов, таких как «высокопроницаемые» круги с минимальным количеством связки. Рассмотрены перспективы создания новых абразивных инструментов, оснащенных режущими зернами, прочность которых достигает, а иногда и превосходит прочность синтетических алмазов.

Особое внимание уделено передовым методам глубинного, скоростного, высокоскоростного и ультраскоростного шлифования. Представлены новые и комбинированные методы скоростного и высокоскоростного шлифования, такие как быстроходное шлифование, точечное скоростное шлифование, глубинно-быстроходное шлифование и другие методы, широко исследуемые в настоящее время в Китае, США, Германии, Японии и других странах.

Обсуждаются требования к новым видам оборудования и инструментам для комбинированного сверхскоростного и ультраскоростного шлифования. Показаны возможности и области применения скоростного алмазного шлифования и абразивного скоростного шлифования «высокопроницаемыми» кругами с экструзионными зернами. Круги и зерна с соотношением длины к диаметру 4:1 и 8:1 изготавливаются крупнейшим в мире производителем абразивно-алмазного инструмента *Saint-Gobian Abrasives* (США, Франция).

Кратко представлены результаты производственного опыта Китая, США, Германии и Японии в области различных видов сверхскоростного шлифования.

Список литературы включает работы, относящиеся к последнему десятилетию, и представляет исследования, выполненные наиболее авторитетными и известными в мире учеными в области высокоскоростного шлифования.

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Настоящий обзор является продолжением и развитием работы [1]. Как и в ней, круг рассматриваемых вопросов будет ограничен инновационными методами абразивно-алмазной обработки с акцентом на различные виды скоростного, глубинно-скоростного и ультраскоростного шлифования. Будут учтены изменения и новые технологии, появившиеся за последние 5–7 лет. Главным образом, будут проанализированы публикации на английском языке, относящиеся к исследованиям, выполненным в Китае, в США, а также в Германии и других европейских странах.

ШЛИФОВАЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Крупнейший производитель шлифовального инструмента в мире *Saint-Gobian Abrasives* продолжает выпуск и увеличивает продажи кругов, оснащенных *Saint-Gobain* (SG) и *Sol-Gel* абразивами [2; 3]. Вследствие уникальности свойств таких абразивов возник вопрос их рационального использования. Ранее в процессе изготовления круга в зерновой состав вводили не более 5 % SG-абразивов с целью избежать чрезмерных сил резания. При этом достигалось увеличение стойкости кругов вплоть до 10-кратного, хотя стоимость операции также возрастала. Впоследствии компания *Norton*, являющаяся частью *Saint-Gobian Abrasives*, создала новый тип зерен – TG и TG2 (экструзионные SG) с соотношениями длины зерна к диаметру 4:1 и 8:1 соответственно. Круги получили промышленное название TARGA (с TG) и ALTOS (с TG2). Спеканием зерен при температуре 1500 °С удалось получить так называемые высокопроницаемые круги практически без связки [1] с уникальными свойствами. В связи с тем что зерна касаются друг друга всего в нескольких точках, а связка присутствует лишь в местах их соприкосновения и играет роль «сварного шва», круги обладают повышенной

прочностью, стойкостью, низким весом и не требуют правки. Считается, что эти круги применимы как для силового, так и для скоростного шлифования. У нас вызывает некоторые сомнения возможность применения «высокопроницаемых» кругов для силового шлифования, однако какими-либо данными о прочностных расчетах инструмента, кроме утверждений, сделанных в [2] и [3], мы не располагаем. В настоящее время круги, оснащенные зернами SG, TG/TG2, Cubitron [1], во все возрастающих пропорциях заменяют традиционные абразивные круги и составляют конкуренцию боразовым кругам (СНВ).

Говоря о перспективах создания новых абразивных инструментов, мы оставляем за пределами рассмотрения важные вопросы создания новых связок, а также технологии изготовления и правки кругов. Упомянутые разработки *Saint-Gobian Abrasives* находят развитие в создании новых типов зерен Al-O-N (ABRAL), обладающих повышенной режущей способностью и возможностью работы в режиме самозатачивания [2; 4]. Появляются новые абразивные материалы, прочность которых сопоставима с прочностью CBN и алмазов. Университет штата Айова объявил о создании режущего материала Al-Mg-B с прочностью, равной прочности CBN [5], *The Dow Chemical Co* еще в 2000 г. запатентовала режущие зерна Al-C-N с прочностью, приближающейся к прочности алмаза [6], а Калифорнийский университет Беркли создал режущую керамику C₃N с прочностью, превосходящей прочность алмаза [7]. Следует, однако, отметить, что производство инструментов, оснащенных новыми сверхтвердыми абразивами, пока не достигло коммерческих масштабов. Продолжаются испытания, как лабораторные, так и производственные. Ряд авторитетных исследователей (*I. Marinescu* и *J. Webster* из США, англичанин *W.B. Rowe* и др.) не имеют ни малейших сомнений в конечном успехе и скором прорыве

в области абразивной обработки, так как уже имеющиеся результаты весьма многообещающи. Правда, в научно-технологические вопросы активно «вмешиваются» экономические факторы. По данным [2], начиная с 2005 года китайские производители суперабразивов довели их выпуск до 4 млрд карат в год, создав пере-производство шлифовальных, полировальных и других видов зерен на рынке. В настоящее время цена шлифовальных инструментов в мире падает, что замедляет их производство и, как следствие, темпы исследований, проводимых в США, Японии и Европе. В мире снова возникает своего рода «соревнование» между шлифованием и точением [2].

ПЕРЕДОВЫЕ МЕТОДЫ ШЛИФОВАНИЯ, СКОРОСТНОЕ ШЛИФОВАНИЕ, КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ АБРАЗивно-АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ В США, КИТАЕ И ЕВРОПЕ

1. Методы Creep-Feed Grinding (CFG) и Speed-Stroke Grinding (SSG). CFG-процесс – это хорошо известный в инженерной практике процесс глубинного шлифования, используемый, как правило, для врезного шлифования различных пазов, выемок и аналогичных профилей в аэрокосмическом и станкостроительном производстве. CFG-процесс имеет ряд неоспоримых преимуществ перед традиционным шлифованием [2; 8]. Не развивая эту тему по соображениям объема обзора, отметим, что в американской индустрии в настоящее время используются три типа CFG [9]: псевдо CFG, или PCFG (pseudo CFG); реальный CFG, или TCFG (true CFG); CFG с непрерывной правкой, или CDCFG (continuous-dress CFG).

PCFG применяется для обработки профилей с малыми поперечными сечениями за один проход. При этом длина дуги контакта не успевает достигнуть величин, характерных для TCFG. Метод CDCFG обеспечивает повышенный съем, лучшее качество поверхности и экономические показатели процесса. При всех трех методах круг работает в «тяжелых» условиях. Скорость продольной подачи обычно составляет 20...30 м/мин, причем CNB-круги показывают наилучшие результаты [2; 4; 9].

Процесс *Speed-Stroke Grinding* (SSG) – относительно новая, перспективная технология плоского шлифования таких труднообрабатываемых материалов, как керамика и никелевые сплавы. Ввиду отсутствия русского эквивалента для обозначения процесса мы предлагаем называть его «быстроходное шлифование». SSG характеризуются высокой скоростью перемещения стола, вплоть до 200 м/мин при ускорении до 50 м/с². Автор и первый исследователь процесса SSG *I. Inasaki* – профессор Университета Кейо (Япония) – «лидирующая фигура в японском и мировом шлифовании», по определению И. Маринеску. Детальные исследования Инасаки [2; 10], а также докторские диссертации Зеппенфельда и Нахмани из Рейнско-Вестфальского технического университета Аахена (Германия), выполненные в 2005–2007 гг., внесли большой вклад в понимание особенностей и механизмов, присущих SSG. *C. Zeppenfeld* исследовал изменение процесса стружкообразования и механизма износа кругов с увеличением скорости стола при шлифовании титано-алюминиевых сплавов. *Z. Nachmani* обрабатывал стали различной твердости

и обратил особое внимание на механические, энергетические и температурные аспекты SSG. Все авторы обосновали преимущества быстроходного шлифования, обратив особое внимание на тот факт, что в этом процессе формирование стружки начинается раньше, чем при традиционном шлифовании. Это приводит к увеличению толщины среза, к изменению соотношения между пластической и упругой деформациями в зоне резания и к облегчению процесса стружкообразования. Снижается трение в контакте «зерно – материал», что наряду с уменьшением времени контакта снижает энергетическую и тепловую напряженность процесса. В дополнение ко всему, как отмечают исследователи, увеличивается число активных зерен. Последнее положение, на наш взгляд, противоречит утверждению Инасаки [10] и авторов диссертационных работ об увеличении толщины среза, так как с увеличением числа активных зерен толщина среза должна уменьшаться.

2. Скоростное шлифование. Ключевые технологии и новые задачи. В настоящее время шлифование составляет в среднем более 25 % механической обработки в мире, причем 70 % высокоточной обработки выполняется именно на шлифовальном оборудовании [2].

В число мировых лидеров в исследовании процессов шлифования, в особенности скоростного, наряду с США и Германией выдвигается Китай [11]. В конце XX века при традиционном шлифовании удельный съем материала составлял примерно 10 мм³/мм·с [11; 12]. Для инженеров и исследователей это базовый показатель, от которого надо двигаться вперед с целью дальнейшего повышения эффективности процесса.

В начале приведем некоторые статистические данные, касающиеся применения скоростного шлифования кругами CNB в производстве. Профессора *J.F.G. Olivera* (Бразилия), *G. Guo* (США) и др. [13] провели опрос (по нашему мнению, не вполне репрезентативный) среди президентов и генеральных менеджеров станкостроительных компаний из различных стран на международных конференциях и выставках ЕМО 2007 и IMTS 2008. В числе задаваемых вопросов были следующие: 1. Какая максимальная скорость вращения круга применяется на Вашем предприятии и у Ваших заказчиков при шлифовании кругами CNB? 2. Каковы технические причины не использовать скоростное шлифование?

Систематизированные ответы на эти вопросы представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Скорости резания, применяемые в настоящее время при шлифовании кругами CNB на предприятиях США, Германии, Швейцарии и Великобритании

Скорость, м/с	Процент применения
40...80	39
100...120	26
121...140	13
170...180	9
200...240	13

Скоростное (40...120 м/с) и высокоскоростное (121...240 м/с) шлифование развивалось достаточно долго. В связи с опережающим применением кругов

CNB и созданием новых типов станков скорость круга 120...200 м/с стала обычной для индустриальной практики в Германии, США, Японии, Швейцарии и ряде других стран [11; 12; 14], хотя темпы внедрения в производство таких скоростей недостаточно высоки, что подтверждают результаты опроса. Лабораторные испытания проводились и проводятся при скоростях, достигающих 400 м/с [11], что знаменует собой наступление эры супер(ультра)скоростного шлифования. Ультраскоростное шлифование сейчас считается «революционным» процессом, который приведет к изменению всех, без исключения, аспектов, относящихся к шлифованию в частности и к производству вообще [2; 11; 12]. Международная академия производственных технологий (CIRP) относит суперскоростное шлифование к одному из главнейших направлений исследований в XXI веке [11–13].

Таблица 2. Факторы, ограничивающие применение скоростного шлифования кругами CNB на предприятиях США, Германии, Швейцарии и Великобритании

Процент	Проблемы, ограничивающие применение скоростного шлифования
33	Технические сложности, правка, охлаждение, балансировка, оборудование и т. д.
24	Экономические причины: повышенные капиталовложения
10	Вопросы безопасности
7	Отсутствие интереса у заказчика
26	Другие причины

Съем материала при высокоскоростном шлифовании характеризуется высокой силовой и тепловой напряженностью процесса и экстремально высокими деформациями в зоне контакта «зерно – материал» [4; 12]. Это, а также ряд других факторов дает возможность описать технологические характеристики современного высокоскоростного шлифования следующим образом:

1. Повышается производительность. Удельный съем достигает $2000 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$ [2; 15].

2. Растет динамическая износостойкость зерен и стойкость круга в целом. Сравнивая стойкости кругов, работающих при 200 и 80 м/с, авторы работы [16] получили двукратное увеличение стойкости при фиксированной силе резания и увеличение стойкости в 7,8 раза при фиксированной эффективности процесса.

3. Снижается толщина среза, пластическое вытеснение материала и шероховатость обработанной поверхности. Шлифовальная стружка образуется в условиях

экстремально сложного напряженно-деформированного состояния, что изменяет процесс «выноса» стружки из зоны обработки.

4. Снижаются силы шлифования и повышается точность. При фиксированной глубине резания силы уменьшаются вдвое, если сравнивать скорости 250 и 180 м/с [4; 16].

5. Тепловой поток в деталь уменьшается, что снижает температуры и улучшает качество обработанной поверхности. Так, при скорости 200 м/с при шлифовании закаленных сталей (HRC 60...65) кругами CNB глубина измененного слоя составляет 10 мкм [11; 17; 18].

Исследователи настоятельно рекомендуют использовать CNB-круги на керамических пористых связках (PSD) [11; 14; 16]. Связки PSD, получаемые методом холодного прессования, используются при создании кругов с микронными размерами зерен с целью обеспечения наноточности обработки. Круги с такими связками показывают удовлетворительные результаты при скоростях 200 м/с и выше [14].

3. Разновидности технологий и методов скоростного/сверхскоростного шлифования. Метод HEDG – глубинно-скоростного шлифования с увеличенной скоростью подачи – начал развиваться, главным образом, в Германии и Китае в середине 1980-х – начале 1990-х годов [11]. Фирмами *Blohm, Ewag, Magerle, Schaudt* и др., входящими в концерн *Schleifring Group* (Германия) [19], а также другими производителями были созданы станки, позволяющие вести обработку со скоростями 100...300 м/с, с глубиной резания от 0,01 до 30 мм и с подачей от 0,5 до 200 м/мин применительно к HEDG и HSSG (*High-Speed-Stroke Grinding*) [11; 15; 16; 19; 20]. По данным [11], съем материала по сравнению с традиционным шлифованием возрос от 100 до 1000 раз при высоком качестве обработки (табл. 3).

Применение полностью автоматических станков, управляемых компьютерами (CNC), оснащенных суперскоростными CNB-кругами, широко применяется в автомобильной, авиакосмической, химической и др. отраслях с режимами, представленными в табл. 3. Профессора *S. Wang* и *C.H. Li* (Китай) [11] приводят весьма интересные данные производственных испытаний, проведенных в Японии в 2003–2004 гг. На суперскоростном круглошлифовальном CNC-станке производства *Toyota Industrial Machining OMIC* шлифовали распределительный вал автомобиля *Toyota* из высокопрочного чугуна. Был достигнут удельный съем $174 \text{ мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$ и коэффициент шлифования 33500. Требуемое качество поверхностей (шероховатость, точность и т. д.) было получено за один установ. В Германии в 2004 г. в производственных условиях обрабатывали шпиндель токарного станка на CNC-оборудовании фирмы *Gühring*

Таблица 3. Сравнение параметров различных видов обычного, силового (CFG), скоростного (HSG) и глубинно-сверхскоростного (HEDG) шлифования

Параметры	Обычное шлифование	HSG	CFG	HEDG
Глубина резания (мм)	0,001...0,05	0,003...0,05	0,1...30	0,1...30
Скорость перемещения детали (м/мин)	1...30	1...10	0,05...0,5	0,5...10
Скорость круга (м/с)	20...60	100...200	20...60	80...260
Удельный съем $\text{мм}^3/\text{мм} \cdot \text{с}$	0,1...10	0,1...60	0,1...10	50...2000

Automation (Германия). Требуемый результат был достигнут за один установ, при этом скорость съема составляла 2 кг материала в минуту, что, несомненно, является серьезным достижением немецкой промышленности и науки.

В 1994 г. в Германии были проведены первые опыты комбинирования трех передовых технологий: управляемых компьютерами CNC станков-автоматов, боразоновых CNB-кругов и HEDG технологий [11]. Комбинированный процесс получил название *Quick-Point Grinding* (QPG) (точечное скоростное шлифование) и используется при круглом шлифовании валов и дисков (рис. 1).

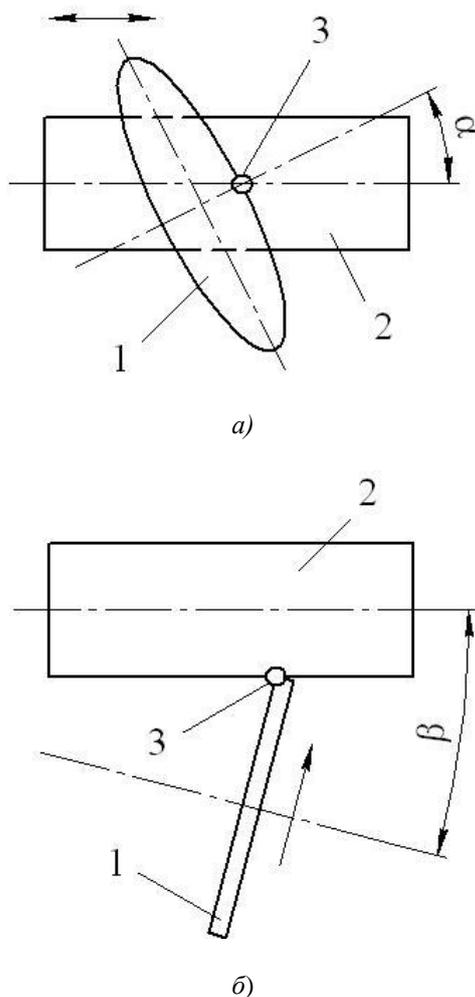


Рис. 1. Схема QPG в вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостях [21]:
1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка;
3 – точка контакта

Как следует из рис. 1, при QPG ось круга повернута по отношению к оси вращения заготовки таким образом, что формируется малый, «точечный» контакт круга с заготовкой. В работах [21–23] показано, что схема QPG весьма гибкая (за счет управления углами наклона круга α и β и размерами площадки контакта «круг – заготовка»), производительная и позволяет добиться высокой стойкости круга [20; 21] при снижении стоимости операции.

В Германии и США станкостроительной компанией *Erwin Junker Machining, Inc* налажено промышленное производство скоростного и сверхскоростного оборудования, работающего по системе QPG. Известны и другие производители [2]. Станки *EJM* предназначены, главным образом, для автомобильной, авиационной и станкостроительной промышленности, а сам метод имеет широкие возможности для дальнейшего развития. Исследования продолжаются в США, Германии и, главным образом, в Китае, в первую очередь в Северо-Восточном Университете [20].

Хотелось бы обратить внимание на некоторые производственные результаты применения метода *Quick-Point Grinding*. Группа «Фольксваген-Китай» обрабатывает распределительные валы автомобилей кругами CNB. Применяются многокруговые CNC-станки различных немецких фирм. Каждый кулачок обрабатывается отдельным кругом. Частота вращения шпинделя 4300...4500 об./мин, при этом стойкость кругов между правками составляет 3000 деталей [11].

4. Комбинации различных видов скоростного шлифования с целью дальнейшего повышения эффективности процесса. Наряду с совершенствованием оборудования и исследованиями в области «интеллектуального» шлифования в последние несколько лет осуществлялись неоднократные попытки совместить различные виды скоростного шлифования [2; 4].

К числу наиболее успешных необходимо отнести работы, выполняемые совместно Университетом Беркли и лабораторией станков и производственной инженерии Рейнско-Вестфальского технического университета. Профессора *B. Linke* и *D. Dornfeld* (США), *F. Klocke* и *M. Duscha* (Германия) на протяжении 4–5 лет ведут работы по комбинированию SSG со скоростным и высокоскоростным шлифованием [24–26]. Новый процесс – *High-Speed-Stroke-Grinding* (HSSG) (высокоскоростное быстроходное шлифование) находится на пути внедрения в производство, хотя ожидать немедленных результатов не приходится.

Гамма плоскошлифовальных CNC-станков, предназначенных для работы методами HSSG, уже существует и выпускается, главным образом, предприятиями Германии и Швейцарии [19]. Исследования проводились на CNC немецком плоскошлифовальном станке *Blohm Profimat MT 408 HTS*, который, кроме основных задач, через свою компьютерную систему моделирует процесс и последующее функционирование оборудования в целом. Предварительно и параллельно с исследованиями на станке проводилась компьютерная симуляция процесса методами FEM (конечных элементов). В частности, при решении температурных задач моделировались и симулировались в 3D различные варианты движущихся источников тепла [26].

В экспериментах применялись круги CNB на керамических связках диаметром 400 мм от различных изготовителей, включая *Tyrolit* – самого крупного производителя абразивно-алмазного инструмента в Европе. Скорость круга в экспериментах составляла 80...160 м/с, продольная подача варьировалась от 10 до 180 м/мин при ускорении стола до 50 м/с². Испытания проводились при высоком удельном съеме 40 мм³/мм·с, что при увеличении скорости стола приводило к снижению и без того низкой глубины правки и к увеличению

стойкости круга. Кроме того, удельная энергия шлифования уменьшалась с ростом скорости стола и его ускорения до 16 Дж/мм^3 , что определяет эффективность процесса в целом и снижение сил и контактных температур в частности.

Увеличение скорости круга тоже благоприятно сказывается на удельной энергии шлифования, однако положительный эффект снижается с увеличением скорости стола V_w . Другими словами, скорость круга V_s оказывает значительное влияние на энергию при малых значениях V_w . Толщина среза остается постоянной при неизменном соотношении V_s/V_w . При методе HSSG удельный сьем может увеличиваться без увеличения толщины среза и сил резания и без повреждения структуры поверхностного слоя обрабатываемого материала. Вместе с тем относительно высокая стоимость оборудования и инструмента пока является препятствием для широкого внедрения метода HSSG в производство. Подробности представленных исследований доступны в Интернете.

Начиная с 2004 г. в Национальной Академии Обороны Японии разрабатываются и исследуются комбинированные методы скоростного шлифования *Speed-Stroke Grinding* (SSG) и *Creep-Feed Grinding* (CFG) [27] (глубинно-быстроходное шлифование). Не рассматривая этот метод в подробностях по соображениям объема обзора, отметим, что скорость стола в исследованиях варьировалась от 1 до 100 м/мин при ускорении $19,6 \text{ м/с}^2$. Фиксированный удельный сьем составлял $100 \text{ мм}^3/\text{мм}\cdot\text{с}$. Обрабатывали заготовку из боразона диаметром 200 мм со скоростью $V_s=200 \text{ м/с}$. Плоскошлифовальный станок, оснащенный линейным электродвигателем, позволял при необходимости достигать скорости $V_w=110 \text{ м/мин}$ при ускорении до 25 м/с^2 .

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СКОРОСТНОГО И УЛЬТРА-СВЕРХСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Вопросы выбора оборудования и оснастки для скоростных станков, их компьютеризация и т. д. были затронуты нами в [1]. Важно отметить, что требования к станкам для скоростного, высокоскоростного и ультраскоростного шлифования подробно изложены в классических монографиях и работах С. Малкина [14], Б. Роу [3; 4], И. Маринеску и И. Инасаки [2], Г. Сачсела [28], Д. Узбстера и М. Трикарда [3] и ряде других работ.

В рамках настоящего обзора будет дано весьма краткое описание некоторых особенностей станков и инструментов, применяемых при новых и комбинированных методах скоростного шлифования.

По нашему мнению, наилучших результатов в создании оборудования для скоростного, ультраскоростного и других комбинированных видов скоростного шлифования добились станкостроительные предприятия Германии и Швейцарии [19]. Большинство исследований, проводимых в Китае, Японии, США и Германии, выполнялось на станках, произведенных в этих странах. Еще в 2005 г. было налажено производство специальных сверхскоростных CNC-станков фирмами, входящими в немецкий концерн *Schleifring Group*, которые уже упоминались выше. Продолжает работать американско-германская *EGM* и другие станкостроительные

компании. На конференции «Швейцарская точность» [19] профессор К. Зеппенфелд констатировал возрождающийся в мировом станкостроении интерес к надежным технологиям высокоскоростного шлифования, генерирующим «толстую и короткую стружку». На уже имеющейся базе возможно и необходимо «понижить температурные компоненты напряжений и внутренние напряжения в заготовке». Решение задачи состоит в применении имеющегося и создании нового оборудования для глубинно-сверхскоростного шлифования (HEDG) и совмещения процессов точения и скоростного шлифования в единый процесс. Такие токарно-шлифовальные станки появились в Германии, в частности, CNC-станок *Studer S242*, совмещающий суперскоростное шлифование с силовым точением торцевых и цилиндрических поверхностей. Возможность замены некоторых операций шлифования процессами точения отмечали Маринеску, Роу и Инасаки [2], правда, исходя из других соображений.

К началу XXI века боразоновые инструменты, предназначенные для работы со скоростями 140...220 м/с, прошли первоначальную стадию исследований и в настоящее время широко применяются в инженерной практике [2; 3; 11; 28]. Дальнейшее увеличение скорости кругов приводит к необходимости решения множества технических и технологических проблем. Здесь целесообразно упомянуть профессоров Университета Мияги (Япония) *N. Funayama* и *J. Matsuda*, которыми исследованы и рекомендованы к применению новые корпуса кругов для ультраскоростного шлифования, изготовленные из усиленного углеводородного волокна CFRP [4; 29]. CNB сверхскоростные круги с CFRP-корпусами имеют меньший вес в сравнении с металлическими за счет меньшей плотности углеродного волокна при примерно равной прочности. Формы скоростных кругов, специальные планшайбы и другие относящиеся к предмету обсуждения вопросы были подробно представлены в обзоре [1] и работах [2–4; 14] и др.

Проблемы с оборудованием и инструментами для сверхскоростного шлифования стали возникать лавинообразно в последние несколько лет. Применение комбинированных методов и сверх(ультра)скоростного шлифования (HSSG и UHSG) потребовало новых, революционных решений. Если 10 лет назад при скорости 350...400 м/с (скорости испытаний CNB-кругов на прочность перед установкой на станок) иногда наступало разрушение инструментов [2; 4], то в настоящее время эти скорости могут являться рабочими. И если проблемы с оборудованием благодаря усилиям немецких и швейцарских станкостроительных компаний более или менее разрешаются [3; 19], то задача создания соответствующих кругов еще не решена до такой степени, чтобы начинать использование UHSG в промышленности.

Экспериментальные круги, корпус которых изготавливается из γ -титано-алюмидов [2; 3; 19] зачастую с добавлением других металлов и керамики, и специальные сверхскоростные сегментные круги уже существуют [2–4]. Однако их стоимость, как и стоимость оборудования, компьютерных программ и т. д., пока позволяет вести только комплексные лабораторные исследования в университетах и исследовательских подразделениях компаний-производителей станков и инструментов. Процессы UHSG исследуются, по нашим оценкам,

в основном, в Китае [30; 31] и Германии, в меньшей степени в Японии и США.

Количество опубликованных в США и Англии китайских работ по тематике ультраскоростного шлифования не поддается никакому исчислению и даже в малейшей степени не представлено в списке литературы к данному обзору. Этому феномену, на наш взгляд, есть экономическое объяснение. В промышленности Китая доля шлифовальных операций составляет всего 13 % [11]. С другой стороны, в одном из последних выпусков Трудов Национальной Академии Наук США (PNAS) прямо утверждается, что «США скоро могут потерять лидерство в научных исследованиях, что приведет к серьезным экономическим последствиям». Статистические данные говорят о том, что заработные платы инженеров, университетских магистров и профессоров в технических науках в Китае на 25–30 % выше соответствующих зарплат в США (данные PNAS). Кроме того, количество диссертаций в инженерных областях, защищаемых китайскими исследователями в университетах США, существенно превосходит число американских. Одним из ведущих мировых центров по изучению UHSG-процессов является Университет авионики и аэронавтики в г. Нанкине (Китай), входящий в число ведущих мировых вузов по различным рейтингам.

Возвращаясь к обсуждению вопросов, связанных с оборудованием для скоростного и ультраскоростного шлифования, заметим, что титано-алюминиевые круги, о которых шла речь выше, представляют собой, во-первых, довольно сложную конструкцию, а во-вторых, очень трудно поддаются механической обработке, в том числе шлифованию [11; 31]. Корпуса кругов должны быть равнопрочными, легкими (а γ -титано-алюминиевые сплавы – одни из самых легких материалов, применяемых в аэрокосмической промышленности), с минимально возможным числом отверстий и фланцев. Поперечное сечение корпуса UHSG-круга напоминает сечение лопатки авиационной турбины [2; 11]. Иногда применяют дополнительные стальные фланцы, однако вследствие недостаточной изученности процесса зачастую достигается результат, противоположный ожидаемому.

Изотропия материала должна быть почти полной, хотя любому инженеру-механику понятно, что этого добиться практически невозможно, особенно если в составе материала присутствуют керамические включения, позволяющие назвать материал композиционным. Справедливости ради надо отметить, что пока чаще всего используются легкие высокопрочные алюминиевые сплавы без включений. Исследованиями [2; 4; 32] и др. установлено, что 1 % анизотропии материала корпуса может привести к *regenerative chatter* (автоколебаниям с увеличивающейся амплитудой) и многим другим проблемам, вплоть до разрыва круга. Кроме того, корпуса кругов для UHSG имеют повышенный коэффициент объемного термического расширения, что создает проблемы в достижении точности и стабильности процесса в целом.

До настоящего времени каких-то других научно достоверных результатов либо не получено, либо они нам неизвестны. Излишне говорить, что стоимость UHSG-инструментов чрезвычайно высока, однако результаты исследований весьма многообещающи, так

что в перспективе нас, по-видимому, ожидает следующий скачок в развитии теории и практики ультраскоростного шлифования в частности и процессов шлифования вообще.

Высокоскоростные алмазные круги, производимые на заводах *Saint-Gobian Abrasives*, *3M*, *Tyrolit* и др., находят применение в некоторых областях промышленности. Но масштабы их применения не идут ни в какое сравнение с масштабами использования боразоновых кругов. Так, скоростные алмазные круги очень эффективны, а порой незаменимы при обработке жидкокристаллических дисплеев (LCD) и автомобильных стекол [2; 11]. Предельные скорости при алмазном шлифовании ограничиваются 80 м/с, что связано с низкой теплостойкостью алмазов [2; 4; 11].

Скоростные абразивные круги, оснащенные зернами SG, TG и TG2, в последние годы стали привлекать повышенное внимание [2; 4; 11]. Работая в режиме самозатачивания, приближаясь по своим режущим свойствам к боразону, имея при этом относительно низкую стоимость, SG-круги начинают составлять конкуренцию CNB-кругам в некоторых практических приложениях. Экспериментами установлено, что существует возможность работы такими кругами со скоростью 125 м/с при удельном съеме 100 мм³/мм·с [2; 11]. Для коммерческого использования скоростных SG-кругов требуются дополнительные исследования.

В завершение мы не можем не отметить имена ряда крупных исследователей процессов скоростного шлифования, к сожалению, ушедших из жизни. Это С. Малкин (S. Malkin) и М. Шоу (M.C. Shaw) (США), В. Кениг (W. König) и Г. Опитц (H. Opitz) (Германия), К. Окамура (K. Okamura) и К. Сато (K. Sato) (Япония), С.Н. Корчак, В.И. Пилинский, Л.Н. Филимонов и П.И. Ящерицын (СССР). Совсем недавно к этому скорбному списку добавилась фамилия профессора Тольяттинского государственного университета В.И. Малышева. Без фундаментальных работ этих и многих других ученых сегодняшние впечатляющие достижения в области скоростного шлифования не были бы возможны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилинский А. Современные тенденции применения и развития процессов шлифования в США // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 4. С. 94–103.
2. Handbook of Machining with Grinding Wheels / J. Marinescu [et al.]. New York: CRC Press Taylor and Francis Group, 2007. 596 p.
3. Webster J., Tricard M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding // CIRP Ann.-Manuf. Techn. 2003. Vol. 53. Issue 2. P. 597–617.
4. Roquefeuil F. ABRAL: A New Electrofused ALON Grain for Precision Grinding // Proc. Conf. "Precision Grinding & Finishing in the Global Economy". Gorham, 2001. P. 99–101.
5. Superabrasive boride and a method of preparing the same by mechanical alloying and hot pressing : Patent 6099605 USA / B.A. Cook [et al.] : appl. 07.06.1999 ; patented 08.08.2000.
6. Aluminum-boron-carbon abrasive article and method to form said article : Patent 6042627 USA / A.J. Pyzik [et al.] : appl. 29.04.1998 ; patented 28.03.2000.

7. Hard carbon nitride and method for preparing same : Patent 5110679 USA / E.E.Haller [et al.] : appl. 24.04.1990 ; patented 05.05.1992.
8. Rowe W.B. Principles of Modern Grinding Technology. USA: William Andrew, 2009. 300 p.
9. Gibree P. Three Faces of Creep-Feed Grinding. Worcester: Abrasive Marketing Group, Norton, 1995. 4 p.
10. Inasaki I. Speed-Stroke Grinding of Advanced Ceramics // Annals of CIRP. 1988. Vol. 37/1. P. 299–302.
11. Wang S., Li C.H. Application and Development of High-efficiency Abrasive Process // International Journal of Advanced Science and Technology. 2012. Vol. 47. P. 51–64.
12. Tonschoff H.K., Karpuschewski B., Mandrisch T. Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities // Ann. CIRP. 1998. Vol. 47. № 2. P. 651–668.
13. Olivera J.F.G., Silva E.J., Guo G., Hashimoto F. Industrial Challenges in Grinding // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2009. Vol. 58. P. 663–680.
14. Malkin S., Guo Ch. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. New York : Industrial Press, 2008. 372 p.
15. Huang H., Liu T.C. Experimental Investigation of Machining Characteristics and Removal Mechanisms of Advanced Ceramics in High Speed Deep Grinding // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. Vol. 43. № 8. P. 811–823.
16. High-Speed Grinding Fundamentals and State of Art in Europe, Japan and USA / F. Klocke [et al.] // Annals of CIRP. 1997. Vol. 46. № 2. P. 715–720.
17. Hwang T.W., Evans C.J., Malkin S. An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels // Annals of the CIRP. 1997. Vol. 49. № 1. P. 245–248.
18. Yui A., Lee H.S. Surface Grinding with Ultra High Speed CBN Wheels // Journal of Material Processing Technology. 1996. Vol. 62. № 9. P. 393–396.
19. Richter A. Swiss Precision // Cutting Tool Engineering Magazine. 2005. Vol. 57. № 5. P. 21–22.
20. Chinese Machine Tool and Tools Association Review of Abrasive and Abrasive Tools at CIMT 2001 // World Manufacturing Engineering and Market. 2001. Vol. 4. P. 24–27.
21. Study of Effect of Grinding Speed on Finish and Precision Machining in Quick-Point Grinding / S. Xio [et al.] // Key Engineering Materials. 2008. Vol. 364–366. P. 696–700.
22. Changming Z., Wanju L. CNC Quick-Point Grinding Process and its Application // Manufacturing Technology & Machine Tool. 2004. Vol. 7. P. 67–68.
23. Theoretical Model of Grinding Force in Quick-Point Grinding / J. Qiu [et al.] // Material Science Forum. 2009. Vol. 626–627. P. 75–80.
24. Linke B., Duscha M., Klocke F., Dornfeld D. Combination of Speed-Stroke Grinding and High Speed Grinding with Regard to Sustainability. URL: escholarship.org/uc/item/5qs5k8pv (дата обращения 20.02.2015).
25. Duscha M., Klocke F., Linke B., Dornfeld D. Higher Competitiveness of Speed-Stroke Grinding Using Increased Wheel Speeds // Proceeding of the ASME. International Manufacturing Science and Engineering Conference, Notre Dame, Indiana (USA). Indiana, 2012. P. 7–14.
26. Linke B., Duscha M., Vu A.T., Klocke F. FEM-based Simulation of Temperature in Speed-Stroke Grinding with 3D Transient Moving Heat Sources // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 223. P. 733–742.
27. Yui A., Okuyama S., Kitajima T. Performance of Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate // Key Engineering Materials. 2004. Vol. 257–258. P. 69–74.
28. Sachsel H.G. Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi-Superabrasive and Superabrasive. USA: Xlibris Corp, 2010. 680 p.
29. Funayama N., Matsuda J. Development of High-Performance cBN and Diamond Grinding Wheels for High-Speed Grinding // New Diamond and Frontier Carbon Technology. 2005. Vol. 15. № 4. P. 173–180.
30. Chen J., Fang Q, Zhang L. Investigations on Distribution and Scatter of Surface Residual Stress in Ultra-High Speed Grinding // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 75. P. 615–627.
31. Ultra-High-Speed Grinding. Theoretical Basis and Development in Grinding Machine Tool / L. Yang [et al.] // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 589–590. P. 293–298.
32. Ultra-High-Speed Grinding with cBN Wheel for Mirror-Like Surface Finish / M. Ota [et al.] // Key Engineering Materials. 2005. Vol. 291–292. P. 67–72.

REFERENCES

1. Pilinsky A. Modern tendencies of applications and developing of grinding processes in the USA. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 94–103.
2. Marinescu J. et al. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Press Taylor and Francis Group, 2007, 596 p.
3. Webster J., Tricard M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. *CIRP Ann.-Manuf. Techn*, 2003, vol. 53, issue 2, pp. 597–617.
4. Roquefeuil F. ABRAL: A New Electrofused ALON Grain for Precision Grinding. *Proc. Conf. "Precision Grinding & Finishing in the Global Economy"*. Gorham, 2001, pp. 99–101.
5. *Superabrasive boride and a method of preparing the same by mechanical alloying and hot pressing*. Patent 6099605 USA / B.A. Cook [et al.], appl. 07.06.1999, patented 08.08.2000.
6. *Aluminum-boron-carbon abrasive article and method to form said article*. Patent 6042627 USA / A.J. Pyzik [et al.], appl. 29.04.1998, patented 28.03.2000.
7. *Hard carbon nitride and method for preparing same*. Patent 5110679 USA / E.E.Haller [et al.], appl. 24.04.1990, patented 05.05.1992.
8. Rowe W.B. *Principles of Modern Grinding Technology*. William Andrew, 2009, 300 p.
9. Gibree P. *Three Faces of Creep-Feed Grinding*. Worcester, Abrasive Marketing Group, Norton, 1995, 4 p.
10. Inasaki I. Speed-Stroke Grinding of Advanced Ceramics. *Annals of CIRP*, 1988, vol. 37/1, pp. 299–302.
11. Wang S., Li C.H. Application and Development of High-efficiency Abrasive Process. *International Journal*

- of *Advanced Science and Technology*, 2012, vol. 47, pp. 51–64.
12. Tonschoff H.K., Karpuschewski B., Mandrisc T. Grinding Process Achievements and their Consequences on Machine Tools Challenges and Opportunities. *Ann. CIRP*, 1998, vol. 47, no. 2, pp. 651–668.
 13. Olivera J.F.G., Silva E.J., Guo G., Hashimoto F. Industrial Challenges in Grinding. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, vol. 58, pp. 663–680.
 14. Malkin S., Guo Ch. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Industrial Press, 2008, 372 p.
 15. Huang H., Liu T.C. Experimental Investigation of Machining Characteristics and Removal Mechanisms of Advanced Ceramics in High Speed Deep Grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 8, pp. 811–823.
 16. Klocke F. et al. High-Speed Grinding Fundamentals and State of Art in Europe, Japan and USA. *Annals of CIRP*, 1997, vol. 46, no. 2, pp. 715–720.
 17. Hwang T.W., Evans C.J., Malkin S. An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels. *Annals of the CIRP*, 1997, vol. 49, no. 1, pp. 245–248.
 18. Yui A., Lee H.S. Surface Grinding with Ultra High Speed CBN Wheels. *Journal of Material Processing Technology*, 1996, vol. 62, no. 9, pp. 393–396.
 19. Richter A. Swiss Precision. *Cutting Tool Engineering Magazine*, 2005, vol. 57, no. 5, pp. 21–22.
 20. Chinese Machine Tool and Tools Association Review of Abrasive and Abrasive Tools at CIMT 2001. *World Manufacturing Engineering and Market*, 2001, vol. 4, pp. 24–27.
 21. Xio S. et al. Study of Effect of Grinding Speed on Finish and Precision Machining in Quick-Point Grinding. *Key Engineering Materials*, 2008, vol. 364–366, pp. 696–700.
 22. Changming Z., Wanju L. CNC Quick-Point Grinding Process and its Application. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2004, vol. 7, pp. 67–68.
 23. Qiu J. et al. Theoretical Model of Grinding Force in Quick-Point Grinding. *Material Science Forum*, 2009, vol. 626–627, pp. 75–80.
 24. Linke B., Duscha M., Klocke F., Dornfeld D. *Combination of Speed-Stroke Grinding and High Speed Grinding with Regard to Sustainability*. URL: escholarship.org/uc/item/5qs5k8pv (дата обращения 20.02.2015).
 25. Duscha M., Klocke F., Linke B., Dornfeld D. Higher Competitiveness of Speed-Stroke Grinding Using Increased Wheel Speeds. *Proceeding of the ASME. International Manufacturing Science and Engineering Conference, Notre Dame, Indiana (USA)*. Indiana, 2012, pp. 7–14.
 26. Linke B., Duscha M., Vu A.T., Klocke F. FEM-based Simulation of Temperature in Speed-Stroke Grinding with 3D Transient Moving Heat Sources. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 223, p. 733–742.
 27. Yui A., Okuyama S., Kitajima T. Performance of Speed-Stroke and Creep-Feed Grinding under Constant Removal Rate. *Key Engineering Materials*, 2004, vol. 257–258, pp. 69–74.
 28. Sachsel H.G. *Precision Abrasive Grinding in the 21st Century: Conventional, Ceramic, Semi-Superabrasive and Superabrasive*. Xlibris Corp, 2010, 680 p.
 29. Funayama N., Matsuda J. Development of High-Performance cBN and Diamond Grinding Wheels for High-Speed Grinding. *New Diamond and Frontier Carbon Technology*, 2005, vol. 15, no. 4, pp. 173–180.
 30. Chen J., Fang Q, Zhang L. Investigations on Distribution and Scatter of Surface Residual Stress in Ultra-High Speed Grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 615–627.
 31. Yang L. et al. Ultra-High-Speed Grinding. Theoretical Basis and Development in Grinding Machine Tool. *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 589–590, pp. 293–298.
 32. Ota M., Nakayama T., Takashima T., Watanabe H. Ultra-High-Speed Grinding with CNB Wheel for Mirror-Like Surface Finish. *Key Engineering Materials*, 2005, vol. 291–292, pp. 67–72.

**INNOVATIVE METHODS AND CHALLENGES IN HIGH SPEED
AND ULTRA-HIGH-SPEED GRINDING**

© 2015

A.V. Pilinsky, Master of Science in Mechanical Engineering
Raymer Metals, Inc., Los Angeles (USA)

Keywords: superabrasive materials; creep-feed grinding; high-speed grinding; ultra-high-speed grinding; combined methods of the super-high speed grinding.

Abstract: The review describes latest innovation results and achievements in the field of grinding. Special attention has been paid to new innovative grinding tools such as wheels with minimum quantity of bonds (MQB) having very high porosity and extremely light weight. Perspectives were discussed for making new superabrasive tools with cutting points which have very high strength reaching the strength of synthetic diamonds or even exceeding that.

Special attention has been paid for advanced methods of Creep-Feed Deep Grinding, High-Speed Grinding and Ultra-High-Speed Grinding. Up-to-date combined methods of Super-High Grinding such as Speed-Stroke Grinding, High-Speed-Stroke Grinding, Quick-Point Grinding, and High-Efficiency Deep Grinding and others have been presented and discussed. The most of above mentioned methods are being currently investigated in China, the United States, Japan, Germany and other European countries.

The work discusses requirements to new kinds of equipment and grinding tools for the combined high-speed grinding and ultra-high-speed grinding methods. The new possibilities and areas of application of the High-Speed Diamond Grinding and MQB tools have been also shown. MQB tools are equipped with extruded grits having 4:1 and 8:1 ratio of length to diameter are manufactured by *Saint-Gobian Abrasives*(USA, France), which is the biggest producer of abrasive and diamond tools in the world.

The article presents practical results of manufacturing experience of China, USA, Germany and Japan in different methods of Super-High and combined methods of grinding.

The list of references includes the works in the field of High-Speed Grinding and other grinding phenomena published by the most prominent and famous researchers in the World.

М.В. Позднов, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Промышленная электроника»

А.В. Прядилов, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Промышленная электроника»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: ограничитель напряжения; импульсный преобразователь; полупроводниковый преобразователь; перенапряжение на транзисторе; коммутационные процессы.

Аннотация: Объектом исследования является защитный ограничитель, применяемый в повышающем импульсном преобразователе постоянного напряжения (ИППН). Цель работы заключается в обосновании выбора ограничителей, необходимых для ограничения коммутационных перенапряжений в силовых транзисторах на безопасном уровне, при заданных параметрах работы схемы. В статье рассмотрена актуальность применения импульсных схем питания в современных технологиях при различных типах нагрузки. На примере импульсного преобразователя постоянного напряжения показана схема замещения, показывающая, что выключение транзистора сопровождается перенапряжением. Для ограничения перенапряжения предлагается использовать ограничитель напряжения. С целью рационального выбора ограничителя предлагается рассмотреть коммутационные процессы при выключении транзистора. Анализ процессов коммутации проводится на основе допущений, часто используемых при анализе импульсных процессов импульсных преобразователей напряжения. Приведена временная диаграмма, поясняющая работу схемы. Анализ процессов коммутации сопровождается выводом аналитических соотношений, отражающих основные параметры коммутации: уровень перенапряжений, время коммутации, энергию, выделяемую в ограничителе за один период, и среднюю мощность потерь в ограничителе. Введено понятие относительного перенапряжения, используемое для выбора ограничителя и силового транзистора. Рассматриваются примеры выпускаемых промышленностью элементов, которые могут выполнять функции ограничителей. Проводится анализ параметров ограничителей, выпускаемых различными производителями. По выведенным аналитическим соотношениям и исходя из анализа параметров, предоставляемых производителями ограничителей, приведены рекомендации и оценочная методика по выбору ограничителей для схем питания. Областью применения данной работы являются схемы с транзисторами, работающими в ключевых режимах, такие как схемы ИППН.

ВВЕДЕНИЕ

В современной технике для реализации различных электротехнологий широко используются импульсные схемы питания. К типичным нагрузкам этих схем стоит отнести электромеханические устройства в виброимпульсных технологиях [1–9], индукторы в индукционном нагреве [10], электрическую дугу в технологиях сварки [11], емкостные накопители энергии [12]. Иногда и сами вышеперечисленные системы могут являться нагрузкой для импульсных схем компенсаторов [13; 14]. Применение в схемах питания мощных транзисторных ключей дает несомненное преимущество перед использованием силовых тиристорных, которое заключается в организации полностью управляемой коммутации ключей при простой схеме управления, что позволяет гибко управлять параметрами питания нагрузки.

Работа импульсных схем питания сопровождается чередованием режимов протекания и отсутствия токов в цепях транзисторов. Цепь транзистора имеет паразитную индуктивности L_p выводов и подводящих проводников. Разрыв тока в ней сопровождается появлением ЭДС на этих индуктивностях, что сопровождается перенапряжениями на выводах транзистора и может послужить причиной его пробоя. Для борьбы с этими явлениями используют демпфирующие цепочки или специальные быстродействующие ограничители напряжения [15–18]. Эти устройства позволяют рассеивать на себе энергию, накапливающуюся в паразитных индуктивностях, и обеспечивать уменьшение перенапряжений на силовой цепи транзистора.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим способ уменьшения перенапряжений с использованием ограничителя напряжения RU (рис. 1), установленного параллельно силовому транзистору VT в схеме импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИППН).

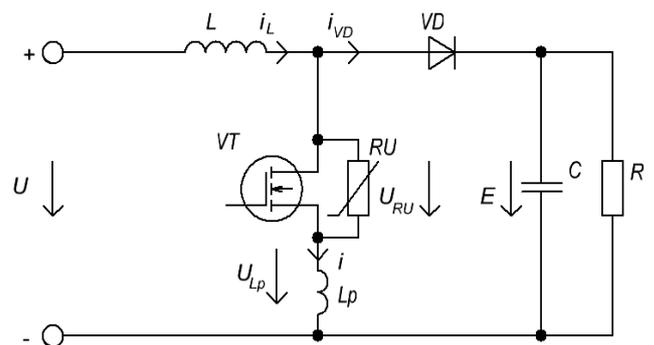


Рис. 1. Повышающий ИППН
с ограничителем перенапряжения RU

Существуют и другие схемотехнические решения ограничения напряжения, например, R - C - VD цепи, а также целый класс схем с активными цепями демпфирования напряжения, которые не рассеивают энергию, накапливаемую из паразитных индуктивностей,

а рекуперировать ее в источник или нагрузку. Эти схемы достаточно сложны и не будут рассматриваться в данной статье. Возникает вопрос об оценке параметров ограничителей и их рационального выбора как защитного элемента. Для этого необходимо проанализировать электрические процессы, происходящие в схеме с ограничителем на интервале коммутации.

Для дальнейшего анализа примем некоторые допущения: коммутация транзистора VT происходит мгновенно; напряжение E на нагрузке и ток $i_L=I_0$ через дроссель L за время коммутации неизменны; напряжение на ограничителе на интервалах коммутации неизменно $U_{RU}=U_{ogr}=\text{const}$, где напряжение U_{ogr} является справочным параметром ограничителя.

Рассмотрим принцип работы указанной демпфирующей цепочки. В момент (рис. 2) выключения транзистора $t=0$ ток индуктивности $i_L=I_0$, такой же ток протекает и в цепи паразитной индуктивности L_p $i=I_0$.

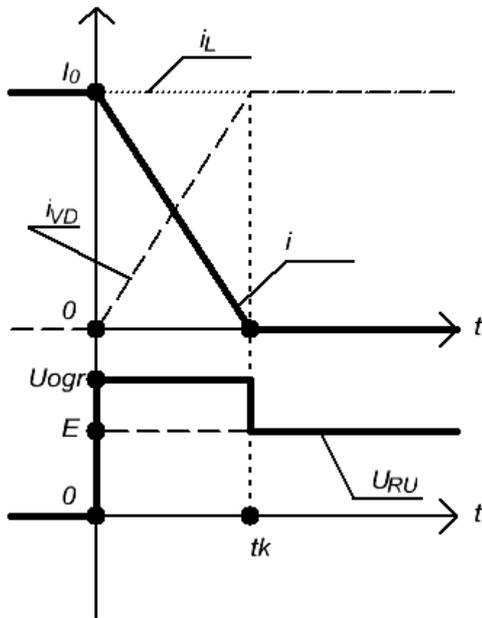


Рис. 2. Диаграммы работы повышающего ИППН с ограничителем перенапряжения RU

Наличие в цепи коммутации индуктивности L_p приводит к тому, что при резком выключении транзистора ток i не исчезнет, а перебросится из цепи транзистора VT в цепь ограничителя RU и вызовет скачкообразное увеличение напряжения на VT до уровня U_{ogr} . Напряжение на работающем ограничителе больше выходного $U_{ogr} > E$, поэтому диод VD открывается и по контуру $RU-VD-C-L_p$ к L_p начинает прикладываться отрицательное напряжение $U_{Lp}=E-U_{ogr}=\text{const}$. Это напряжение приводит к линейному снижению тока i до нуля в течение интервала времени $(0, t_k)$. Ток диода i_{VD} на интервале $(0, t_k)$, определяемый по первому закону Кирхгофа $i_{VD}=i_L-i=I_0-i$, линейно возрастает. После момента t_k $i=0$ через диод протекает ток дросселя $i_{VD}=i_L$, а напряжение на транзисторе скачком падает до уровня выходного E – коммутация закончена.

Для определения мощности, рассеиваемой в ограничителе, необходимо определить энергию, выделяемую в нем за один период работы ИППН.

На интервале коммутации $(0, t_k)$ ток и энергия в индуктивности L_p уменьшаются. На этом же интервале по второму закону Кирхгофа для контура $L_p-C-VD-RU$ можно записать:

$$L_p \frac{di}{dt} - E + U_{RU} = 0 \Rightarrow L_p \frac{di}{dt} = E - U_{RU}.$$

Поскольку на этапе коммутации $U_{RU}=U_{ogr}$, то

$$L_p \frac{di}{dt} = E - U_{ogr} = \text{const.} \quad (1)$$

Как видно из (1), $i(t)$ спадает по линейному закону, т. к. правая часть равенства отрицательна. Тогда в конечных приращениях тока $\Delta i = -I_0$ и времени $\Delta t = t_k$ согласно рис. 2 формула (1) будет:

$$L_p \frac{-I_0}{t_k} = E - U_{ogr} \Rightarrow t_k = L_p \frac{I_0}{U_{ogr} - E}. \quad (2)$$

Знак минус перед I_0 указывает на уменьшение тока i на этапе коммутации.

Энергия, выделяемая в ограничителе при протекании $i(t)$,

$$W_{ogr} = \int_0^{t_k} U_{RU}(t) i(t) dt = U_{ogr} \int_0^{t_k} i(t) dt. \quad (3)$$

В (3) на интервале интегрирования напряжение $U_{RU}(t) = U_{ogr}$.

Интеграл $\int_0^{t_k} i(t) dt$ равен площади под графиком линейной зависимости $i(t)$ на интервале $(0, t_k)$ (рис. 2):

$$\int_0^{t_k} i(t) dt = \frac{I_0 \cdot t_k}{2}. \quad (4)$$

Подставляем (2) в (4), а затем полученный интеграл в (3)

$$W_{ogr} = \frac{L_p I_0^2}{2} \frac{U_{ogr}}{U_{ogr} - E} = W_L \frac{U_{ogr}}{U_{ogr} - E}, \quad (5)$$

где $W_L = \frac{L_p I_0^2}{2}$ – энергия, накопленная в индуктивности L_p до коммутации.

Введем относительное перенапряжение U^* , разделив числитель и знаменатель на E .

$$W_{ogr} = W_L \frac{U^*}{U^* - 1} = W_L \left(1 + \frac{1}{U^* - 1} \right), \quad (6)$$

где $U^* = U_{ogr}/E$ – относительное перенапряжение на транзисторе.

Таким образом, энергия, выделяемая в ограничителе W_{ogr} , может быть в несколько раз больше, чем W_L .

При стремлении ограничить U_{ogr} на минимальном уровне ($U^* \rightarrow I$) время коммутации tk по (2) и энергия потерь W_{ogr} по (6) в ограничителе за коммутацию увеличиваются.

Средняя мощность потерь в ограничителе при описанных процессах

$$P = W_{ogr} f = W_L \frac{U^*}{U^* - 1} f, \quad (7)$$

где f – частота работы ИППН.

Функции ограничителей для полупроводниковых транзисторов могут выполнять варисторы или специальные полупроводниковые ограничители напряжения (TVS – transient voltage suppressor), к подобного рода элементам следует отнести варисторы фирмы EPCOS (тип siov) и ограничители фирм DC Components, Diodes Incorporated, Vishay (например, TVR, P4KE, SA, 3KP и т. д.) [19–21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При выборе ограничителей необходимо обращать внимание на: среднюю рассеиваемую мощность P_D прибора, которая должна быть больше рассчитанной средней мощности P по (7); рабочее напряжение, при котором прибор практически не потребляет мощности. Оно должно выбираться ближайшим к выходному E и должно быть немного больше, чем E ; реальное напряжение на ограничителе при его работе, которое можно определить по ВАХ при токе I_0 . Это напряжение должно быть меньше максимально допустимого напряжения на силовых выводах транзистора VT .

Указанные параметры не всегда представляются в файлах документации на сайтах продавцов электронных компонентов. В этих случаях полную информацию рекомендуется искать на сайтах производителей ограничителей.

Следует особо отметить, что классификационное напряжение, входящее в обозначение ограничителя и приводимое в документации (обычно для тока $I = I_{MA}$), выше рабочего напряжения на 10–30 %.

Например, у варистора $NVR 2075-D$: рабочее напряжение $U_{DC} = 615$ В, классификационное $U_{IMA} = 750$ В, а определяемое по ВАХ для $I_0 = 5$ А, $U_{ogr} \approx 1100$ В.

Таким образом, U_{IMA} отличается от U_{DC} на 22 %, напряжение U_{ogr} на транзисторе в этом примере в 1,8 раза превышает напряжение $E = U_{DC}$.

Аналогичное соотношение между рабочим и максимальным напряжением на ограничителе наблюдается и для других типов ограничителей. Для большинства ограничителей согласно документации значение отношения $U^* = U_{ogr}/U_{DC}$ лежит в пределах 1,6÷1,8. Соответственно, максимально допустимое напряжение на силовых выводах транзистора должно превышать выходное напряжение E не менее, чем в 1,6÷1,8 раза.

Анализируя (6), можно прийти к выводу, что на каждом периоде коммутации энергия, рассеиваемая ограничителем, в 2,3÷2,7 больше, чем накапливаемая в индуктивности Lp .

Следует отметить, что для увеличения U_{DC} и U_{ogr} ограничители можно соединять последовательно.

Таким образом, для оценочного выбора ограничителя рекомендуется воспользоваться следующей методикой:

1. Исходя из необходимого выходного напряжения E , по справочным данным подобрать ограничитель с U_{DC} немного большим, чем E .
2. Определить для ограничителя U_{ogr} .
3. Рассчитать $U^* = U_{ogr}/U_{DC}$ (будет примерно в диапазоне 1,6÷1,8).
4. Оценить по индуктивности Lp (которую необходимо рассчитать по формулам или получить в результате моделирования) и максимальному коммутируемому току I_0 максимальную энергию W_L , запасаемую в паразитных индуктивностях.
5. Используя соотношение (7), по известным величинам W_L , f , U^* рассчитать среднюю мощность P_D в ограничителе. Если полученное значение больше, чем у выбранного ограничителя, то необходимо взять более мощный типоразмер ограничителя с теми же параметрами U_{DC} и U_{ogr} .
6. По напряжению U_{ogr} подобрать транзистор, так чтобы максимально допустимое напряжение на силовых выводах было больше U_{ogr} на 20–40 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, ограничители напряжения являются устройствами, ограничивающими во время выключения напряжение на транзисторе, при этом энергия на этапе коммутации рассеивается в тепло. По сравнению с другими защитными цепями ограничитель содержит всего один элемент и потому является простым и надежным. Для выбора ограничителя рекомендуется придерживаться приведенной выше методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивашин В.В., Медведев В.А., Позднов М.В. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2177840 от 10.12.1999.
2. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний // Наука – производству. 2004. № 4. С. 46–47.
3. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Вибрационный источник крутильных колебаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 56–59.
4. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Наземный электромагнитный вибрационный сейсмоисточник : патент на изобретение № 2253136 от 25.02.2004.
5. Иванников Н.А., Ивашин В.В., Певчев В.П., Прядилов А.В. Импульсный электромагнитный источник сейсмических волн : патент на изобретение № 2466429 от 04.05.2011.
6. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные приводы для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 1. С. 72–75.
7. Ивашин В.В., Медведев В.А., Пчелкин Д.В. Электромагнитный привод резонансного вибратора : патент на изобретение № 2146412 от 05.01.1998.

8. Бар В.И., Ивашин В.В., Медведев В.А. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2160494 от 16.02.1999.
9. Ивашин В.В., Медведев В.А. Электромагнитный привод возвратно-поступательного движения : патент на изобретение № 2046540 от 22.04.1991.
10. Бар В.И., Медведев В.А., Макарычева О.А., Семочкина Н.Б. Электромагнитные и тепловые процессы в импульсных установках индукционного нагрева ферромагнитной стали : депонированная рукопись № 742-B2005 25.05.2005.
11. Чернявский Н.И., Казаков Ю.В. Генераторы импульсов тока для аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов // Сварка и диагностика. 2012. № 2 С. 45–49.
12. Кудинов А.К., Узбеков К.Х., Прядилов А.В. Мощный транзисторный преобразователь для заряда емкостного накопителя энергии // Наука – производство. 2004. № 4. С. 54–56.
13. Шевцов А.А., Глибин Е.С. Имитационное моделирование совместной работы статических компенсаторов и контактной сварочной машины // Электротехника. 2010. № 4. С. 34–38.
14. Глибин Е.С., Шевцов А.А. Моделирование функционирования компенсационных устройств совместно с контактными сварочными установками // Сварочное производство. 2009. № 5. С. 17–21.
15. Данилов В.С., Лукьянов К.С., Моисеев Е.А. Анализ и выбор демпфирующих цепей для мощных импульсных преобразователей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 109–115.
16. Моисеев Е.А. Построение демпфирующих цепей для мощных импульсных преобразователей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 1. С. 147–152.
17. Угринов П. Ограничение напряжения на ключевом транзисторе в однотактных преобразователях напряжения // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 62–65.
18. Рахматов А.З., Абдулхаев О.А., Каримов А.В., Каландаров Ж.Ж., Скорняков С.П. Малогабаритные бескорпусные полупроводниковые ограничители напряжения // Компоненты и технологии. 2011. № 9. С. 54–55.
19. Кадуков А. TVS-диоды — полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях // Компоненты и технологии. 2001. № 10. С. 32–36.
20. Пряхин С. Компоненты для силовой электроники корпорации Epcos AG // Компоненты и технологии. 2002. № 18. С. 32–33.
21. Ромадина И. Электронные компоненты компании ON Semiconductor для защиты электрических цепей от импульсного перенапряжения // Компоненты и технологии. 2009. № 101. С. 73–76.
22. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. Electro-magnetic vibrator with controlled vibration frequency. *Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 46–47.
23. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. Vibrating source of rotary fluctuations. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 56–59.
24. Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Nazemnyy elektromagnitnyy vibratsionnyy ceysmoistochnik* [Terrestrial electromagnetic vibrational seismosource]. Patent RF no. 2253136, 2004. (In Russian).
25. Ivannikov N.A., Ivashin V.V., Pevchev V.P., Pryadilov A.V. *Impulsniy elektromagnitnyy istochnik seismicheskih voln* [Pulsed electromagnetic source of seismic waves]. Patent RF no. 2466429, 2011. (In Russian).
26. Ivashin V.V., Kudinov V.V., Pevchev V.P. Electromagnetic the drive for impulse and vibroimpulse technologies. *Izvestiya visshikh uchebnikh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
27. Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pchelkin D.V. *Elektromagnitnyy privod rezonansnogo vibratora* [Electromagnetic drive of the resonant vibrator]. Patent RF no. 2146412, 1998. (In Russian).
28. Bar V.I., Ivashin V.V., Medvedev V.A. *Rezonansniy vibrator* [Resonant vibrator]. Patent RF no. 2160494, 1999. (In Russian).
29. Ivashin V.V., Medvedev V.A. *Elektromagnitnyy privod vozvratnopolostupatel'nogo dvizheniya* [Electromagnetic drive of back and forth motion]. Patent RF no. 2046540, 1991. (In Russian).
30. Bar V.I., Medvedev V.A., Makaricheva O.A., Semochkina N.B. *Elektromagnitniye i teploviye protsessy v impulsnikh ustanovkakh induktsionnogo nagreva ferromagnitnoy stali* [Electromagnetic and thermal processes in pulse installations of induction heating of ferromagnetic steel]. Depon. manusc. no. 742-B2005 25.05.2005.
31. Tchernyavsky N.I., Kazakov Y.V. Generators of impulses of current for argon-arc welding of aluminum alloys]. *Svarka i diagnostika*, 2012, no. 2, pp. 45–49.
32. Kudinov V.V., Uzbekov K.H., Pryadilov A.V. The powerful transistor converter for a charge of the capacitor. *Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 54–56.
33. Shevtsov A.A., Glibin E.S. Simulation modeling of joint operation of static compensators and contact welding machine. *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 34–38.
34. Glibin E.S., Shevtsov A.A. Simulation of functioning of compensating devices jointly with the contact welding machines. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 5, pp. 17–21.
35. Danilov V.S., Lukyanov K.S., Moiseev E.A. The analysis and choice of the damping circuits for powerful pulse converters. *Sbornik nauchnikh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 4, pp. 109–115.
36. Moiseev E.A. Creation of the damping circuits for powerful pulse converters. *Sbornik nauchnikh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 1, pp. 147–152.
37. Ugrinov P. Restriction of voltage on the key transistor in single-cycle converters of voltage. *Silovaya elektronika*, 2004, no. 1, pp. 62–65.

REFERENCES

1. Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pozdnov M.V. *Rezonansniy vibrator* [Resonance vibrator]. Patent RF no. 2177840, 1999. (In Russian).

18. Rakhmatov A.Z., Abdulkhaev O.A., Karimov A.V., Kalandarov G.G., Skornyakov S.P. Small-sized packageless semiconductor limiters of voltage. *Komponenti i tekhnologii*, 2011, no. 9, pp. 54–55.
19. Kadukov A. TVS diodes – semiconductor devices for restriction of dangerous revoltage in electronic circuits. *Komponenti i tekhnologii*, 2001, no. 10, pp. 32–36.
20. Priahin S. Components for power electronics of Epcos AG corporation. *Komponenti i tekhnologii*, 2002, no. 18, pp. 32–33.
21. Romadina I. Electronic components of the ON Semiconductor company for protection of electric circuits against a pulse overvoltage. *Komponenti i tekhnologii*, 2009, no. 101, pp. 73–76.

THE PRINCIPLES OF SELECTION OF THE PROTECTIVE VOLTAGE LIMITER USING THE EXAMPLE OF A CONSTANT VOLTAGE PULSE CONVERTER

© 2015

M.V. Pozdnov, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
A.V. Pryadilov, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: voltage limiter; pulse converter; semiconductor transformer; over-voltage on the transistor; switching processes.

Abstract: An object of this research is the protective limiter used in the boost constant voltage pulse converter (CVPC). The aim of this research is the reasonable choice of the limiters necessary for keeping the switching over-voltage in high-power transistors on a safe level, at the set parameters of work of the circuit. The article considers the relevance of application of power supply pulse circuits in modern technologies by various types of loading. Using the example of constant voltage pulse converter, the authors presented the equivalent circuit showing that the turn-off of the transistor is followed by an over-voltage. For limitation of an over-voltage, the authors offer to use voltage limiter. For the purpose of a reasonable choice of the limiter the authors offered to consider the switching processes while switching off a transistor. The analysis of the switching processes is carried out on the basis of the assumptions which are often used in the analysis of pulse processes of voltage pulse converters. The article provides the chart flow explaining the circuit operation. The analysis of switching processes is followed by the deduction of analytical ratios reflecting the key switching parameters: the over-voltage level, the switching time, the energy emitted within the limiter during one period, and the average lost power within the limiter. The concept of relative over-voltage used for the selection of a limiter and a power transistor is introduced. The authors review the examples of the industrially produced elements which act as the limiters. The article analyses the parameters of the limiters produced by different manufacturers. According to the obtained analytical ratios and proceeding from the analysis of the parameters of produced by manufacturers limiters, the recommendations and the estimation technique for the selection of limiters for power supply circuits are given. The application field of this research is the schemes with transistors operating in key modes, such as the schemes of constant voltage pulse converter.

ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭЛЕМЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ R-C-VD ЦЕПочки НА ПРИМЕРЕ ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© 2015

М.В. Позднов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника»
А.В. Прядилов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника»
 Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: демпфирующая цепочка; импульсный преобразователь; полупроводниковый преобразователь; перенапряжение на транзисторе; коммутационные процессы.

Аннотация: В данной статье рассмотрены основы выбора элементов защитной R-C-VD цепочки на примере импульсного преобразователя постоянного напряжения (ИППН).

Целью работы является мотивированный выбор параметров защитной цепочки, необходимых для ограничения коммутационных перенапряжений на безопасном уровне. Задачи работы заключаются в описании процессов формирования коммутационных перенапряжений с разбиением коммутационных процессов на периоды времени, выявление величин этих перенапряжений исходя из параметров схемы и формулировании рекомендаций по выбору параметров защитных R-C-VD цепочек. Объектом исследования является демпфирующая (защитная) R-C-VD цепочка, применяемая в повышающем ИППН.

В статье пояснена актуальность и сфера применения рассматриваемого вопроса. Показан механизм формирования коммутационных перенапряжений на паразитных индуктивностях в импульсных схемах. Рассмотрена схема включения защитной R-C-VD цепочки для ограничения перенапряжений. Рассмотрена работа ИППН с R-C-VD цепочкой с точки зрения формирования коммутационных перенапряжений. Для этого один период работы схемы разбит на временные интервалы, в каждом из которых приведено описание работы схемы. Рассмотрение произведено с учетом некоторых допущений, применимых к анализу таких схем. Приведены аналитические соотношения, позволяющие определить величину коммутационных перенапряжений исходя из параметров схемы. Получены соотношения, отражающие преобразование энергий между элементами схемы в процессе работы защитной цепочки. Приведена временная диаграмма, поясняющая работу схемы. На основе приведенного описания работы схемы и полученных аналитических соотношений сформулированы критерии выбора элементов защитной R-C-VD цепочки, акцентировано внимание на особенностях их выбора.

Областью применения данной работы являются схемы с транзисторами, работающими в ключевых режимах, например, схемы ИППН.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко применяются схемы с использованием полевых, биполярных и IGBT транзисторов, работающих в ключевых режимах. К таким схемам относятся импульсные блоки питания, преобразователи напряжения, привода двигателей, системы питания для специализированных технологий и т. д. [1–14]. Эти схемы (по сравнению со схемами, использующими транзисторы в активном режиме) обладают высоким КПД. Однако из-за высокой скорости коммутации токов в процессе выключения транзисторов появляются всплески перенапряжений, обусловленные наличием паразитных индуктивностей. Эти перенапряжения прикладываются к транзисторам и могут привести к их пробое. Для уменьшения перенапряжений применяют специальные демпфирующие цепочки [15–20]. Например, на основе ограничителей напряжения или цепочек R-C-VD типа, распространенный вариант которой рассматривается в данной статье.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим работу демпфирующей цепочки в составе повышающего ИППН. Цепь транзистора VT (рис. 1) содержит паразитную индуктивность L_p . Разрыв тока в этой цепи сопровождается перенапряжениями на L_p и, как следствие, может быть причиной пробоя транзистора VT. Перенапряжение U_{Lp} определяется скоростью коммутации di/dt тока в силовой цепи и величиной паразитных индуктивностей $U_{Lp} = L_p \cdot \frac{di}{dt}$.

Для ограничения всплесков напряжения на транзисторе возможно применение демпфирующей цепочки R1-C1-VD1, показанной на рис. 1. При выключении транзистора (t_0 на рис. 2) ток i_L дросселя L , протекая через диод VD1, конденсатор C1, паразитную индуктивность L_p и источник U , линейно во времени увеличивает на конденсаторе напряжение до уровня E . Постоянство тока $i_L = I_0$ в процессе коммутации объясняется тем, что интервал коммутации мал, а индуктивность L велика.

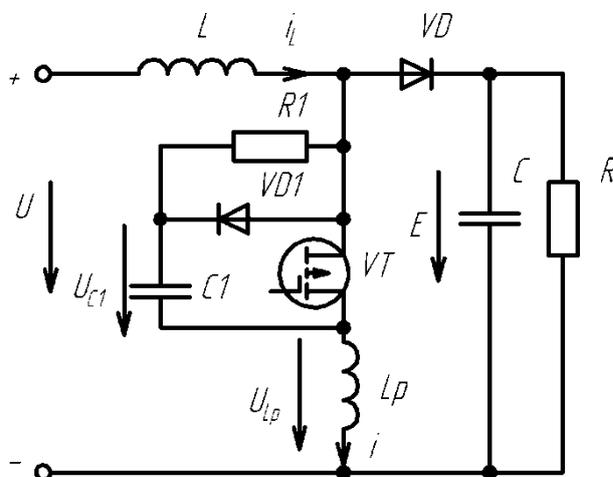


Рис. 1. Повышающий ИППН с демпфирующей R-C-VD цепочкой

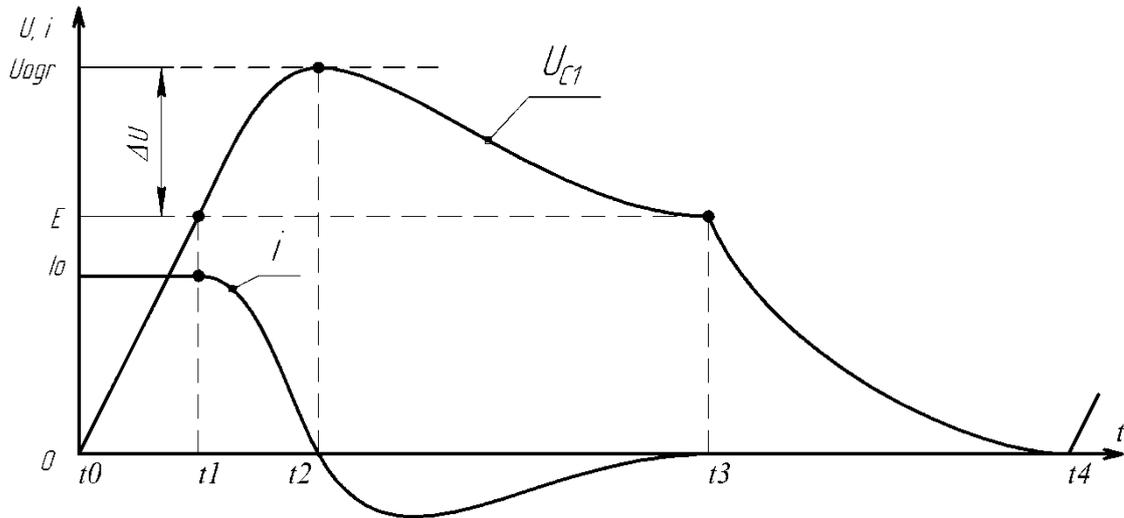


Рис. 2. Временные диаграммы процессов в демпфирующей цепочке

В момент $t1$ открывается VD , а процессы в цепи $VD1-C1-Lp$ развиваются по колебательному закону. Ток, протекающий через цепочку, описывается выражением $i(t)=I_0 \cdot \cos(\omega t)$, а напряжение, которое уже имеет постоянную составляющую $U_{C1}(0)=E$: $U_{C1}(t)=E+\Delta U \sin(\omega t)$. Этот этап ($t1-t2$) длится четверть периода колебаний T цепочки $Lp-C1$. К концу этого интервала ток Lp равен нулю, а напряжение на конденсаторе $U_{C1}(t2)=E+\Delta U$.

Для интервала ($t1-t2$) по II закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_{C1}(t) + U_{Lp}(t) &= E \Rightarrow U_{c1} + Lp \frac{di(t)}{dt} = E \Rightarrow \\ \Rightarrow E + \Delta U \sin(\omega t) + Lp \frac{d(I_0 \cdot \cos(\omega t))}{dt} &= E \Rightarrow \quad (1) \\ \Rightarrow E + \Delta U \sin(\omega t) - Lp \cdot I_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) &= E \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta U &= Lp \cdot I_0 \cdot \omega. \end{aligned}$$

Подставив в (1) собственную частоту контура $Lp-C1$ $\omega = \frac{1}{\sqrt{Lp \cdot C1}}$, получим

$$\Delta U = I_0 \sqrt{\frac{Lp}{C1}}.$$

Для безопасной работы транзистора обычно задают максимальным рабочим напряжением на нем $Uogr$ или перенапряжением $\Delta U = Uogr - E$, тогда искомая емкость конденсатора

$$C1 = Lp \left(\frac{I_0}{\Delta U} \right)^2. \quad (2)$$

В момент $t2$ ток i спадает до нуля, диод $VD1$ закрывается и конденсатор $C1$ начинает разряжаться до E через контур $Lp-C1-R1-VD-C$.

Составим схему замещения разрядного контура $C1$ на интервале ($t2-t3$) (рис. 3).

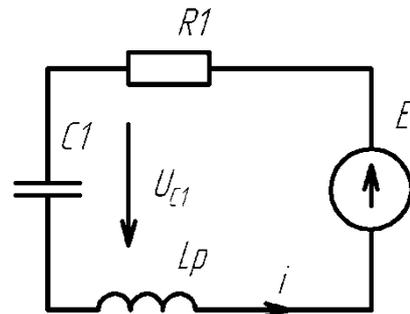


Рис. 3. Схема замещения разрядного контура конденсатора $C1$

За период работы преобразователя напряжение на конденсаторе C практически не изменяется, поэтому на схеме он заменен источником E . Начальное напряжение на конденсаторе $U_{C1}(t2)=E+\Delta U$.

Рассмотрим случай работы $R1-C1-VD1$ цепочки, когда разряд $C1$ до момента $t3$ включения транзистора происходит по аperiодическому закону с $U_{C1}(t3) \rightarrow E$. Для обеспечения аperiодического разряда необходимо,

чтобы $R1 > 2 \sqrt{\frac{Lp}{C1}}$, с учетом (2):

$$R1 > 2 \sqrt{\frac{Lp}{C1}} = 2 \frac{\Delta U}{I_0}. \quad (3)$$

При этом разряд будет определяться одной постоянной времени $\tau \approx C1 \cdot R1$. На интервале ($t2-t3$) энергия конденсатора $C1$ частично рассеивается на резисторе $R1$ и частично переходит в нагрузку R, C .

Разряд конденсатора $C1$ можно рассмотреть по переменной составляющей (рис. 4).

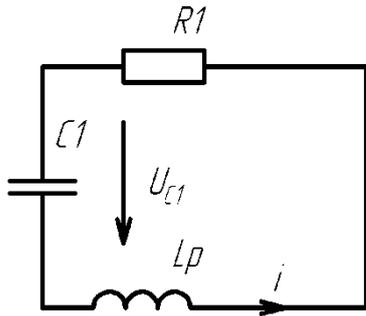


Рис. 4. Схемы замещения разрядного контура конденсатора $C1$ по переменной составляющей

На этой схеме источник E отсутствует, а начальное напряжение $U_{C1}(t_2) = \Delta U$. Из этой схемы видно, что к концу переходного процесса вся энергия $W_{R1(t_2-t_3)}$ конденсатора рассеивается в $R1$:

$$W_{R1(t_2-t_3)} = \frac{C1 \cdot \Delta U^2}{2} \quad (4)$$

Интересно определить энергию, ушедшую в нагрузку за тот же интервал. Она равна разнице между изменением энергии в конденсаторе $C1$ в начале и конце процесса разряда и энергией, ушедшей в $R1$:

$$\begin{aligned} W_C &= W_{C1}(t_2) - W_{C1}(t_3) - W_{R1(t_2-t_3)} = \\ &= \frac{C1 \cdot (E + \Delta U)^2}{2} - \frac{C1 E^2}{2} - \frac{C1 \cdot \Delta U^2}{2} = \\ &= C1 \cdot E \cdot \Delta U. \end{aligned}$$

В момент t_3 транзистор VT вновь открывается и конденсатор $C1$ разряжается через него до нуля. При этом на резисторе $R1$ выделяется энергия

$$W_{R1(t_3-t_4)} = \frac{C1 \cdot E^2}{2} \quad (5)$$

Средняя мощность, рассеиваемая в $R1$, определяется суммой энергий, выделяемых на резисторе $R1$ за периоды t_2-t_3 и t_3-t_4 (4) и (5) соответственно:

$$\begin{aligned} P &= \frac{C1 \cdot E^2 + C1 \cdot \Delta U^2}{2} f = \\ &= \frac{C1 \cdot (E^2 + \Delta U^2)}{2} f \end{aligned} \quad (6)$$

где f – частота коммутации схемы.
Подставляем (2) в (6)

$$\begin{aligned} P &= Lp \left(\frac{Io}{\Delta U} \right)^2 \cdot \frac{E^2 + \Delta U^2}{2} f = \frac{Lp \cdot Io^2}{2} \cdot \frac{E^2 + \Delta U^2}{\Delta U^2} f = \\ &= W_{Lp} \frac{E^2 + \Delta U^2}{\Delta U^2} f = W_{Lp} \left(1 + \left(\frac{E}{\Delta U} \right)^2 \right) \cdot f = \\ &= W_{Lp} \left(1 + \left(\frac{E}{U_{ogr} - E} \right)^2 \right) \cdot f = W_{Lp} \left(1 + \left(\frac{1}{U^* - 1} \right)^2 \right) \cdot f \end{aligned}$$

где $W_{Lp} = \frac{Lp \cdot Io^2}{2}$ – энергия, запасенная в паразитной индуктивности;
 $U^* = U_{ogr}/E$ – относительное значение амплитуды напряжения на VT .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные соотношения определяют критерии выбора номинала $R1$:

- Условие аperiodического разряда (3).
- Условие разряда $C1$ за (t_2-t_3) до E подразумевает выбор постоянной времени $\tau = R1 \cdot C1$ в несколько (2..5) раз меньше длительности периода t_{2-3} . Эту длительность можно найти как

$$t_{2-3} = t_3 - t_{0-1} - t_{1-2} = t_3 - \frac{C1 \cdot E}{Io} - T/4,$$

где t_3 – время выключенного состояния транзистора;

$t_{0-1} = \frac{C1 \cdot E}{Io}$ – время заряда конденсатора $C1$ до величины E ;

$t_{1-2} = T/4$ – время колебательного дозаряда $C1$ до U_{ogr} ;

$T = 2\pi \sqrt{Lp \cdot C1}$ – период собственных колебаний цепочки $C1-Lp$.

- Условие разряда конденсатора $C1$ за интервал t_3-t_4 открытого состояния транзистора до нуля. Разряд конденсатора $C1$ позволяет улучшить траекторию закрытия транзистора (уменьшить потери в нем на этапе закрытия). Выбираем постоянную времени $\tau = R1 \cdot C1$ в несколько (2..5) раз меньше длительности t_3-t_4 .

– Необходимо проверить, что ток разряда конденсатора $C1$ не будет сильно нагружать транзистор VT , например $E/R < Io$.

При выборе конденсатора следует обратить внимание на то, что он должен был способен работать на частоте f с максимальным рабочим напряжением $E + \Delta U$ в режиме полного разряда.

Диод должен быть быстродействующим (с временем восстановления $t_{rv} \ll \frac{T}{4} = \frac{2\pi \sqrt{Lp \cdot C1}}{4}$) с максимальным рабочим напряжением не менее $E + \Delta U$.

ВЫВОДЫ

Защитная R-C-VD цепочка, установленная параллельно транзистору, позволяет облегчить коммутацию транзистора и ограничить коммутационные перенапряжения на нем. Энергия из паразитной индуктивности Lp сначала поступает в конденсатор цепочки, а затем выделяется на ее резисторе. Емкость конденсатора выбирается исходя из величин Lp и допустимого уровня

перенапряжений ΔU . Выбор номинала резистора более сложен, поскольку его величина должна удовлетворять ряду вышеприведенных требований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для защиты транзистора от перенапряжений можно воспользоваться описанной защитной R-C-VD цепочкой с элементами, выбранными согласно вышеприведенным рекомендациям. Следует отметить, что в статье рассмотрен частный случай работы R-C-VD цепи в соответствии с указанными допущениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ивашин В.В., Медведев В.А., Позднов М.В. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2177840 от 10.12.1999.
- Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Электромагнитный вибратор с управляемой частотой колебаний // Наука – производству. 2004. № 4. С. 46–47.
- Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Вибрационный источник крутильных колебаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 56–59.
- Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Наземный электромагнитный вибрационный сейсмоисточник : патент на изобретение № 2253136 от 25.02.2004.
- Иванников Н.А., Ивашин В.В., Певчев В.П., Прядилов А.В. Импульсный электромагнитный источник сейсмических волн : патент на изобретение № 2466429 от 04.05.2011.
- Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2012. № 1. С. 72–75.
- Ивашин В.В., Медведев В.А., Пчелкин Д.В. Электромагнитный привод резонансного вибратора : патент на изобретение № 2146412 от 05.01.1998.
- Бар В.И., Ивашин В.В., Медведев В.А. Резонансный вибратор : патент на изобретение № 2160494 от 16.02.1999.
- Ивашин В.В., Медведев В.А. Электромагнитный привод возвратно-поступательного движения : патент на изобретение № 2046540 от 22.04.1991.
- Бар В.И., Медведев В.А., Макарычева О.А., Семочкина Н.Б. Электромагнитные и тепловые процессы в импульсных установках индукционного нагрева ферромагнитной стали : депонированная рукопись № 742-B2005 25.05.2005.
- Кудинов А.К., Узбеков К.Х., Прядилов А.В. Мощный транзисторный преобразователь для заряда емкостного накопителя энергии // Наука – производству. 2004. № 4. С. 54–56.
- Шевцов А.А., Глибин Е.С. Имитационное моделирование совместной работы статических компенсаторов и контактной сварочной машины // Электротехника. 2010. № 4. С. 34–38.
- Глибин Е.С., Шевцов А.А. Моделирование функционирования компенсационных устройств совместно с контактными сварочными установками // Сварочное производство. 2009. № 5. С. 17–21.
- Кудинов А.К. Преобразователь постоянного напряжения : патент на изобретение № 2254662 от 29.12.2003.
- Данилов В.С., Лукьянов К.С., Моисеев Е.А. Анализ и выбор демпфирующих цепей для мощных импульсных преобразователей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 4. С. 109–115.
- Моисеев Е.А. Построение демпфирующих цепей для мощных импульсных преобразователей // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 1. С. 147–152.
- Угринов П. Ограничение напряжения на ключевом транзисторе в однотактных преобразователях напряжения // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 62–65.
- Рахматов А. З., Абдулхаев О. А., Каримов А.В., Каландаров Ж.Ж., Скорняков С.П. Малогабаритные бескорпусные полупроводниковые ограничители напряжения // Компоненты и технологии. 2011. № 9. С. 54–55.
- Кадуков А. TVS-диоды – полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях // Компоненты и технологии. 2001. № 10. С. 32–36.
- Ромадина И. Электронные компоненты компании ON Semiconductor для защиты электрических цепей от импульсного перенапряжения // Компоненты и технологии. 2009. № 101. С. 73–76.

REFERENCES

- Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pozdnov M.V. *Rezonansniy vibrator* [Resonance vibrator]. Patent RF no. 2177840, 1999. (In Russian).
- Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Electromagnetic vibrator with controlled vibration frequency. Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 46–47.
- Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Vibrating source of rotary fluctuations. Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 56–59.
- Ivashin V.V., Pozdnov M.V., Pryadilov A.V. *Nazemny elektromagnitniy vibratsionniy seysmoistochnik* [Terrestrial electromagnetic vibrational seismosource]. Patent RF no. 2253136, 2004. (In Russian).
- Ivannikov N.A., Ivashin V.V., Pevchev V.P., Pryadilov A.V. *Impulsniy elektromagnitniy istochnik seismicheskikh voln* [Pulsed electromagnetic source of seismic waves]. Patent RF no. 2466429, 2011. (In Russian).
- Ivashin V.V., Kudinov V.V., Pevchev V.P. *Electromagnetic the drive for impulse and vibroimpulse technologies. Izvestiya visshikh uchebnikh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2012, no. 1, pp. 72–75.
- Ivashin V.V., Medvedev V.A., Pchelkin D.V. *Elektromagnitniy privod rezonansnogo vibratora* [Electromagnetic drive of the resonant vibrator]. Patent RF no. 2146412, 1998. (In Russian).
- Bar V.I., Ivashin V.V., Medvedev V.A. *Rezonansniy vibrator* [Resonant vibrator]. Patent RF no. 2160494, 1999. (In Russian).
- Ivashin V.V., Medvedev V.A. *Elektromagnitniy privod vozvratnopolstupatel'nogo dvizheniya* [Electromagnetic

- drive of back and forth motion]. Patent RF no. 2046540, 1991. (In Russian).
10. Bar V.I., Medvedev V.A., Makaricheva O.A., Semochkina N.B. *Elektromagnitnye i teploviye protsessy v impulsnikh ustanovkakh induktsionnogo nagreva ferromagnitnoy stali* [Electromagnetic and thermal processes in pulse installations of induction heating of ferromagnetic steel]. Depon. manusc. no. 742-B2005 25.05.2005.
 11. Kudinov V.V., Uzbekov K.H., Pryadilov A.V. The powerful transistor converter for a charge of the capacitor. *Nauka – proizvodstvu*, 2004, no. 4, pp. 54–56.
 12. Shevtsov A.A., Glibin E.S. Simulation modeling of joint operation of static compensators and contact welding machine. *Elektrotehnika*, 2010, no. 4, pp. 34–38.
 13. Glibin E.S., Shevtsov A.A. Simulation of functioning of compensating devices jointly with the contact welding machines. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 5, pp. 17–21.
 14. Kudinov A.K. *Preobrazovatel postoyannogo napryazheniya* [Direct-voltage transducer]. Patent RF no. 2254662, 2003. (In Russian).
 15. Danilov V.S., Lukyanov K.S., Moiseev E.A. The analysis and choice of the damping circuits for powerful pulse converters. *Sbornik nauchnikh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, no. 4, pp. 109–115.
 16. Moiseev E.A. Creation of the damping circuits for powerful pulse converters. *Sbornik nauchnikh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 1, pp. 147–152.
 17. Ugrinov P. Restriction of voltage on the key transistor in single-cycle converters of voltage. *Silovaya elektronika*, 2004, no. 1, pp. 62–65.
 18. Rakhmatov A.Z., Abdulkhaev O.A., Karimov A.V., Kalandarov G.G., Skornyakov S.P. Small-sized packageless semiconductor limiters of voltage. *Komponenti i tekhnologii*, 2011, no. 9, pp. 54–55.
 19. Kadukov A. TVS diodes – semiconductor devices for restriction of dangerous revoltage in electronic circuits. *Komponenti i tekhnologii*, 2001, no. 10, pp. 32–36.
 20. Romadina I. Electronic components of the ON Semiconductor company for protection of electric circuits against a pulse overvoltage. *Komponenti i tekhnologii*, 2009, no. 101, pp. 73–76.

THE PRICIPLES OF SELECTION OF THE ELEMENTS OF PROTECTIVE R-C-VD CIRCUIT USING THE EXAMPLE OF A CONSTANT VOLTAGE PULSE CONVERTER

© 2015

M.V. Pozdnov, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
A.V. Pryadilov, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: damping circuit; pulse converter; semiconductor converter; transistor over-voltage; switching processes.

Abstract: This article covers the principles of selection of protective R-C-VD chain elements using the example of a constant voltage pulse converter (CVPC).

The aim of this research is the reasonable choice of protective chain parameters necessary for keeping the switching over-voltage on a safe level.

The objectives of this work are to describe the processes of formation of switching over-voltages with the partition of switching processes for the periods of time, the revealing of the over-voltages values based on circuit parameters, and the formulation of recommendations on the selection of parameters of protective R-C-VD chains.

The object of this study is the damping (protective) R-C-VD circuit used in the boost constant voltage pulse converter.

The article explains the relevance and the field of application of the issue under consideration. The article presents the mechanism of formation of switching over-voltages in the spurious inductances in the switching circuits. The authors considered the connection diagram of protective R-C-VD circuit for limitation of the over-voltage and the work of a constant voltage pulse converter with R-C-VD circuit in the terms of forming switching over-voltages. For this reason, one circuit operation period was divided into time intervals, each of which describes the circuit operation.

The research was carried out taking into account certain assumptions applicable to the analysis of such circuits. The authors introduce the analytical relations that allow determining the value of switching over-voltage on the basis of the circuit parameters. The authors obtained the relations reflecting the energies transformation between the circuit elements in the process of protective circuit operation. The flow chart illustrating the circuit operation is presented. On the base of the above description of the circuit operation and obtained analytical relations, the criteria for selection of protective R-C-VD circuit elements have been formulated focusing on the features of their selection.

The application field of this research is the schemes with transistors operating in key modes, such as the schemes of constant voltage pulse converter.

Е.Н. Почекуев, кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

П.А. Путеев, аспирант,

старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: система автоматизированного проектирования листовой штамповки; многопозиционная штамповка; типовые системы автоматизированного проектирования; классификация САПР ЛШ; штамповка кузовных деталей.

Аннотация: В сфере автоматизации проектирования процессов и объектов листовой штамповки представлено значительное число коммерческих программных продуктов. Каждый из них обладает инструментами и особенностями, направленными на снижение трудоемкости и ускорения времени проектирования. В статье проводится классифицирование множества отечественных и иностранных систем автоматизированного проектирования объектов и процессов многопозиционной штамповки (САПР МШ). Рассмотренное количество САПР описывается множеством функциональных признаков. С помощью метода главных компонент факторного анализа проводится поиск корреляционных связей между признаками для уменьшения их числа. Выделяется пять факторов (групп признаков САПР МШ). Выделенным факторам задаются названия в соответствии с описанием входящих в них признаков. Приводится структурно-логическая матрица САПР МШ для полученных факторов. Представлено процентное соотношение рассмотренных САПР в выделенных факторах. Для построения классификации и определения типовых САПР МШ используется метод *k*-средних кластерного анализа. Определено количество кластеров (типовых САПР) и их объем. Полученные кластеры представляют собой возможное описание типовой САПР МШ. Кластерам назначаются наименования, далее приводится описание их функциональных возможностей. Выделенные кластеры и их описание согласуются с эвристическим делением САПР по технологическому и конструктивному признаку. Наибольшее количество САПР МШ из представленной выборки относится к технологическим кластерам. Кластерный анализ множества САПР показывает, что развитие автоматизации проектирования объектов и процессов штамповки связано с оптимизацией технологических процессов листовой штамповки и применением инструментов и модулей САЕ, а также с разработкой библиотек типовых деталей и узлов с учетом баз знаний.

ВВЕДЕНИЕ

Известные классификации системы автоматизированного проектирования листовой штамповки (САПР ЛШ) обычно составляются на основе описания ряда функций модели [1–7], наличия структуры мастер-процесса [8–12], описания уровней организации и объема работ [9–11; 13].

Представленные классификации не в полной мере отображают все многообразие САПР объектов и процессов штамповки. Многопозиционная штамповка имеет ряд особенностей, которые должны быть учтены в приложениях автоматизированного проектирования [14–17]. Также отсутствие ряда признаков и их систематизации не позволяет применить методы системного подхода к анализу множества САПР с целью последующего вывода о векторе развития современных технологий проектирования.

Для определения возможностей и направления развития САПР, предназначенных для решения задач проектирования оснастки и процессов многопозиционной штамповки, были проанализированы известные программные продукты российских и зарубежных производителей с применением факторного и кластерного анализов и структурно-логического подхода.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается множество существующих из САПР ЛШ. Для проведения классификации предлагаются признаки САПР многопозиционной штамповки (таблица 1).

С целью определения латентных признаков (факторов) среди рассматриваемой группы САПР ЛШ использован метод главных компонент факторного анализа. Для вычислений использован программный продукт IBM SPSS Statistics. Для рассматриваемой группы признаков строится матрица корреляции, для которой составляется система характеристических уравнений. Для метода главных компонент число факторов равняется числу решений системы уравнений, и оно равняется числу признаков [18].

После анализа факторов выделено пять основных на основании критерия «каменистой осыпи» (рисунок 1) и метода Кайзера (значимыми признаются факторы, собственное значение которых больше 1). Кумулятивное собственное значение этих факторов описывается 78,82 5% дисперсии, что соответствует принципу Парето [18]. Для оптимизации поиска факторов проведено вращение факторной структуры по методу варимакс.

На основании метода главных компонент предложены следующие пять факторов: 1. Моделирование и анализ геометрии изделий P_0 (признаки 1, 2); 2. Проектирование переходов штамповки F_0 (признаки 3–7); 3. Моделирование параметров техпроцесса T_0 (признаки 8–12); 4. Проектирование оснастки St_0 (признаки 12–18); 5. Анализ движения элементов штампа K_0 (признак 19).

Значения элементов множества САПР ЛШ представлены в таблице 2.

Проведен структурный синтез типов САПР ЛШ [9; 19; 20]. САПР штамповки как объект анализа представляет множество факторов (MP_0):

Таблица 1. Признаки САПР многопозиционной штамповки

№	Название признака	Обозначение	Значения
1.	Анализ технологичности изделия	x_1	1/0
2.	Возможность расчета формы листовой заготовки	x_2	1/0
3.	Построение переходов штамповки с помощью специализированных инструментов	x_3	1/0
4.	Получение разверток операций гибки и фланцовки	x_4	1/0
5.	Получение вытяжных переходов	x_5	1/0
6.	Наличие САЕ-модуля	x_6	1/0
7.	Работа с деталями листового металла	x_7	1/0
8.	Формирование последовательности переходов штамповки (полосы)	x_8	1/0
9.	Назначение параметров оборудования	x_9	1/0
10.	Использование списков материалов (<i>bill of materials</i>)	x_{10}	1/0
11.	Определение поверхностей рабочих деталей на основе геометрии вытяжного перехода	x_{11}	1/0
12.	Построение деталей штампа с помощью специализированных инструментов	x_{12}	1/0
13.	Проектирование рабочих деталей штампа на основе геометрии вытяжного перехода	x_{13}	1/0
14.	Проектирование рабочих деталей на основе выбора из библиотек стандартных деталей	x_{14}	1/0
15.	Проектирование стандартных деталей на основе геометрии детали или ее переходов	x_{15}	1/0
16.	Выбор деталей из библиотек	x_{16}	1/0
17.	Построение штампа на основе пакета	x_{17}	1/0
18.	Создание чертежей	x_{18}	1/0
19.	Кинематические операции	x_{19}	1/0

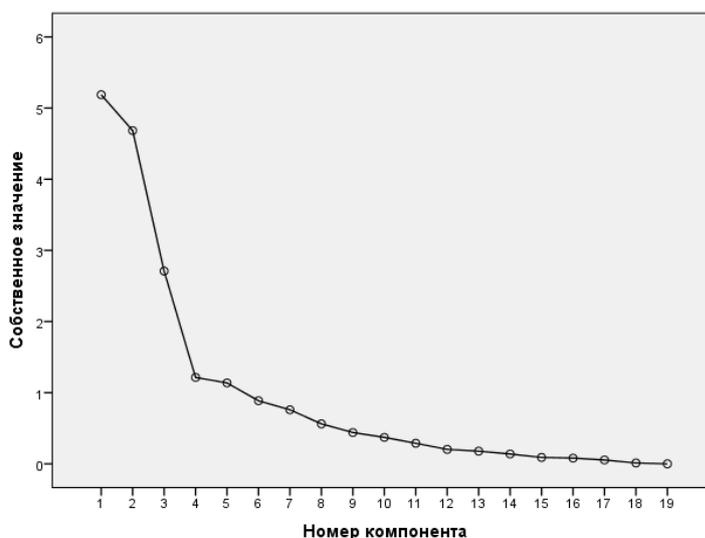


Рис. 1. График собственных значений факторов («каменистая осыпь»)

Таблица 2. Матрица факторов

Название признака	Обозначение	Варианты признака			
		Вариант 1 (1)	Обозначение	Вариант 2 (0)	Обозначение
Изделие	P_0	С операциями проектирования изделий	P_1	Без операций проектирования изделий	P_2
Переходы штамповки	F_0	С операциями проектирования переходов штамповки	F_1	Без операций проектирования переходов штамповки	F_2
Техпроцесс	T_0	С операциями проектирования техпроцесса	T_1	Без операций проектирования техпроцесса	T_2
Оснастка	St_0	С операциями проектирования штампов	St_1	Без операций проектирования штампов	St_2
Движение элементов штампа	K_0	С операциями кинематического анализа	K_1	Без операций кинематического анализа	K_2

$$MP_0 = \begin{pmatrix} P_1 P_2 \\ F_1 F_2 \\ T_1 T_2 \\ St_1 St_2 \\ K_1 K_2 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

В таблице 3 представлено процентное соотношение рассмотренных САПР в выделенных факторах.

Таблица 3. Процентное соотношение множества САПР ЛШ для выделенных факторов

Наименование	есть, %	нет, %
Функции моделирования	56	44
Функции построения переходов на основе изделия	58	42
Функции построения технологических процессов	54	46
Функции построения оснастки	42	58
Функции моделирования кинематических операций	10	90

С помощью метода главных компонент факторного анализа удалось выделить пять основных факторов, которые характеризуют существующие САПР ЛШ по основным признакам. Для построения классификации по функциональному признаку САПР многопозиционной штамповки применяется кластерный анализ.

В соответствии с предложенными признаками (таблица 1), принимающими одно из двух возможных значений, может быть выделено следующее количество САПР [18]:

$$N = 2^p, \quad (2)$$

где N – количество типов САПР; p – число признаков.

Для предложенного количества признаков возможного множества число САПР ЛШ достигнет значения $N=524288$ (по формуле 2). Для анализа развития разработки применяемых инструментов проектирования объектов и процессов многопозиционной штамповки количество типов САПР ЛШ необходимо сократить до меньшего числа типовых описаний приложений.

Среди рассматриваемой выборки систем автоматизированного проектирования для указанных признаков производится поиск возможных типов (сочетаний).

Для проведения кластерного анализа в программном продукте IBM SPSS Statistics составлена таблица соответствия рассматриваемой выборки САПР и выделенных признаков. Признаки представлены в дихотомической шкале. Наличие признака задано обозначением «1», отсутствие задано «0». В качестве метода классификации выбран метод k -средних, позволяющий определить размеры кластеров типовых САПР при известном числе кластеров. В качестве переменных анализа указаны признаки, количество итераций задано 10 (по умолчанию).

По результатам кластерного анализа принимается количество кластеров, равное пяти. Результаты кластерного анализа представлены в таблице 4.

Минимальный по количеству представленных САПР кластер 5 представлен 7 приложениями из 81 (8,64 %). В соответствии с признаками кластерам назначаются следующие наименования типов САПР, представленные в таблице 5.

Таблица 4. Выделенные кластеры

	Номер кластера	Число наблюдений в каждом кластере
Кластеризовать	1	25
	2	21
	3	16
	4	12
	5	7
Допустимо		81
Пропущено		0

Таблица 5. Распределение кластеров

Наименование	Количество
САПР изделий многопозиционной штамповки и подготовки геометрии для разработки технологических процессов	25
САПР технологического процесса многопозиционной штамповки	21
САПР оснастки многопозиционной штамповки	16
САПР техпроцесса и штамповой оснастки	12
САПР вспомогательных операций и настройки параметров техпроцесса	7

РЕЗУЛЬТАТЫ

Кластерный анализ предложенных типов САПР показал, что выделяется пять основных типовых САПР ЛШ, обладающих следующими особенностями:

1. САПР изделий и построения переходов штамповки $MP_1 = ||P_{11} F_{11} T_{12} St_{12} K_{12}||$ (обозначение здесь и ниже по таблице 1 и формуле (1)) обладают широким спектром решения задач инженерного анализа процесса штамповки методом конечных элементов (используются инструменты CAD/CAE с построением обратных (одношаговых) решателей). В частности, они имеют инструменты получения заготовок на основе изделия или многопереходной геометрии, однако отмечено отсутствие команд для конструкторских задач. В приложениях не представлено возможности строить промежуточные вытяжные переходы автомобильных изделий на основе геометрии заключительного вытяжного перехода. Подобные системы используются для проектирования процессов последовательной и многопозиционной штамповки. Приложения не имеют структуры мастер-процесса. Присутствуют базы данных материалов с возможностью загрузки или создания пользовательских баз, шаблоны компоновки техпроцесса и параметров оборудования (выбор усилия, числа ходов и так далее), библиотеки создания элементов вытяжного перехода.

2. САПР технологического процесса $MP_2=||P_{12} F_{12} T_{11} St_{12} K_{12}||$ служат для построения вытяжных переходов и задания параметров техпроцессов (используются инструменты САД и САЕ на основе инкрементального анализа). Позволяют моделировать параметры полосы или операций штамповки, задавая такие параметры пресса, как размеры межштампового пространства, усилие, параметры средств автоматизации, расположение переходов штамповки. Указанные данные используются для автоматической генерации отчетов. Существуют модули для построения переходов круглых деталей для последовательной штамповки. Приложения не имеют баз данных типовых технологических процессов или изделий. Для ряда функций реализована структура мастер-процесса, например, для построения полосы. Обладают теми же особенностями, что и САПР для моделирования геометрии изделия, построения вытяжных переходов, технологических процессов. Для многопозиционной штамповки отсутствуют мастер-процессы создания переходов. В данном кластере представлены базы материалов, параметров оборудования, задания направления движения рабочих частей штампа, шаблоны компоновки техпроцесса.

3. САПР оснастки $MP_3=||P_{12} F_{12} T_{12} St_{11} K_{12}||$ представлены функциями построения штампов и их узлов (используются инструменты САД-модулей). Представлено несколько способов построения рабочего инструмента. Также в эту группу относятся каталоги стандартных деталей для штампов. Зачастую подобные приложения дополняют программные комплексы проектирования технологических процессов от других разработчиков САПР. Пакеты штампов представлены для проектирования последовательной штамповки и зачастую содержат возможность загрузки в сборку модели полосы. Однако для штампов многопозиционной штамповки стандартные или типовые конструкции отсутствуют.

4. САПР для моделирования геометрии изделия, построения вытяжных переходов, технологических процессов и проектирования оснастки $MP_4=||P_{11} F_{11} T_{11} St_{11} K_{11}||$ включают в себя наиболее полный набор функций проектирования техпроцесса и штампа (комплекс САД/САЕ). Сюда же включены приложения, позволяющие проектировать часть деталей штампа (рабочие и прижимные). САПР данного типа позволяют загрузить стандартные детали штампа, шаблоны пакетов, а также представляют различные средства моделирования рабочего инструмента, например, с использованием стандартных пуансонов и матриц или же их построение на основе геометрии вытяжного перехода или изделия. В рассмотренных САПР отсутствуют типовые штампы, а также специальные инструменты для моделирования штампов вырубki заготовок. В САПР данного типа не в полном объеме представлена возможность моделирования многопереходной вытяжки, применение САЕ-модуля ограничивается одношаговым анализом и построением заготовки. Для большинства функций реализованы локальные мастер-процессы. Отмечено присутствие команд моделирования кинематики – автоматизируется падение отхода, перемещение вытяжного перехода по операциям, движение грейферных механизмов, проверка закрытия и открытия штампа. Кроме указанных в предыдущем кластере баз данных, в данную

группу относятся базы данных стандартных пакетов штампов, деталей, конструктивных элементов рабочих деталей штампа.

5. САПР вспомогательных операций и настройки параметров техпроцесса (САД/САЕ/САМ) отличается разнообразием функций, таких как настройка параметров техпроцесса (ширина и материал ленты), себестоимость материала и себестоимость одной единицы изделия, задание свойств оборудования и другие. Отсутствие общих признаков делает данный класс вспомогательных приложений разнообразным.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Показано, что по результатам факторного и кластерного анализов количества факторов и кластеров для данного множества САПР ЛШ совпадает.

2. Установлено, что предложенная классификация согласуется с эвристическим делением САПР ЛШ по технологическому и конструктивному признакам. В данной классификации рассматриваются САПР изделий и получения заготовок, в них выделена специальная группа приложений с вспомогательными операциями. Наибольшее количество САПР из представленной выборки относится к технологическим кластерам.

3. С помощью полученной выборки систем автоматизированного проектирования отображены признаки развития разработки приложений для проектирования объектов и процессов многопозиционной штамповки: наличие параметрического моделирования деталей штампов, узлов; систематизация проектирования на основе параметризации техпроцессов и штамповой оснастки; отсутствие общего мастер-процесса проектирования штампа и технологии; проектирование детали штампа на основе представления ее геометрии как набора элементов; моделирование геометрии вытяжного перехода как набора примитивов построения; определяющая роль формы изделия для всего процесса проектирования; автоматизированное проектирование чертежей; наличие реляционных баз данных стандартных деталей; анализ движения элементов штампов и средств автоматизации; PDM-сопровождение.

4. Установлено, что среди рассмотренных САПР объектов и процессов многопозиционной штамповки отсутствуют базы знаний типовых структур – изделий, технологий, штампов.

5. В изучаемой группе САПР ЛШ наиболее полно представлены системы моделирования этапов проектирования объектов и процессов ЛШ, их количество составляет около 15 % от общего числа рассмотренных САПР.

6. Кластерный анализ показал, что развитие САПР штамповки связано с оптимизацией технологических процессов ЛШ и применением САЕ-модулей, а также с разработкой библиотек стандартных деталей и узлов с учетом баз знаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный кластерный и факторный анализ позволяет установить, что развитие современных САПР для проектирования процессов и оснастки многопозиционной штамповки направлено на создание приложений, содержащих методы и интерфейсы разработки техпроцессов и конструкций штампов, с возможностью

параметризации, созданием баз данных типовых конструкций и баз знаний, которые позволяют ускорить процесс проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bintas M. Development of a Computer Aided Die Design Software and Die Design Process Modeling // The 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds. Turkey, 2011. P. 285–290.
- Bor-Tsuen Lin, Chun-Chih Kuo. Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for stamping dies for automobiles // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 35. № 9-10. P. 1000–1013.
- Bor-Tsuen Lin. A knowledge-based parametric design system for drawing dies // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. Vol. 36. № 7-8. P. 671–680.
- Bor-Tsuen Lin. Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009. Vol. 42. № 11-12. P. 1140–1152.
- Pratt M.J., Wilson P.R. Conceptual design of a feature-oriented solid modeler. Draft Document 3B. General Electric Corporate R&D, 1987. 145 p.
- Tang A. CAE Based Die Face Engineering Development to Contribute to the Revitalization of the Tool & Die Industry // AIP Conference Proceedings. 2005. № 8. P. 50–59.
- Tor S.B., Britton G.A., Zhang W.Y. Functional Modeling in Conceptual Die Design // Innovation in Manufacturing Systems and Technology. 2003. № 1. P. 104–113.
- Почекуев Е.Н., Путеев П.А., Шенбергер П.Н. Проектирование штампов для последовательной листовой штамповки в системе NX. М.: ДМК-Пресс, 2012. 336 с.
- Почекуев Е.Н. Структурно-логическое проектирование штампов листовой штамповки В САПР // Межвузовский сборник научных трудов. Тольятти, 2000. С. 74–79.
- Почекуев Е.Н., Скрипачев А.В., Шенбергер П.Н. Системное проектирование последовательных разделительных штампов вырубки листовых заготовок // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 1. С. 170–177.
- Почекуев Е.Н., Скрипачев А.В., Шенбергер П.Н. Программа для проектирования разделительных штампов вырубки листовых заготовок для NX Siemens PLMSoftware // САПР и графика. 2011. № 12. С. 89–91.
- Схиртладзе А.Г. Автоматизированное проектирование штампов. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. 284 с.
- Самаркин А.И. Особенности автоматизированного проектирования штампов // Вестник Псковского государственного университета. 2013. № 3. С. 45–49.
- Ольша А.М. Листовая штамповка на многопозиционных автоматах. М.: Машиностроение, 1980. 143 с.
- Орлов П.Г. Штамповка деталей на листоштамповочных автоматах (основы теории и расчета). М.: Машиностроение, 1984. 160 с.
- Листовая штамповка: справочник конструктора штампов / под ред. Л.И. Рудмана. М.: Машиностроение, 1988. 496 с.
- Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
- Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия. М.: Финансы и статистика, 1988. 342 с.
- Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. М.: Энергия, 1980. 344 с.
- Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.

REFERENCES

- Bintas M. Development of a Computer Aided Die Design Software and Die Design Process Modeling. *The 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*. Turkey, 2011, pp. 285–290.
- Bor-Tsuen Lin, Chun-Chih Kuo. Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for stamping dies for automobiles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 35, no. 9-10, pp. 1000–1013.
- Bor-Tsuen Lin. A knowledge-based parametric design system for drawing dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 36, no. 7-8, pp. 671–680.
- Bor-Tsuen Lin. Computer-aided structural design of drawing dies for stamping processes based on functional features. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42, no. 11-12, pp. 1140–1152.
- Pratt M.J., Wilson P.R. *Conceptual design of a feature-oriented solid modeler*. Draft Document 3B. General Electric Corporate R&D, 1987. 145 p.
- Tang A. CAE Based Die Face Engineering Development to Contribute to the Revitalization of the Tool & Die Industry. *AIP Conference Proceedings*, 2005, no. 8, pp. 50–59.
- Tor S.B., Britton G.A., Zhang W.Y. Functional Modeling in Conceptual Die Design. *Innovation in Manufacturing Systems and Technology*, 2003, no. 1, pp. 104–113.
- Pochekuev E.N., Puteev P.A., Shenberger P.N. *Proektirovanie shtampov dlya posledovatelnoy listovoy shtampovki v sisteme NX* [Development of dies for progressive sheet stamping in NX system]. Moscow, DMK-Press publ., 2012, 336 p.
- Pochekuev E.N. Structural-logical development of dies for progressive sheet stamping in CAD. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnikh trudov*. Tolyatti, 2000, pp. 74–79.
- Pochekuev E.N., Skripachev A.V., Shenberger P.N. System design of follow shearing dies for cutting sheet blank. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovateskogo universiteta)*, 2012, no. 1, pp. 170–177.
- Pochekuev E.N., Skripachev A.V., Shenberger P.N. Software for development of separating dies for sheet

- blanking for NX Siemens PLMSoftware. *SAPR i grafika*, 2011, no. 12, pp. 89–91.
12. Skhirtladze A.G. *Avtomatizirovannoe proektirovanie shtampov* [Computer-aided development of dies]. Vladimir, Vladimirskiy gos. universitet publ., 2007, 284 p.
 13. Samarkin A.I. Peculiarities of computer-aided development of dies. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 45–49.
 14. Olsha A.M. *Listovaya shtampovka na mnogopozitsionnykh avtomatakh* [Sheet stamping on multidi machines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1980, 143 p.
 15. Orlov P.G. *Shtampovka detaley na listoshtampovochnikh avtomatakh (osnovy teorii i rascheta)* [Stamping of components on sheet stamping automatic press (basics of theory and calculation)]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1984. 160 p.
 16. Rudman L.I., ed. *Listovaya shtampovka: spravochnik konstruktora shtampov* [Sheet stamping: reference book for dies designer]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988, 496 p.
 17. Romanovskiy V.P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Cold stamping reference book]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979, 520 p.
 18. Zhambyu M. *Ierarkhicheskiy klaster-analiz i sootvetstviya* [Hierarchical cluster-analysis and compliance]. Moscow, Finansy i statistika publ., 1988, 342 p.
 19. Kuznetsov O.P., Adelson-Velskiy G.M. *Diskretnaya matematika dlya inzhenera* [Discrete mathematics for engineers]. Moscow, Energiya publ., 1980, 344 p.
 20. Bykov V.P. *Metodicheskoe obespechenie SAPR v mashinostroenii* [Methodological support of CAD in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1989, 255 p.

CLASSIFICATION DEVELOPMENT OF CAD/CAM/CAE SYSTEMS FOR SHEET STAMPING BASED ON FACTOR AND CLUSTER ANALYSIS

© 2015

E.N. Pochekuev, candidate of technical sciences, Associate Professor,
assistant professor of the department «Welding, materials pressure processing and related processes»

P.A. Puteev, post-graduate student,
lecturer of the department «Welding, materials pressure processing and related processes»
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: CAD/CAM/CAE; sheet metal forming CAD; transfer die stamping; transfer die design; transfer stamping; types of CAD/CAM/CAE systems; CAD/CAM/CAE classification; automotive parts stamping.

Abstract: The large number of commercial software supports sheet metal processes and objects automation. Each of them has instruments and features for reduction of labor and design time accelerating. The set of Russian and foreign CAD/CAM/CAE-systems for transfer process and die design is reviewed. Represented number of computer-aided systems is described by functional features set. Using the principal component analysis for searching correlation links between the features is reduced features number. The five factors (group of the computer-aided software descriptions) are allocated. The allocated factors are named according features descriptions. The structural-logical framework of the computer-aided software for the allocated factors is presented. The percentage of computer-aided systems in each factor is presented. Using the k-means clustering for computer-aided software of transfer stamping processes and die design allows classifying and determining standard types of theirs. The number of clusters (standard computer-aided software) is defined. The each obtained cluster presents possible description of the standard computer-aided software. The clusters are named and described with their functions and features. Represented clusters and their description are corresponded with the heuristic division of computer-aided software on technological and design features. The most number of the representative software refers to technological clusters. The k-means clustering of the computer-aided software set presents the transfer stamping process and transfer die automation development with process technologies optimization by using CAE and with design standards parts libraries and knowledge-based systems.

**ПОИСКОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ
РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ШТАМПОВ ДЛЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ**

© 2015

Е.Н. Почекуев, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
П.Н. Шенбергер, старший преподаватель
кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: поисковое проектирование разделительных штампов; математическая модель штампа; формализация баз данных и знаний.

Аннотация: В статье рассматривается процесс поискового проектирования разделительных штампов для последовательной листовой штамповки. Выполнено структурно-иерархическое описание конструкций последовательного разделительного штампа. Приведена структурная схема конструкции последовательного разделительного штампа, разработанная на основе граф-схем узлов и механизмов. Введено понятие множества, которое содержит в качестве подмножеств различные узлы, признаки и переменные, определяющие конструкцию штампа. Созданы концептуальные схемы для каждой группы механизмов, определяемые структурными связями на множестве признаков конструкции. Выполнено отображение возможных вариантов конструкции штампа в виде «решающей» таблицы в бинарном пространстве структурных элементов, их признаков и значений. Разработана математическая модель штампа (ММШ), позволяющая провести поиск конструкции по предъявляемым инженером-конструктором требованиям и параметрам функционирования штампа для получения изделия. Реализацию процедуры поиска вариантов конструкции штампа предложено выполнять на основе методов объектно-ориентированного программирования. Реализовано представление взаимодействующих объектов (узлов, механизмов, деталей) как экземпляров определенного класса, причем классы образуют иерархию на принципах наследования. Сформирована система вложенных классов для узлов, механизмов и деталей с наследованием их свойств. Создан прикладной программный продукт для поискового проектирования структуры штамповой оснастки в среде NX OPEN на языке программирования C# с использованием материалов, реализованных в БД. Логическая схема базы знаний позволила выбирать из БД структурную схему, определяющую вариант конструкции штампа. На основе полученных результатов разработаны процедуры поискового проектирования последовательных разделительных штампов на базе математической модели штампа с применением структурно-логических и численных переменных.

ВВЕДЕНИЕ

Сложность и многовариантность конструкций разделительных штампов для последовательной листовой штамповки определяют трудоемкость задач, связанных с проектированием конструкции штампа. Решение этой проблемы с помощью эвристических методов проектирования [1–4] не позволяет снизить трудоемкость разработки. Использование систем автоматизированного проектирования в пакетах общего моделирования не решает задачу сокращения времени проектирования, поэтому в практике создания электронных моделей штампов применяются принципы системного подхода [5–9], что снижает время разработки, а также повышает качество процесса проектирования штампов. Одним из методов системного подхода является использование иерархических, морфологических структур, однако они не дают возможностей параметризации штампа и создания на этой основе математических моделей конструкции оснастки. Поэтому целью данной работы является разработка метода проектирования штампов последовательного действия с параметризацией узлов, механизмов и деталей конструкции на базе их иерархических, морфологических моделей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конкретная конструкция последовательного штампа есть процесс поиска конструктором рационального решения на базе опыта, данных и знаний [1–4]. Для формализации стратегии поиска необходимо создать математическую модель штампа.

Математическую модель штампа (ММШ) можно сформировать на основе структурного описания системы, которая представлена как множество вариантов конструкций узлов, механизмов и деталей, составляющих штамп (S_0), множество признаков, характеризующих компоненты штампа (P_0), а также множество связей между всеми элементами системы (Q_0):

$$ММШ = \|S_0, P_0, Q_0\|.$$

Разделительный штамп как объект проектирования представляется как множество узлов и деталей (S_0):

$$S_0 = \|h_0, p_0, n_0, f_0, y_0, g_0, k_0, t_0\|,$$

где S_0 – множество разделительного штампа для холодной листовой штамповки;
 h_0 – подмножество групп рабочего инструмента;
 p_0 – подмножество плит штампа;
 n_0 – подмножество узла направления движения плит штампа;
 f_0 – подмножество узла направления и фиксации материала;
 y_0 – подмножество узла удаления и прижима материала;
 g_0 – подмножество узла ограничения хода подвижных механизмов штампа;
 k_0 – подмножество механизмов крепления штампа;
 t_0 – подмножество транспортных механизмов.

Структурно-иерархическое описание последовательного разделительного штампа для наглядности и компактности представления изображается в виде графа [5–9]:

$$G = (V, E),$$

который является итогом строгой формальной обработки взаимосвязей между множествами возможных решений (вершины графа – $V = \{h_0 p_0 n_0 f_0 y_0 g_0 k_0 t_0\}$) и множествами условий сочетаемости (ребра графа – $E = \{e_i\}$), которые обозначаются в подмножествах связей в виде e_i , где символ i представлен символом подмножества признака. Разбиение на иерархические уровни является вариативным и зависит от опыта разработчика и конкретной конструкции штампа.

Пример графа для рабочего инструмента штампа представлен на рисунке 1. По аналогичному принципу

составляются графы для остальных узлов и механизмов конструкции.

Структурная схема конструкции последовательного разделительного штампа, разработанная на основе граф-схем узлов и механизмов:

$$S_{0cmp} = \|h_0 \|h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7 \|, p_0 \|p_1, p_2, p_3, p_4 \|, n_0 \|n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8 \|, f_0 \|f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7 \|, y_0 \|y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9 \|, g_0 \|g_1, g_2, g_3, g_4 \|, t_0 \|t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 \|, k_0 \|k_1, k_2, k_3 \| \|,$$

где $h_0, p_0, n_0, f_0, y_0, g_0, k_0, t_0$ – узлы и механизмы штампа; $\|h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7 \|, \|p_1, p_2, p_3, p_4 \|, \|n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6, n_7, n_8 \|, \|f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7 \|, \|y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9 \|, \|g_1, g_2, g_3, g_4 \|, \|t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 \|, \|k_1, k_2, k_3 \|$ – множества признаков классификации каждого узла и механизма штампа, формирующие уровни граф-схем (P_0).

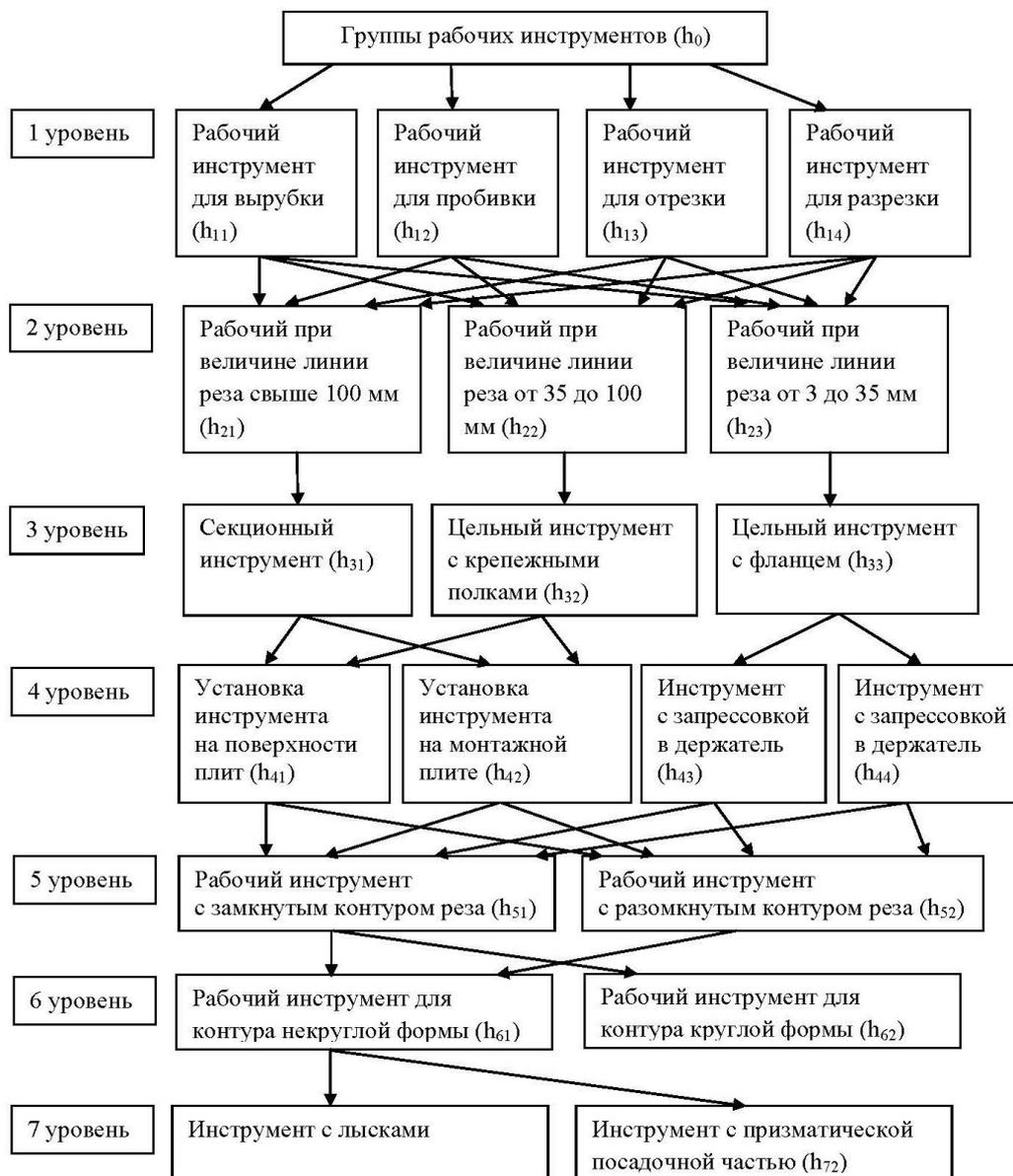


Рис. 1. Иерархическое описание структуры групп рабочего инструмента

Например, признаки классификации для групп рабочего инструмента означают: h_1 – вид технологической операции, h_2 – величину линии реза, h_3 – тип рабочего инструмента, h_4 – варианты установки рабочего инструмента, h_5 – тип контура реза и т. д.

На основе структурной схемы последовательного разделительного штампа создадим понятие множества, которое содержит в качестве подмножеств различные узлы, признаки и переменные, определяющие конструкцию штампа. Такое множество называется универсумом [10; 11]. Представим универсумы признаков классификации групп рабочего инструмента:

$$\begin{aligned} U^{h_1} &= \{h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{14}\}; \\ U^{h_2} &= \{h_{21}, h_{22}, h_{23}\}; \\ U^{h_3} &= \{h_{31}, h_{32}, h_{33}\}; \\ U^{h_4} &= \{h_{41}, h_{42}, h_{43}, h_{44}\}; \\ U^{h_5} &= \{h_{51}, h_{52}\}; \\ U^{h_6} &= \{h_{61}, h_{62}\}; \\ U^{h_7} &= \{h_{71}, h_{72}\}; \end{aligned}$$

где $h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{14}, \dots, h_{71}, h_{72}$ – характеристики конструкций групп рабочего инструмента.

Например, первый универсум означает, что рабочий инструмент по виду технологической операции может быть предназначен либо для вырубки (h_{11}), либо пробивки (h_{12}), а также или для отрезки (h_{13}) или разрезки (h_{14}).

Описание конструкции каждого узла позволяет создать концептуальные схемы для каждой группы механизмов, которые определяются структурными связями (Q_0) на множестве признаков конструкции (P_0). Для системного анализа такие частные концептуальные схемы объединяются в общую, характеризующую конструкцию штампа в целом.

Структурная связь для признаков h_1 (вид технологической операции) и h_2 (величина линии реза) групп рабочего инструмента может выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} e_{h_1} &\in h_1 \{h_{11} : \text{logical}; h_{12} : \text{logical}; h_{13} : \text{logical}; \\ &h_{14} : \text{logical}\}, \\ e_{h_2} &\in h_2 \{h_{21} : \text{length_1}; h_{22} : \text{length_2}; \\ &h_{23} : \text{length_3}\}, \end{aligned}$$

где *logical* – логическая переменная, принимающая два значения: *T* (true) и *F* (false);

length_1, length_2, length_3 – переменные, обозначающие длину контура реза. Подмножества этих параметров: $U^{\text{length}_1} = \{3-35\}$, $U^{\text{length}_2} = \{35-100\}$, $U^{\text{length}_3} = \{>100\}$.

Отображение возможных вариантов конструкции штампа представлено в виде «решающей» таблицы в бинарном пространстве структурных элементов, их признаков и значений. Процедура синтеза конструкции штампа производится человеком с помощью базы знаний в человеко-машинной системе [10].

Результатом этой процедуры для проектирования узла разделительного инструмента (Tip_h_1) в поле признаков h_1 и h_2 является структурная связь:

$$\begin{aligned} Tip_h_1 &= \{h_1[h_{11} : T; h_{12} : F; h_{13} : F; h_{14} : F], \\ &h_2[h_{21} : >100; h_{22} : F; h_{23} : F]\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Разработанная математическая модель штампа (ММШ) позволяет провести поиск конструкции, которая удовлетворяет предъявляемым конструктором требованиям и параметрам функционирования штампа для получения изделия.

Для примера проектирования узла разделительного инструмента по формуле (1) поиск конструкции осуществляется на поле признаков h_i , а также требований и параметров h_{ij} .

Реализацию процедуры поиска можно осуществить, используя объектно-ориентированное программирование [12–17].

Представим взаимодействующие объекты (узлы, механизмы, детали) как экземпляры определенного класса, причем классы образуют иерархию на принципах наследования.

Иерархия по составу определяет отношения агрегирования. Более высокий уровень представляют те абстракции, которые используют в своем составе другие классы. Например, класс, отвечающий за параметры узла фиксации материала, является родительским для каждого класса деталей фиксации.

Используя такой подход, формируется система вложенных классов для узлов, механизмов и деталей с наследованием их свойств. Создается общий класс – *Stamp*, который определяет черты, присущие множеству дочерних элементов – узлов и механизмов. Эти классы затем наследуются другими классами – деталями и элементами штампа, каждый из которых добавляет переменные, которые уникальны для него. Универсумы понятий являются значениями членов (переменных) класса.

В качестве примера рассмотрим сокращенный фрагмент кода, написанный на языке программирования C# с наследованием классов групп рабочего инструмента:

```
class h0 // Класс групп рабочего инструмента
{
    public bool U_logical_0; // Объявляется переменная U_logical_0,
    // которой соответствует универсум Ulogical_0;
}
class h11: h0 // Класс h11, наследующий класс h0;
{
    protected bool U_logical_1; // Объявляется переменная U_logical_1,
    // которой соответствует универсум Ulogical_1;
}
class h21: h11 // Класс h21, наследующий класс h11;
{
    protected double U_lenght_1; // Объявляется переменная U_lenght_1,
    // которой соответствует универсум Ulenght_1.
}
```

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Использование предложенных методов позволило создать прикладной программный продукт для поискового проектирования структуры штамповой оснастки в среде NX OPEN на языке программирования C# [18; 19] с использованием материалов, реализованных в БД [20].

По логической схеме базы знаний из БД выбирается структурная схема, определяющая вариант конструкции штампа, электронная модель которой загружается в файл проекта.

Таким образом, использование полученных в работе результатов позволяет выполнять поисковое проектирование последовательных разделительных штампов на основе разработанной математической модели штампа с применением структурно-логических и численных переменных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин В.М., Лукашин В.М. Справочник конструктора штампов для холодной штамповки. М.: Машгиз, 1960. 295 с.
2. Листовая штамповка: справочник конструктора штампов / под ред. Л.И. Рудмана. М.: Машиностроение, 1988. 496 с.
3. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
4. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.
5. Кузнецов О.П., Адельсон-Вельский Г.М. Дискретная математика для инженера. М.: Энергия, 1980. 344 с.
6. Почекуев Е.Н., Скрипачев А.В., Шенбергер П.Н. Системное проектирование последовательных разделительных штампов вырубki листовых заготовок // Вестник СГАУ им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 1. С. 170–177.
7. Яглом И.М. Булева структура и ее модели. М.: Сов. радио, 1980. 192 с.
8. Спирина М.С., Спирин П.А. Дискретная математика. М.: Академия, 2007. 368 с.
9. Сурмин Ю.П. Теория систем и системный анализ. Киев: МАУП, 2003. 368 с.
10. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1989. 255 с.
11. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Прохоров А.Ф. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении. М.: Машиностроение, 1986. 256 с.
12. Вендров А.М. Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем. М.: Финансы и статистика, 2005. 544 с.
13. Гагарина Л.Г., Кокорева Е.В., Виснадул Б.Д. Технология разработки программного обеспечения. М.: ИНФРА-М, 2008. 400 с.
14. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML: руководство пользователя. М.: ДМК Пресс, 2004. 429 с.
15. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Баумана, 2002. 336 с.
16. Троелсен Э. C# и платформа .NET. СПб.: Питер, 2004. 796 с.
17. Шилдт Г. C#. СПб.: Питер, 2003. 512 с.

18. Почекуев Е.Н., Скрипачев А.В., Шенбергер П.Н. Автоматизированная система для проектирования последовательных разделительных штампов вырубki листовой заготовки: авторское свидетельство РФ, № 2011614118, 2011.
19. Почекуев Е.Н., Скрипачев А.В., Шенбергер П.Н. Программа для проектирования разделительных штампов вырубki листовых заготовок для NX Siemens PLM Software // САПР и графика. 2011. № 12. С. 89–91.
20. Почекуев Е.Н., Скрипачев А.В., Шенбергер П.Н. База графических данных типовых унифицированных пространственных моделей узлов, механизмов и деталей последовательных разделительных штампов вырубki листовой заготовки: заявка на регистрацию № 2011620251, 2011.

REFERENCES

1. Anikin V.M., Lukashin V.M. *Spravochnik konstruktora shtampov dlya kholodnoy shtampovki* [Reference book of cold stampeng dies designer]. Moscow, Mashgiz publ., 1960, 295 p.
2. Rudman L.I., ed. *Listovaya shtampovka: spravochnik konstruktora shtampov* [Sheet stamping: reference book for dies designer]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988, 496 p.
3. Zubtsov M.E. *Listovaya shtampovka* [Sheet stamping]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1980, 432 p.
4. Romanovskiy V.P. *Spravochnik po kholodnoy shtampovke* [Cold stamping reference book]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979, 520 p.
5. Kuznetsov O.P., Adelson-Velskiy G.M. *Diskretnaya matematika dlya inzhenera* [Discrete mathematics for engineers]. Moscow, Energiya publ., 1980, 344 p.
6. Pochekuev E.N., Skripachev A.V., Shenberger P.N. System design of follow shearing dies for cutting sheet blank. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovateskogo universiteta)*, 2012, no. 1, pp. 170–177.
7. Yaglom I.M. *Buleva struktura i ee modeli* [Boolean structure and its models]. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1980, 192 p.
8. Spirina M.S., Spirin P.A. *Diskretnaya matematika* [Discrete mathematics]. Moscow, Akademiya publ., 2007, 368 p.
9. Surmin Yu.P. *Teoriya sistem i sistemniy analiz* [Theory of systems and system analysis]. Kiev, MAUP publ., 2003, 368 p.
10. Bykov V.P. *Metodicheskoe obespechenie SAPR v mashinostroenii* [Methodological support of CAD in mechanical engineering]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1989, 255 p.
11. Solomentsev Yu.M., Mitrofanov V.G., Prokhorov A.F. *Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstvo v mashinostroenii* [Computer-aided design and production in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986, 256 p.
12. Vendrov A.M. *Proektirovanie programmnogo obespecheniya ekonomicheskikh informatsionnikh sistem* [Development of software for economic information systems]. Moscow, Finansy i statistika publ., 2005, 544 p.

13. Gagarina L.G., Kokoreva E.V., Visnadul B.D. *Tekhnologiya razrabotki programmogo obespecheniya* [Technology of software development]. Moscow, INFRA-M publ., 2008, 400 p.
14. Buch G., Rambo D., Dzhekobson A. *Yazik UML: rukovodstvo polzovatelya* [UML language: user guide]. Moscow, DMK Press publ, 2004, 429 p.
15. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Basics of computer-aided design]. Moscow, MGTU im. Baumana, 2002, 336 p.
16. Troelsen E. *C# i platforma .NET* [C# and NET platform]. S. Petersburg, Piter publ., 2004, 796 p.
17. Sildt G. *C#*. S. Petersburg, Piter publ., 2003, 512 p. (In Russian).
18. Pohekuev E.N., Skripachev A.V., Shenberger P.N. *Avtomatizirovannaya sistema dlya proektirovaniya posledovatelnykh razdelitelnykh shtampov vyrubki listovoy zagotovki* [Computer-aided system for design of progressive separating dies for blank cutting], author's certificate RF, no. 2011614118, 2011.
19. Pohekuev E.N., Skripachev A.V., Shenberger P.N. Software for development of separating dies for sheet blanking for NX Siemens PLMSoftware. *SAPR i grafika*, 2011, no. 12, pp. 89–91.
20. Pohekuev E.N., Skripachev A.V., Shenberger P.N. *Baza graficheskikh dannikh tipovykh unifikirovannykh prostranstvennykh modeley uzlov, mekhanizmov i detaley posledovatelnykh razdelitelnykh shtampov vyrubki listovoy zagotovki* [Graphic data base of typical universal spatial models of units, mechanisms and parts of progressive separating dies for blank cutting], application for registration no. 2011620251, 2011.

EXPLORATORY DEVELOPMENT OF THE STRUCTURES OF PROGRESSIVE SEPARATING DIES FOR SHEET STAMPING

© 2015

E.N. Pohekuev, candidate of technical sciences,

assistant professor of the department «Welding, materials pressure processing and related processes»

P.N. Shenberger, senior lecturer of the department «Welding, materials pressure processing and related processes»

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: exploratory development of separating dies; mathematical die model; data bases and knowledge formalization.

Abstract: The article considers the process of exploratory development of separating dies for progressive sheet stamping. The authors carried out the structure-hierarchical description of progressive separating die constructions and presented the construction schematic structure of the progressive separating die developed on the basis of graph-schemes of units and mechanisms. The authors introduced the notion of multitude, which contains various units, attributes and variables determining the die design as the subsets. During the study, the authors created the conceptual schemes for each group of mechanisms determined by the structural links within the multitude of the structure attributes and displayed possible variants of the die design in the form of “decision” table within the binary space of structure elements, their attributes and values. The die mathematical model (DMM) allowing the development of the design according to the requirements and die parameters specified by design engineer was developed. It was offered to implement the procedure of searching for the variants of die structure on the basis of object-oriented programming methods. The authors implemented the idea of interacting objects (units, mechanisms, parts) as the examples of a specified class, where the classes form the inheritance hierarchy, and created the nested classes system for the units, mechanisms and parts with their properties inheritance.

The authors created an applied software product (in NX OPEN environment using C# programming language) for the exploratory development of the structure of die equipment using the materials implemented in database. The logic scheme of knowledge base allowed to select the schematic structure determining the variant of die design from the database. Based on the results of the study, the authors developed the procedures of exploratory development of progressive separating dies on the basis of the die mathematical model using the structure-logical and numerical variables.

**СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ, МЕТОД «ФИКТИВНЫХ ТЕМПЕРАТУР»
И УСИЛЕНИЕ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПОКРЫТИЯ**

© 2015

И.К. Родионов, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)
И.И. Родионов, инженер по эксплуатации зданий и сооружений
ЖЭУ «Комсомольский», Тольятти (Россия)

Ключевые слова: стальные фермы покрытия; усиление сжатых стержней; методика расчета сварочных напряжений и деформаций.

Аннотация: Усиление стальных ферм покрытия часто достигается увеличением сечений стержней путем присоединения на сварке стержневых элементов. Сварка дает разогрев сечений и появление изгибных деформаций. Для рационального усиления необходим учет этих воздействий.

В этой связи разработана методика расчета сварочных прогибов, появляющихся при усилении способом увеличения сечений в сжатых стержнях стальных ферм покрытий. Методика базируется на методе определения сварочных напряжений и деформаций, известном под названием метода «фиктивных температур». Она учитывает основные особенности усиления: наличие в усиливаемых элементах сжимающих напряжений от нагрузки, наплавку нескольких продольных швов, сложность сечений.

В основу методики положена идея разделения тепловой мощности при сварке элементов в зависимости от их толщин. Для случаев усиления от наплавки каждого шва определяются распределения сварочных напряжений отдельно от тепловой мощности, приходящейся на усиливаемые и усиливающие элементы.

Порядок расчета сварочных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на элементы усиления, аналогичен порядку их расчета в ненапряженном элементе. При расчете напряжений от тепловой мощности, приходящейся на основные элементы, производится учет сжимающих напряжений от нагрузки.

Изгибающие моменты и, таким образом, сварочные прогибы стержней определяются от совместного действия усадочных сил, появляющихся в усиливаемом и усиливающем элементах.

Полученная методика расчета явилась базой для обоснования сварочных технологий, дающих возможность проводить усиление стержней стальных уголкового ферм при любых усилиях, включая предельные расчетные величины, и довольно существенно (до 30 %) повысить эффект от проводимого усиления (по сравнению с традиционными технологиями).

Дальнейший подъем российской экономики будет связан в значительной степени с модернизацией и реконструкцией промышленных предприятий. Необходимо будет заменить устаревшее оборудование, внедрить передовые технологии, осуществить некоторые другие меры, которые позволят выпускать современную продукцию без расширения производственных площадей, со значительно меньшими затратами по сравнению с новым строительством.

Эти задачи теснейшим образом связаны с использованием инженерных строительных конструкций, в том числе и металлических. Существует обширный парк строительных конструкций, выполненных из металла, в той или иной степени претерпевших моральный или физический износ. Одним из наиболее эффективных приемов продления срока их службы является усиление.

Усиления требуют основные несущие элементы каркаса, в том числе и стальные фермы покрытия. Значительная часть таких ферм – это конструкции со стержнями, выполненными из парных уголков, и узловыми фасонками.

Для увеличения их несущей способности обычно не требуется усиление большого количества стержней. В этом причина широкого применения методов усиления, связанных с увеличением несущей способности лишь отдельных из них, наиболее слабых, напряженных. Среди таких методов наиболее технологически простым и эффективным является метод увеличения сечений стержней путем присоединения на сварке дополнительных стержневых элементов.

Сварка значительно влияет на работу стержней усиливаемых ферм: появляются тепловые ослабления сечений, сварочные напряжения и деформации.

Комплексно влияние технологических параметров сварки на напряженное состояние усиливаемых стержней ферм не исследовалось [1–6]. Отсюда разноречивость отдельных указаний по технологиям усиления [8–15].

В частности, имеются рекомендации присоединять элементы усиления и сплошными, и прерывистыми швами. Предлагаются самые разнообразные порядки их наплавки. Нагрузки, при которых возможно безопасное усиление стержней, предлагается ограничивать значениями в пределах 0,4...0,8 от полных расчетных величин. Очевидна необходимость проведения исследований для аргументированного обоснования рациональных технологий сварки, правильной оценки влияния сварки на работу стержней, как в процессе усиления, так и усиленных.

Такие исследования проводятся в Тольяттинском государственном университете. Одним из результатов их явилась разработка методики расчета сварочных деформаций, появляющихся при усилении сжатых стержней стальных ферм. В основу методики положен аналитический метод определения сварочных напряжений и деформаций профессора В.С. Игнатъевой, известный под названием метода «фиктивных температур» [16; 17]. Метод получил развитие в работах учеников, в частности В.А. Белова, В.Р. Вершинина, И.И. Родионова, В.С. Парлашкевича [18].

Методика позволяет решать задачу определения деформаций (прогибов) для общего случая наплавки

нескольких продольных швов любой длины с учетом наличия в основных элементах в момент усиления сжимающих напряжений от нагрузки. Общий план решения заключается в определении прогибов от наложения каждого шва в отдельности и затем нахождения результирующей величины этих прогибов с учетом их направления. Прогибы стержня от наплавки каждого шва определяются следующим образом: находятся доли погонной тепловой мощности (q_n), приходящиеся на основной (q_n^o) и усиливающий (q_n^y) элементы [16; 17; 19]; определяются остаточные сварочные напряжения в усиленном сечении, учитывая напряженное состояние этих элементов перед началом усиления; определяются прогибы усиленного стержня с учетом совместности работы составляющих его элементов.

Более подробно особенности методики определения прогибов рассмотрим на примере сжатого уголкового стержня, усиливаемого уголками (рис. 1).

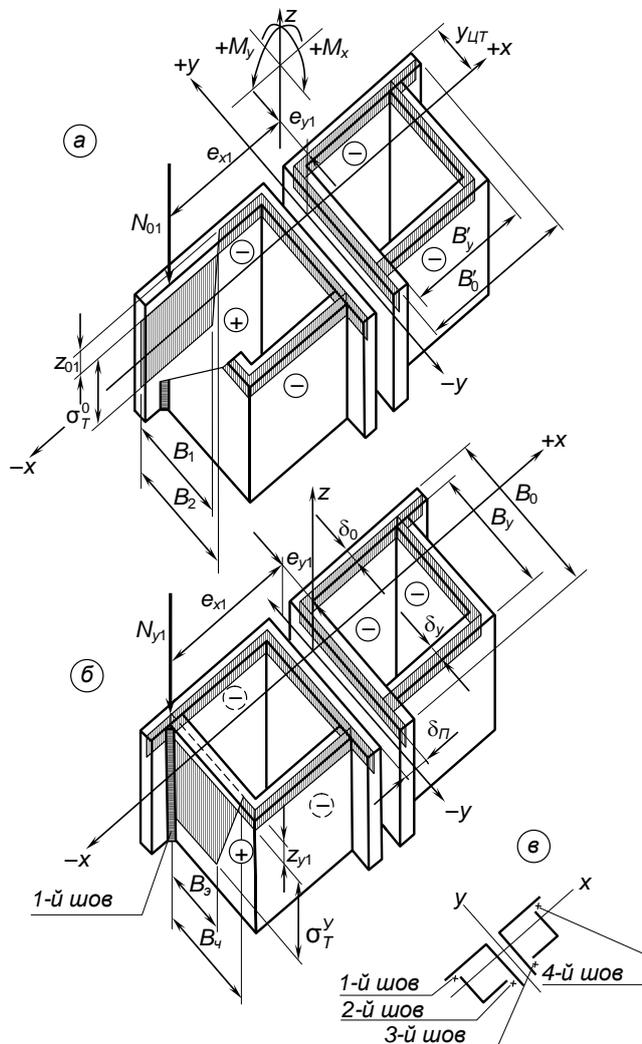


Рис. 1. Распределения остаточных сварочных напряжений

Порядок расчета сварочных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на элементы усиления, аналогичен порядку их расчета в ненапряженном элементе [16; 17]: в расчетный момент времени t_p (момент,

соответствующий остыванию металла на оси шва до $T_p=600$ °С) в предположении упругой работы материала определяется распределение условных упругих температурных напряжений; определяются временные сварочные напряжения; находится величина пластической составляющей временных сварочных напряжений; определяется распределение остаточных сварочных напряжений, рассматривая пластическую составляющую как свободную температурную деформацию от фиктивного источника тепла.

В отличие от элементов усиления, развитие сварочных деформаций в основном стержне происходит при наличии сжимающих напряжений от нагрузки. Учет этого при определении остаточных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на основной стержень, производится следующим образом:

1. Аналогично вышеприведенному в расчетный момент времени t_p определяется распределение условных упругих температурных напряжений σ_x^{ycl} (рис. 2):

$$\sigma_x^{ycl} = \alpha_m E T(y, t_p),$$

где α_m – коэффициент линейного температурного расширения;

E – модуль упругих деформаций стали;

$T(y, t_p)$ – распределение температуры по ширине усиливаемого элемента в расчетный момент времени t_p .

Распределение $T(y, t_p)$ может быть определено с помощью выражения предельного состояния процесса распределения тепла при нагреве пластины толщиной δ_0 мощным быстро движущимся линейным источником [16; 17; 19]:

$$T(y, t_p) = \frac{q_n^o}{\delta_0 \sqrt{4\pi\lambda c \gamma_p}} \exp\left(-\frac{y^2}{4\alpha t_p}\right),$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

$c\gamma$ – удельная, объемная теплоемкости;

α – коэффициент теплоотдачи.

2. Определяется пластическая составляющая временных напряжений, для чего производится следующее:

- выполняя требование равенства внутренних сил нулю, уравнивается распределение напряжений σ_x^{ycl} , то есть определяется положение нулевой линии y_o^1 (в первом приближении);

- от нулевой линии y_o^1 откладывается, как функция температуры, предел текучести $\sigma_m(T, y)$, отсекая, таким образом, в первом приближении пластическую составляющую временных напряжений;

- после вычитания пластической составляющей условие равновесия вновь нарушается и определяется новое положение нулевой линии $-y_o^{11}$, то есть во втором приближении; от линии y_o^{11} вновь откладывается $\sigma_y(T, y)$ и производится уточнение пластической составляющей. При этом вновь нарушается условие равновесия. Уточнение пластической составляющей производится до тех

пор, пока напряжения на участках сечения не будут превышать предел текучести.

Полученное распределение временных напряжений не удовлетворяет второму условию равновесия, выражающемуся равенством нулю суммы моментов внутренних сил. Однако, как показывают расчеты, выполнение этого условия крайне незначительно влияет на величину пластической составляющей временных напряжений, и им можно пренебречь.

3. Пластическая составляющая временных напряжений корректируется с учетом напряжений σ_0 , действующих от нагрузки. На рис. 2 она представлена часто заштрихованной частью эпюры напряжений

$$\sigma = \alpha_m ET(y, t_p) + \sigma_0.$$

4. Скорректированная пластическая составляющая временных напряжений рассматривается как свободные температурные напряжения от фиктивного источника тепла и последовательным уравниванием ее, подобно приведенным в п. 2, определяется распределение остаточных сварочных напряжений. В случае наплавки 1-го шва (рис. 1 в) распределения остаточных напряжений от тепловой мощности, приходящейся на основной и усиливающий элементы, будут иметь вид, представленный, соответственно, на рис. 1 а, б.

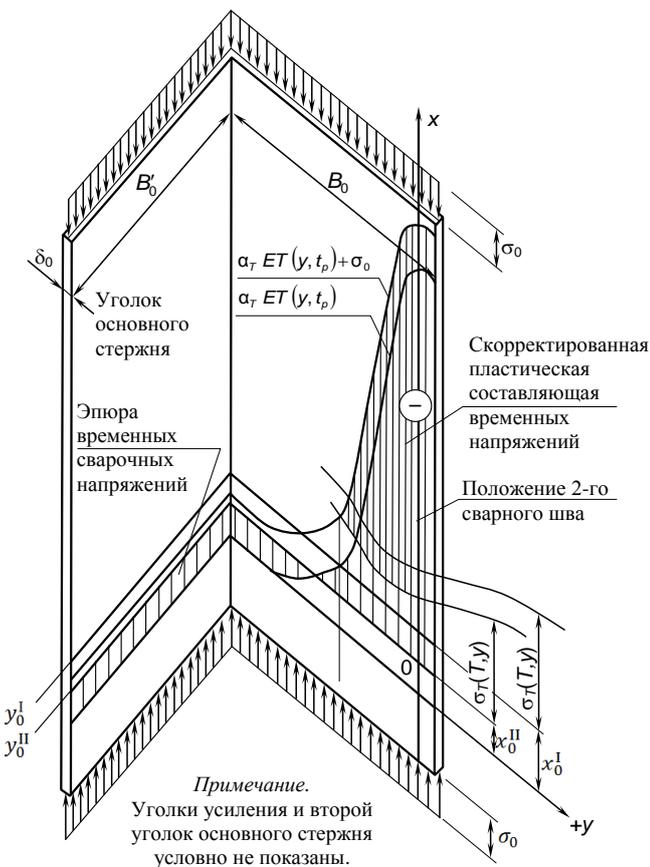


Рис. 2. К вопросу корректировки пластической составляющей временных сварочных напряжений

Распределения являются неуравновешенными: в плоскостях, перпендикулярных осям X и Y, действуют

изгибающие моменты, соответственно, M_{x1} и M_{y1} . Величина моментов может быть определена, как:

$$M_{x1} = -(N_{o1} + N_{y1})e_{y1}, \quad M_{y1} = (N_{o1} + N_{y1})e_{x1},$$

где N_{o1}, N_{y1} – усадочные усилия, определенные при расчетах от тепловой мощности, приходящейся, соответственно, на основной и усиливающий уголок;

e_{y1}, e_{x1} – плечи усилий относительно, соответственно, осей X и Y.

В случае наплавки 1-го шва длиной l_{o1} , меньшей длины усиливаемого стержня l , выражения для определения прогибов f_{x1} и f_{y1} в направлении осей X и Y будут иметь вид:

$$f_{x1} = \frac{M_{y1}(2ll_{o1} - l_{o1}^2)\mu_y^2}{8EI_y},$$

$$f_{y1} = \frac{M_{x1}(2ll_{o1} - l_{o1}^2)\mu_x^2}{8EI_x},$$

где I_x, I_y – моменты инерции усиленного сечения относительно осей X и Y;

μ_x, μ_y – коэффициенты приведения геометрической длины к расчетным в плоскостях, перпендикулярных, соответственно, осям X и Y.

Аналогичным образом могут быть получены выражения для определения прогибов стержня в направлении осей X и Y при наплавке 2-го, 3-го и 4-го швов: $f_{x2}, f_{y2}, f_{x3}, f_{y3}, f_{x4}, f_{y4}$.

Прогибы стержня в случае наплавки всех четырех швов могут быть получены как результирующие величины прогибов, определенных для случаев раздельной наплавки всех швов (с учетом направления каждого из этих прогибов). В рассматриваемом примере результирующие прогибы f_x и f_y в направлении осей X и Y определяются, как:

$$f_x = f_{x1} + f_{x2} - f_{x3} - f_{x4}, \quad f_y = -f_{y1} + f_{y2} + f_{y3} - f_{y4}.$$

Предлагаемая методика расчета хорошо подтверждается экспериментально. Прогибы, полученные при усилении 18 натуральных сжатых стержней различной гибкости ($\lambda = 86-124$), отличались от расчетных не более чем на 7 %.

На базе методики разработаны алгоритмы решения, позволяющие достаточно просто определять сварочные напряжения и деформации для различных вариантов усиления с использованием программных средств [20].

Полученные зависимости позволили предложить (впервые в области усиления) идею регулирования сварочных напряжений и деформаций с целью улучшения работы сжатых стержней, как в процессе усиления, так и уже усиленных.

Это явилось базой для обоснования сварочных технологий, дающих возможность, во-первых, проводить усиление стержней стальных уголкового ферм при любых усилиях, включая предельные расчетные величины, и, во-вторых, довольно существенно (до 30 %) повысить эффект от проводимого усиления (по сравнению с традиционными технологиями).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Десятов Б.И. Исследование работы усиляемых под нагрузкой элементов сварных стальных ферм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 24 с.
- Кизингер Р. Исследование напряжённого состояния растянутых стержней металлических ферм при их усилении под нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 22 с.
- Колесников В.М. Исследование работы некоторых стальных конструкций и отдельных элементов, усиленных под нагрузкой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1967. 24 с.
- Ребров И.С. К расчету стержневых систем, усиленных под нагрузкой // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1979. № 1. С. 62–67.
- Ребров И.С. Работа сжатых элементов стальных конструкций, усиленных под нагрузкой. Л.: Стройиздат, 1976. 176 с.
- Ребров И.С. Усиление стержневых металлических конструкций. Проектирование и расчет. Л.: Стройиздат, 1988. 288 с.
- Белый Г.И. Методика определения напряжённо-деформированных и предельных состояний в сечениях усиленных стержневых элементов при общем случае загрузки // Доклады: Теоретические основы строительства. М.: Варшава, 1998. С. 103–108.
- Бельский М.Р., Лебедев А.И. Усиление стальных конструкций. Киев: Будівельник, 1981. 120 с.
- Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных конструкций одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. М.: Стройиздат, 1987. 220 с.
- Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление и ремонт. М.: АСВ, 2012. 312 с.
- Лашченко М.Н. Повышение надёжности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. Л.: Стройиздат, 1987. 135 с.
- Металлические конструкции. Т. 2. Конструкции зданий / под ред. В.В. Горева. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2002. 520 с.
- Металлические конструкции. Справочник проектировщика. Т. 3 / под общ. ред. В.В. Кузнецова. М.: АСВ, 1999. 528 с.
- Металлические конструкции / под ред. Ю.И. Кудишина. 10-е изд. М.: Академия, 2007. 688 с.
- Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М.: Стройиздат, 1989. 160 с.
- Игнатьева В.С. Метод "фиктивных температур" как основа исследований в области напряженно деформируемого состояния сварных соединений. Металлические конструкции в строительстве // Труды МИСИ им. Куйбышева. 1979. № 152. С. 71–88.
- Игнатьева В.С. Сварочные напряжения и деформации. М.: МИСИ, 1981. 68 с.
- Parlashkevich V.S. Welding voltage and deformation of elements of construction metal structures // European Science and Technology: materials of the VI international research and practice conference. Vol. II. Munich, 2013. P. 321–326.
- Сварка. Резка. Контроль. Т. 1 / под ред. Н.П. Алёшина, Г.Г. Чернышёва. М.: Машиностроение, 2004. 480 с.
- Дмитриева Т.Л. Методика и алгоритмы решения задач строительной механики с использованием программных средств. Ч. 2. Расчет плоских ферм в программах EXCEL, MATHCAD, COMPASS // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 2. С. 126–134.

REFERENCES

- Desyatov B.I. *Issledovanie raboti usilyaemikh pod nagruzkoj elementov svarnikh stalnikh ferm*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of work of strengthened under the load elements of welded steel trusses]. Moscow, 1969, 24 p.
- Kizinger R. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya rastyanutikh stержney metallicheskih ferm pri ikh usilenii pod nagruzkoj*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of stressed state of tension members of metal trusses when strengthening them under the load]. Moscow, 1973, 22 p.
- Kolesnikov V.M. *Issledovanie raboti nekotorykh stalnikh konstruksiy i otdelnikh elementov, usilennikh pod nagruzkoj*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of work of some steel constructions and separate elements strengthened under the load]. Leningrad, 1967, 24 p.
- Rebrov I.S. To the calculation of column systems strengthened under the load. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura*, 1979, no. 1, pp. 62–67.
- Rebrov I.S. *Rabota szhatikh elementov stalnikh konstruksiy, usilennikh pod nagruzkoj* [Operation of fixed members of steel constructions strengthened under the load]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1976, 176 p.
- Rebrov I.S. *Usilenie stержnevikh metallicheskih konstruksiy. Proektirovanie i raschet* [Column metal constructions strengthening. Design and calculation]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1988, 288 p.
- Beliy G.I. Procedure of detection of strain-stressed and limit stages in the sections of strengthened column elements in general case of loading. *Doklady: Teoreticheskie osnovy stroitelstva*. Moscow, Varshava publ., 1998, pp. 103–108.
- Belskiy M.R., Lebedev A.I. *Usilenie stalnikh konstruksiy* [Steel structures strengthening]. Kiev, Budivelnik publ., 1981, 120 p.
- Val' V.N., Gorokhov E.V., Uvarov B.Yu. *Usilenie stalnikh konstruksiy odnoetazhnikh proizvodstvennikh zdaniy pri ikh rekonstruksii* [Strengthening of steel structures of one-storey production buildings during their reconstruction]. Moscow, Stroyizdat publ., 1987, 220 p.
- Ivanov Yu.V. *Rekonstruksiya zdaniy i sooruzheniy: usilenie, vosstanovlenie i remont* [Buildings and installations reconstruction: strengthening, restoration and repair]. Moscow, ASV publ., 2012, 312 p.
- Lashchenko M.N. *Povishenie nadezhnosti metallicheskih konstruksiy zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruksii* [Safety improvement of metal structures of buildings and installations during the reconstruction]. Leningrad, Stroyizdat publ., 1987, 135 p.

12. Gorev V.V., ed. *Metallicheskie konstruksii. Vol. 2. Konstruksii zdaniy* [Metal structures. V.2. Buildings constructions]. 2nd ed. Moscow, Visshaya shkola publ., 2002, 520 p.
13. Kuznetsov V.V., ed. *Metallicheskie konstruksii. Spravochnik proektirovshchika* [Metal structures. Design engineer reference book]. Moscow, ASV publ., 1999, vol. 3, 528 p.
14. Kudishin Yu.I., ed. *Metallicheskie konstruksii* [Metal structures]. 10th ed. Moscow, Akademiya publ., 2007, 688 p.
15. *Posobie po proektirovaniyu usileniya stalnikh konstruksiy (k SNiP P-23-81*)* [Manual on steel structures strengthening design (to SNiP P-23-81*)]. Moscow, Stroyizdat publ., 1989, 160 p.
16. Ignatyeva V.S. "Slack temperatures" method as the basis for research in the field of strain-stress state of welded conjunctions. *Metal structures in construction. Trudi MISI im. Kuybisheva*, 1979, no. 152, pp. 71–88.
17. Ignatyeva V.S. *Svarochnie napryazheniya i deformatsii* [Welding stresses and deformations]. Moscow, MISI publ., 1981, 68 p.
18. Parlashkevich V.S. Welding voltage and deformation of elements of construction metal structures. *European Science and Technology: materials of the VI international research and practice conference*. Munich, 2013, vol. II, pp. 321–326.
19. Aleshin N.P., Chernishov G.G., eds. *Svarka. Rezka. Kontrol'* [Welding. Cutting. Control]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2004, vol. 1, 480 p.
20. Dmitrieva T.L. Methods and algorithms for solving problems of structural mechanics using software. P. 2. Calculation of plane trusses in the program EXCEL, MATHCAD, COMPASS. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 2, pp. 126–134.

**WELDING DEFORMATIONS, «SLACK TEMPERATURES» METHOD
AND THE STRENGTHENING OF FIXED COLUMNS OF ROOF STEEL TRUSSES**

© 2015

I.K. Rodionov, candidate of technical sciences,
Associate Professor, assistant professor of the department «Urban Construction and Management»
I.I. Rodionov, buildings maintenance engineer
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: roof steel trusses; fixed columns strengthening; methods of calculation of welding stresses and deformations.

Abstract: The strengthening of roof steel trusses is often achieved by the increase of columns section by means of joining of columns elements during welding. The welding heats the sections and develops flexural deformations. For rational strengthening, it is necessary to take into account these effects. In this connection, the authors developed the methods for calculation of welded deflections produced when strengthening by means of increase of sections in fixed columns of roof steel trusses. These methods are based on the method of determination of welding stresses and deformations known as the «slack temperatures» method. It takes into account the main characteristics of strengthening: the existence in the strengthened elements of compression stresses developed in the result of load, several longitudinal welding seams, and section complexity. These methods are based on the idea of thermal power division during the welding of elements depending on their thicknesses. In cases of strengthening by weld facing of each seam, the authors determined the distributions of welding stresses separately from thermal power necessary for strengthened and strengthening elements.

The procedure of calculation of welding stresses resulted from thermal power necessary for strengthening elements is the same as their calculation procedure in the unstressed element. When calculating stresses from thermal power necessary for the base elements, the authors take into account the compression stresses from the load.

The torques and, consequently, the column welding deflections are determined according to the mutual actions of shrinkage forces originated in the strengthened and the strengthening elements.

The obtained technique of calculation became the basis for the proving of welding technologies allowing strengthening of columns of steel angle trusses during any forcing, including the maximum permissible computed values, and considerably (up to 30 %) increase the effect from the strengthening (in comparison with the traditional technologies).

В.П. Сидоров, доктор технических наук, профессор
А.В. Мельзитдинова, магистр-инженер, старший преподаватель
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: качество сварного соединения; стабилизация размеров сварного шва; температура поверхности детали; возмущающий фактор; математическая модель; отклонения параметров сварки; двухсторонняя аргонодуговая сварка; относительный коэффициент передачи возмущений.

Аннотация: Предложена методика определения температуры в зоне сварки, учитывающая влияние различных возмущений, на основании которой произведен расчет температур поверхности пластин из высоколегированной стали, свариваемых двухсторонней аргонодуговой сваркой без разделки кромок. Рассчитан термический цикл выбранной точки на наружной поверхности детали на расстоянии $y=0,6$ см от оси источника нагрева и получена точка с максимальной температурой ($x=0,7$ см), для которой определено влияние допустимых отклонений от номинальных значений условий сварки (температуропроводность, толщина пластины) и режимов сварки (эффективная мощность и скорость сварки). Приведены значения относительного коэффициента передачи возмущений (ОКПВ). Он представляет реакцию регулируемого параметра на изменение регулирующего в относительных единицах при отсутствии системы регулирования. Установлено, что при регулировании температуры точки относительное влияние скорости сварки превышает влияние эффективной мощности, в то время как при регулировании непосредственно провара различия почти нет. Поэтому в качестве регулирующего параметра целесообразнее использовать скорость сварки, так как она не оказывает влияния на мощность дуги и не взаимодействует в системе «источник питания – дуга – сварочная ванна». По предложенной методике проведено также исследование изменения температуры точки с координатой, при которой имеет место максимальный провар ($y=0,6$ см, $x=1,1$ см), и точки с координатами $y=0,8$ см и $x=1,1$ см. На основе сравнительного анализа полученных результатов для регулирования процесса сварки предпочтительнее выбор точки с максимальным проваром, так как отклонения провара и температуры в данной точке совпадают по времени.

ВВЕДЕНИЕ

Качество сварного соединения определяется его механическими, коррозионными и иными свойствами, зависящими от геометрических размеров и формы сварочного шва. Стабилизация геометрических размеров шва способствует повышению качества сварного соединения. В большинстве случаев при сварке практически невозможно контролировать и регулировать геометрические размеры сварочной ванны. В необходимых случаях можно контролировать температуру в зоне термического влияния шва [1]. Таким образом, одним из важнейших факторов получения качественного сварного соединения является подбор и поддержание необходимого температурного режима [2]. Определение температуры поверхности металла может производиться либо с помощью контактного термометра, либо посредством пирометров [3]. Для подбора оптимальных характеристик датчика температуры для регулирования размеров сварочной ванны необходимо исследование связи между температурами на поверхности детали и размерами ванны [4; 5]. Наиболее рационально основной объем исследований выполнить теоретически, а уточнение произвести с помощью необходимых экспериментов [6]. Поэтому разработка методики определения температуры в зоне сварки, учитывающей влияние различных возмущений, весьма актуальна.

Цель работы заключается в повышении качества сварных соединений за счет стабилизации температурного режима сварки.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ

С помощью математической модели [7–9], основанной на формуле для температуры от нормально-кругового источника тепла на поверхности плоского

слоя, адекватность которой показана в работе [10], можно рассчитать температуру поверхности металла на определенном расстоянии от оси источника нагрева, а также проследить изменения значений температуры при отклонениях параметров сварки.

Производили расчет температур [11] для способа двухсторонней аргонодуговой сварки пластин из высоколегированной стали без разделок кромок. Ранее в работе [12] были рассчитаны допустимые отклонения условий и режимов сварки при параметрах процесса, приведенных в таблице 1. В качестве регулируемого параметра [13; 14] был выбран номинальный провар изделия при сварке одного из двух швов. Значение такого провара принималось 60 % от свариваемой толщины детали 6 мм [15] и составило $H=3,6$ мм (рис. 1). Положительные значения x в нашем случае противоположны направлению скорости движения источника. Допустимое отклонение принимали $\pm 0,6$ мм от номинального провара. Таким образом, минимально допустимый провар составил 3,0 мм, а максимально допустимый провар 4,2 мм. Следовательно, допустимое относительное отклонение регулируемого параметра $[\Delta H/H]=\pm 16,7$ %.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассчитывали термический цикл [16] выбранной точки на наружной поверхности детали на расстоянии $y=0,6$ см от оси источника нагрева.

Температура возрастает и достигает своего максимума 995 °С в точке $x=0,7$ см. Таким образом, точка в нагреваемой зоне быстро нагревается до максимальной температуры, а затем охлаждается вследствие теплоотвода, причем по мере снижения температуры скорость охлаждения уменьшается (рис. 2).

Таблица 1. Номинальные значения параметров процесса сварки

Параметр	C , Дж/(см ³ °С)	q , Вт	q_0 , Вт/см ²	a , см ² /с	Vc , см/с	T_0 , °С	T , °С
Значение	3,476	1800	4200	0,0432	0,43	20	1440

Примечание. C – объемная теплоемкость, Дж/см³°С; q – эффективная тепловая мощность, Вт; q_0 – плотность теплового потока, Вт/см²; a – температуропроводность, см²/с; Vc – скорость сварки, см/с; T_0 – начальная температура детали, °С; T – температура плавления, °С.

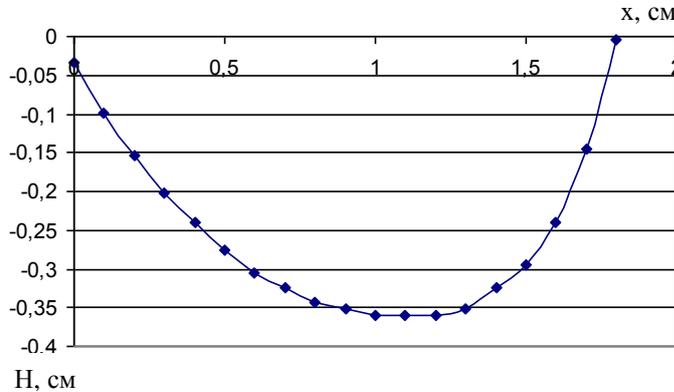


Рис. 1. Продольная изотерма плавления для номинального режима

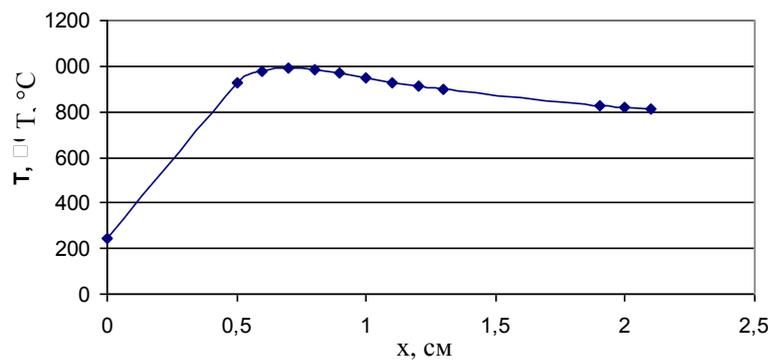


Рис. 2. Термический цикл при номинальных параметрах сварки: $y=0,6$ см

Для дальнейшего исследования была выбрана точка с максимальной температурой при координате $x=0,7$ см. Можно определить, как влияет допустимое отклонение каждого из параметров процесса сварки от номинальных значений (таблица 2), рассчитанных в работе [12], на полученную точку максимальной температуры T_{max} . В таблице 2 приведены также значения предложенного в работе [12] относительного коэффициента передачи возмущений (ОКПВ). Он представляет реакцию регулируемого параметра на изменение регулирующего в относительных единицах при отсутствии системы регулирования. Чем больше значение ОКПВ, тем более опасным является данный возмущающий фактор.

В таблице 3 приведены значения отклонений максимальной температуры в точке при отклонениях параметров процесса, приведенных в таблице 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По таблице 3 можно сделать выводы, что наибольшее относительное отклонение от номинального значения для температуры вызывает изменение температуропроводности и эффективной мощности, а наименьшее влияние – изменение толщины пластины в допустимых пределах. Для эффективной мощности относительное отклонение температуры несколько возросло, в то время как для скорости сварки, наоборот, уменьшилось.

Таблица 2. Значения параметров процесса при достижении допустимых отклонений провара

Параметр	q , Вт		Vc , см/с		T , °С		a , см ² /с		δ , см	
	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH	+ ΔH	- ΔH
Значение	1980	1550	0,39	0,50	1530	1210	0,02	0,07	0,57	0,66
ΔH , %	10	13,9	9,3	16,3	6,25	16	53,7	62	5	10
ОКПВ	1,67	1,20	1,80	1,02	2,67	1,04	0,31	0,27	3,34	1,67

Примечание. + ΔH – для положительных отклонений H , - ΔH – для отрицательных отклонений H .

Таблица 3. Относительные отклонения максимальной температуры при $y=0,6$ см, $x=0,7$ см

Параметр	+q	-q	+V	-V	+a	-a	+ δ	- δ
ΔT , %	+14,5	-18,9	-7,8	+12,4	-23,1	+9,5	-0,8	+0,9
ОКПВ	1,15	0,88	2,14	1,35	0,72	1,76	20,88	18,56

Примечание. Номинальная температура в точке 995 °С.

Соответственно происходят изменения ОКПВ. Причем отрицательные отклонения режимов сварки (мощности и скорости) приводят к большему относительному изменению температуры в выбранной точке. Это связано с особенностями распространения тепла в пластине в условиях двухсторонней сварки, когда влияет отражение тепла от обратной плоскости пластины [17]. При двухсторонней сварке более опасны возмущения, приводящие к уменьшению провара, так, возникновение непровара значительно вероятнее возникновения прожога [18; 19]. При регулировании температуры точки относительное влияние скорости сварки почти в 2,5 раза превышает влияние эффективной мощности, в то время как при регулировании непосредственно провара различия почти нет. Этот факт необходимо учитывать при создании системы регулирования температуры [20].

Следует также отметить, что допустимые положительные и отрицательные относительные отклонения параметров сопоставимы с отклонениями регулируемого параметра, поэтому слежение за температурой в выбранной точке перспективно для автоматического регулирования. Уменьшение ОКПВ для температуры по сравнению с ОКПВ для провара (эффективная мощность) свидетельствует об уменьшении чувствительности при регулировании. Для скорости сварки, наоборот, происходит увеличение чувствительности при регулировании температуры, т. к. ОКПВ возрастают. Поэтому скорость сварки более целесообразно использовать в качестве регулирующего параметра, чем эффективную мощность.

Более правильным представляется выбор, когда в качестве точки контроля температуры на наружной поверхности точки с координатой x , при которой имеет место максимальный провар (рис. 1). Такую координату можно принять $x=1,1$ см. Температура в этой точке ниже, чем в первой. Данные расчетов приведены в таблице 4.

Относительные отклонения температуры изменились незначительно, однако вторая точка предпочтительнее, из-за того что отклонения провара и температуры в данной точке совпадают по времени. Различия во влиянии мощности и скорости сварки уменьшилось по сравнению с ранее исследованной точкой, что указывает на предпочтительность выбора координаты x с максимальным проваром.

Также были произведены расчеты по предложенной методике для точки с координатами $y=0,8$ см и $x=1,1$ см (таблица 5).

Температура последней точки снизилась примерно в 2 раза. Сравнив таблицу 4 и таблицу 5, видим, что при увеличении расстояния между точками на наружной поверхности свариваемой детали от оси шва влияние абсолютных допустимых отклонений эффективной мощности и толщины детали практически не изменяется, в то время как влияние скорости сварки и температуропроводности имеет значительный прирост.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Допустимое относительное отклонение провара и относительные отклонения температур в области близкой к шву на поверхности изделия существенно отличаются для условий сварки (температуропроводности и толщины материала), а для режимов (мощности и скорости сварки) имеют близкие значения. Это позволяет использовать режимы для стабилизации провара при контроле температуры поверхности детали.

2. Предложенная методика сопоставления относительных отклонений регулируемого параметра и температуры поверхности детали позволяет выбрать точку, оптимальную для регулирования процесса сварки.

3. Эффективная мощность дуги и скорость сварки могут с близкой эффективностью использоваться

Таблица 4. Относительные отклонения температуры в точке $y=0,6$ см, $x=1,1$ см

Параметр	+q	-q	+V	-V	+a	-a	+ δ	- δ
ΔT , %	+12,8	-16,5	-10,7	+7,6	-10,9	+20,7	-2,4	+1,7
ОКПВ	1,30	1,01	1,56	2,20	1,53	0,81	6,96	9,82

Примечание. Номинальная температура 929 °С.

Таблица 5. Изменение значения T_{max} при положительных и отрицательных абсолютных допустимых отклонениях параметров сварки при $y=0,8$ см и $x=1,1$ см

Параметр	q+	q-	V+	V-	a+	a-	δ +	δ -
ΔT , %	+12,0	-15,0	-13,9	+19,1	-39,4	+12,4	-2,0	+3,0
ОКПВ	1,39	1,11	1,2	0,87	0,42	1,35	8,35	5,57

Примечание. Номинальная температура в точке 498 °С.

в качестве регулирующих параметров. Однако на практике целесообразнее использовать скорость сварки, так как она не оказывает влияния на мощность дуги и не взаимодействует в системе «источник питания – дуга – сварочная ванна» [21].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке. М.: Академия, 2006. 432 с.
2. Сидоров В.П. Методика определения точности поддержания режима при точечной контактной сварке // Сварочное производство. 2008. № 9. С. 18–22.
3. Андреева Л.И. Температурные измерения в металлообработке // ТЕХНОАС. Контрольно-измерительные приборы. URL: technoac.ru/news/articles/temperature-in-metal. (Дата обращения: 16.02.2015).
4. Сидоров В.П., Семистенов Д.А. Математическое моделирование геометрии шва при сварке конструкционных сплавов и биметаллов. Тольятти: ТГУ, 2009. 175 с.
5. Антонен Д.П., Псарас Г.Г. Экспериментальное определение веса, формы и размеров сварочной ванны // Сварочное производство. 1970. № 5. С. 43–44.
6. Павлов Н.В., Чинахов Д.А., Ильященко Д.П. Сравнительный анализ расчетных значений распределения температур при сварке с экспериментальными // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). 2010. Т. 3. № 12. С. 433–438.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 240 с.
8. Математическое моделирование сварочных процессов в пакете FEMLAB 3.0 / Р.А. Мусин [и др.] // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. 2010. Т. 12. № 4. С. 7–16.
9. Сараев Ю.Н., Кректулева Р.А., Косяков В.А. Математическое моделирование технологических процессов импульсной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом // Сварочное производство. 1997. № 4. С. 2–4.
10. Сидоров В.П., Хурин С.А. Моделирование провара при дуговой сварке стыковых соединений без разделки кромок // Сварка и Диагностика. 2011. № 6. С. 36–42.
11. Сидоров В.П. Математическая модель распространения тепла при контактной точечной сварке // Сварка–XXI век: Теория и методика, повышение качества профессионального образования и аттестация специалистов сварочного производства: материалы Всерос. научн.-техн. конф. Тольятти: ТГУ, 2002. С. 147–150.
12. Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В. Методика определения требований к точности параметров сварки // Сварка и Диагностика. 2014. № 3. С. 10–13.
13. Бадьянов Б.Н., Елизаров А.А., Колупаев Ю.Ф. Управление процессом сварки в режиме реального времени // Сварка на рубеже веков: тезисы докладов научн.-техн. конф. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. С. 30.
14. Букаров В.А. Разработка моделей управления дуговой сваркой в защитных газах // Сварочное производство. 1997. № 2. С. 13–17.
15. ГОСТ 14771–76. Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Изд-во стандартов, 1976. 37 с.
16. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. М.: МАШГИЗ, 1951. 296 с.
17. Сидоров В.П. Теория и технология сварочных процессов. 2-е изд. Тольятти: ТГУ, 2009. 228 с.
18. Попков А.М. Расчет параметров режима дуговой сварки стыковых соединений по заданным геометрическим параметрам швов // Сварочное производство. 2003. № 9. С. 33–35.
19. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. IV-6. Оборудование для сварки / В.К. Лебедев [и др.]. М.: Машиностроение, 1999. 496 с.
20. Львов Н.С., Гладков Э.А. Автоматика и автоматизация сварочных процессов. М.: Машиностроение, 1982. 302 с.
21. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении. М.: Машиностроение, 1979. 512 с.

REFERENCES

1. Gladkov E.A. *Upravlenie protsessami i oborudovaniem pri svarke* [Control of processes and equipment during welding]. Moscow, Akademiya publ., 2006, 432 p.
2. Sidorov V.P. Methods for determination of mode accuracy during the spot contact welding. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2008, no. 9, pp. 18–22.
3. Andreeva L.I. Temperature measurements in metalworking. *TEKHOAS*. URL: technoac.ru/news/articles/temperature-in-metal.
4. Sidorov V.P., Semistenov D.A. *Matematicheskoe modelirovanie geometrii shva pri svarke konstruktivnykh splavov i bimetallov* [Mathematical modeling of weld geometry in welding of structural alloys and bimetals]. Tolyatti, TGU publ., 2009, 175 p.
5. Antonets D.P., Psaras G.G. Experimental determination of weight, shape and size of welding pool. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1970, no. 5, pp. 43–44.
6. Pavlov N.V., Chinakhov D.A., Ilyashchenko D.P. Comparative analysis of calculated values of welding temperature distribution and experimental values. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*, 2010, vol. 3, no. 12, pp. 433–438.
7. Dyakonov V.P. *Spravochnik po algoritmam i programam na yazyke Beysik dlya personalnykh EVM* [Reference book on algorithms and BASIC software for personal computers]. Moscow, Nauka publ., 1987, 240 p.
8. Musin R.A., Trushnikov D.N., Shkurikhin V.A., Putin Yu.A. Mathematical modeling of welding processes in the package FEMLAB 3.0. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2010, vol. 12, no. 4, pp. 7–16.
9. Saraev Yu.N., Krektuleva R.A., Kosyakov V.A. Mathematical modeling of processes of pulse argon-arc welding with non-consumable electrodes. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 4, pp. 2–4.

10. Sidorov V.P., Khurin S.A. Weld penetration modeling during arc welding of butt joints without edge preparation. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 6, pp. 36–42.
11. Sidorov V.P. Mathematical model of heat distribution during spot contact welding. *Materiali Vseros. nauchno-tekhn. konf. "Svarka–XXI vek: teoriya i metodika, povishenie kachestva professionalnogo obrazovaniya i attestatsiya spetsialistov svarochnogo proizvodstva"*. Tolyatti, TGU publ., 2002, pp. 147–150.
12. Sidorov V.P., Melzitdinova A.V. Procedure of determination of requirements for welding parameters accuracy. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 10–13.
13. Badyanov B.N., Elizarov A.A., Kolupaev Yu.F. Welding process control in on-line mode. *Tezisi dokladov nauchno-tekhn. konf. "Svarka na rubezhe vekov"*. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman publ., 2002, p. 30.
14. Bukarov V.A. Development of models of arc gas-shielding welding control. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 2, pp. 13–17.
15. GOST 14771–76. *Gas-shielded arc welding. Welded joints. Main types, design elements and dimensions*. Moscow, Standartinform Publ., 1976, 37 p. (In Russian).
16. Rykalin N.N. *Raschet teplovikh protsessov pri svarke* [Calculation of thermal processes during welding]. Moscow, MASHGIZ publ., 1951, 296 p.
17. Sidorov V.P. *Teoriya i tekhnologiya svarochnikh protsessov* [Theory and technology of welding processes]. 2nd ed. Tolyatti, TGU publ., 2009, 228 p.
18. Popkov A.M. Calculation of mode parameters of butt joints arc welding according to the specified geometrical parameters of seams. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2003, no. 9, pp. 33–35.
19. Lebedev V.K. et al. *Mashinostroenie* [Mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1999, vol. IV-6, 496 p.
20. L'vov N.S., Gladkov E.A. *Avtomatika i avtomatizatsiya svarochnikh protsessov* [Automatics and automation of welding processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1982, 302 p.
21. Nikolaev G.A. *Svarka v mashinostroenii* [Welding in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979, 512 p.

THE RESEARCH OF TEMPERATURE DEVIATIONS IN WELDING PROCESS DURING THE DISTURBING ACTIONS

© 2015

V.P. Sidorov, Doctor of Engineering, Professor
A.V. Melzitdinova, master-engineer, senior lecturer
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: welded joint quality; weld seam dimensional stabilization; part surface temperature; disturbing factor; mathematical model; deviations in the welding parameters; double argon-arc welding; relation coefficient of disturbance transmission.

Abstract: The authors offered the methods for determining temperature in the welding zone, taking into account the influence of various disturbances. Basing on these methods, the surface temperature of the heat-resistant steel plates welded by double argon-arc welding without cutting edges is calculated. The authors calculated the thermal cycle of selected point on the outer surface of a part at the distance $y=0,6$ cm from the axis of the heating source and obtained the point with the maximum temperature ($x=0,7$ cm), for which the influence of permitted deviations in the nominal values of welding conditions (thermal diffusivity, plate thickness) and welding modes (effective power and welding speed) are determined. The article gives the values of relation coefficient of disturbance transmission (RCDT). It is the controlled parameter reaction for the change in controlling parameter in relative units in the absence of controlling system. It was found that while controlling the point temperature, the relative influence of welding speed exceeds the influence of effective power while in case of regulation of direct weld penetration there is almost no difference. It is advisable to use the welding speed as the controlling parameter since it does not influence the arc power and does not react in the "power source – arc – welding pool" system. According to the proposed method, the study of temperature change of a point with the coordinate at which the maximum penetration takes place ($y=0,6$ cm, $x=1,1$ cm) and a point with $y=0,8$ cm, $x=1,1$ cm. On the basis of the results comparative analysis, to regulate the welding process, it is preferable to select a point with maximum weld penetration as the penetration and temperature deviations at a given point coincide in time.

ВЫБОР АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ ПО ПРИЖОГАМ ЗАКАЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2015

Я.И. Солер, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Д.Ю. Казимиров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
В.Л. Нгуен, аспирант кафедры «Технология машиностроения»
 Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск (Россия)

Ключевые слова: шлифование; прижоги; микротвердость; статистика; среднее; медиана; прецизионность процесса; цифровые технологии.

Аннотация: Разработана методика количественной оценки прижогов на базе цифровых технологий, которая включает три этапа: макросъемку исходной поверхности в отраженных лучах света; ее оцифровку в программе *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* и конвертирование в виде растровых изображений различных оттенков. Ее положительными качествами являются: низкая трудоемкость, экологическая безопасность, возможность широкого использования в любых научных целях и производственных условиях. Она апробирована в условиях маятникового шлифования плоских деталей из закаленной стали 30ХГСА ($\sigma_B=1080$ МПа, $\delta=10\%$). Шлифование вели различными кругами по зернам, твердости и пористости: 25AF46K10V5-ПОЗ, 25AF46L10V5-КФ35, (92А, 25А)F46L6V24, 25AF46M12V5-ПОЗ, ЕКЕ46К3V.

Для подтверждения надежности предложенной инновационной технологии оценки прижогов параллельно проведено исследование микротвердости деталей. Учитывая стохастическую природу шлифования, для обработки наблюдений по обоим выходным параметрам шлифования привлечены статистические методы, которые разделяются на параметрические и непараметрические (в частности, ранговые). Их достоинствами является возможность принятия статистических решений с заданной надежностью, а также оценка режущих способностей кругов не только по мерам положения (средним, медианам), но и рассеяния: стандартам отклонений, размахам и квартильным широтам. Вторая характеристика одномерного распределения частот наиболее важна при шлифовании ответственных деталей на настроенных станках с целью снижения вероятности брака. Показано, что в условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений следует воспользоваться непараметрическим методом, в котором в качестве одномерных распределений частот используются медианы и квартильные широты. Выявлена корреляционная связь между мерами положения для плотностей прижогов и микротвердости при шлифовании абразивными кругами на режиме: $v_k=35$ м/с, $s_{пр}=7$ м/мин, $s_n=1$ мм/дв.ход, $t=0,015$ мм, $z=0,15$ мм, при которой увеличение прижогов сопровождается снижением микротвердости деталей 30ХГСА. Наилучшие результаты по мерам положения занял круг 25AF46K10V5-ПОЗ. По прецизионности шлифования наибольшую стабильность показал круг 25AF46L10V5-КФ35.

ВВЕДЕНИЕ

Прижоги – одна из наиболее распространенных и сложных «болезней» шлифования закаленных сталей жесткими кругами. Их появление может привести к значительному снижению твердости шлифованной поверхности, усталостной прочности, износоустойчивости и, как следствие, долговечности деталей машин [1; 2]. Образование прижогов связано с тепловыми явлениями, возникающими в процессе шлифования металлов. Их источником являются абразивные зерна, которые с учетом расположения в радиальном направлении разделяются на три группы: режущие, давящие и нережущие. Наиболее выступающие абразивные зерна первоначально производят упругую деформацию металла, затем пластическую и по достижении контактных напряжений, превышающих предел прочности металла, срезание стружки. Тепло образуется преимущественно в результате трения абразивных зерен по ювенильной поверхности только что обработанного металла и энергии, расходуемой на упругую и пластическую деформации. При этом на первых двух этапах контакта режущих зерен с металлом температура шлифуемой поверхности оказывается даже выше, чем при снятии стружки. Мгновенный нагрев поверхности заготовки может составлять 700–800 °С и приводить ее к локальному оплавлению. При этом скорость нагрева достигает 5000–6000 °С/с и даже до 10000 °С/с. Тепловое поле заготовки характеризуется высоким градиентом и сосредотачивается в поверхностном слое глубиной до $h=0,1–0,3$ мм (рис. 1). Практически за доли секунды эта температура снижается, т. к. основ-

ная часть тепла отводится в нижележащие слои холодного металла. При интенсивном съеме металла температуры нагрева могут быть выше фазового превращения (линии A_{c1}). Нагретый металл, взаимодействуя с охлаждающей средой, приобретает пониженную или повышенную твердость поверхностного слоя детали. При этом в сталях с мартенситной и сорбитной структурой возможна вторичная закалка [3; 4].

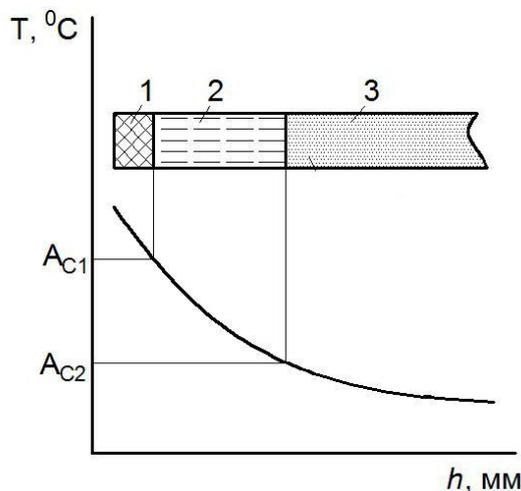


Рис. 1. Распределение температуры по глубине детали: 1 – слой вторичной закалки; 2 – слой вторичного отпуска; 3 – исходное состояние закаленной стали [1]

В работах [5–7] прижоги классифицированы на две группы: закалки и отпуска. В первом случае в результате нагрева металла выше линии A_{c1} (рис. 1) образующийся при шлифовании аустенит при остывании деталей не достигает полного обратного мартенситного превращения. Это связано с тем, что в результате больших удельных давлений, оказываемых абразивными зернами на их поверхности, и скорости движения теплового источника нижняя граница мартенситного превращения смещается ниже 20°C . В силу изложенного на поверхности детали фиксируется структура аустенита закалки, который может иметь две схемы превращений: диффузионную «мартенсит – перлит – аустенит»; бездиффузионную «мартенсит – аустенит». В первом случае протекает выход углерода из кристаллической решетки мартенсита в зоне температуры отпуска, а при дальнейшем повышении нагрева $\alpha \rightarrow \gamma$ превращение и растворение углерода в $\gamma\text{-Fe}$, т. е. образование аустенита. Бездиффузионная схема обратного мартенситного превращения предполагает только сдвиг кристаллической решетки при минимальном времени воздействия теплового источника (10^{-11} с). Прижоги второй группы протекают в третьем превращении отпуска, когда углерод полностью выходит из решетки мартенсита. При этом образуется феррит, а в результате реакции между ним и выделившимся углеродом – цементит (перлит).

Прижогам посвящено большое количество исследований, в которых используются следующие методы их контроля: химическое травление [1; 8]; измерение на поверхности деталей флуктуации физического параметра, в качестве которого принята работа выхода электронов [9]; выявление прижогов по электризации и свечению их зон в ультрафиолетовом свете после нанесения специального вещества на поверхность [10]; рентгеновский [11]; обнаружение прижогов с использованием эффекта Баркгаузена по анализу шумов [12; 13]. Анализ этих работ показывает, что большинство из них обладает высокой трудоемкостью, трудно автоматизируется и не всегда дает количественную оценку прижогов.

Нами разработана методика, впервые апробированная в работе [14], которая позволяет провести количественный контроль прижогов с использованием цифровых технологий. Данный метод включает в себя три этапа: макросъемку исходной поверхности в отраженных лучах света; ее оцифровку в программе *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* и конвертирование в виде растровых изображений цветов с возможными оттенками не более 16. Ее положительными качествами являются: низкая трудоемкость, экологическая безопасность, возможность широкого использования в любых научных целях и производственных условиях. Сказанное в конечном результате позволяет предсказать количественную оценку интенсивности прижогов.

Задачей данной работы является количественная оценка прижогов с использованием инновационной технологии [14], которая позволяет повысить качество изготовления ответственных деталей из закаленной стали 30ХГСА, в частности, путем выбора абразивных кругов по минимальному тепловому воздействию на поверхность.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проведен при следующих неизменных условиях: плоскошлифовальный станок с прямоугольным столом модели 3Г71; детали из закаленной стали 30ХГСА ($\sigma_b=1080$ МПа, $\delta=10\%$) с размерами $L \times B \times H=40 \times 50 \times 40$ мм, шлифуемые по поверхности с размерами $L \times B$; число повторений опытов: $n=10$ – при оценке прижогов, $n=30$ – при измерении микротвердости; СОЖ – 5 %-ная эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7–10 л/мин; правка круга алмазным карандашом перед шлифованием каждой детали; режим обработки – скорость резания $v_k=35$ м/с, продольная подача $s_{np}=7$ мм/мин, поперечная подача $s_n=1$ мм/дв.ход, глубина резания $t=0,015$ мм, операционный припуск $z=0,15$ мм. Шлифование вели абразивными кругами формы 1 с размерами $250 \times 20 \times 76$ мм. Их характеристики представлены кодом $e=\overline{1;5}$, который удобен при статистической обработке наблюдений: 1 – 25AF46K10V5-ПО3; 2 – 25AF46L10V5-КФ35; 3 – (92A, 25A)F46L6V24; 4 – 25AF46M12V5-ПО3; 5 – ЕКЕ46К3V. Инструменты $e=1;4$ изготовлены Лужским абразивным заводом (г. Луга); $e=2;3$ – Петербургским абразивным заводом «Ильич» (г. Санкт-Петербург); $e=5$ – фирмой *Dorfner schleifmittelwerk* (Германия) способом литья из зерен монокорунда ЕКЕ со средней структурой (К) и мягкой твердостью (3). Круги $e=1;2;4$ являются высокопористыми (ВПК), имеющими различные порообразующие добавки: ПО3, КФ35.

После шлифования поверхность изделия обезжирили. Съемку, ее оцифровку и конвертирование вели по методике, представленной в работах [14; 15]. При этом количество прижогов для каждой из деталей $v=\overline{1;10}$, прошлифованных кругом e , оценивается инновационным показателем:

$$P_{ev} = \left(\frac{\sum P_{inp}}{\sum P_i} \right)_{ev} \times 100\%, \quad e = \overline{1;5}, \quad (1)$$

где P_{ev} – плотность прижогов поверхности v -й детали в процентах;

$\sum P_{inp}$ – общее количество пикселей цветов прижогов $i = \overline{1;3}$,

$\sum P_{ei}$ – общее количество всех пикселей при переменной $i = \overline{1;15}$ (см. таблицу 1).

Микротвердость шлифованных поверхностей деталей HV_e измерена на приборе ПМТ-3 по методике [16]. Ее величины позволяют оценить адекватность предлагаемой методики количественного содержания прижогов и выявить физические явления, протекающие при шлифовании деталей.

Для анализа экспериментальных данных в работе используются статистические подходы, обусловленные стохастической природой процесса шлифования. Их достоинствами является возможность оценки надежности принимаемых решений, а также режущих способностей кругов не только по мерам положения, но и рассеяния. Вторая характеристика одномерного распределения частот наиболее важна при шлифовании ответственных деталей на настроенных станках с целью

Таблица 1. Частотное распределение встречаемости пикселей каждого цвета

Цвет, $i = \overline{1;15}$	Количество пикселей	RGB-код	HTML-код
1	3705906	(128, 128, 0)	#808000 olive
2	1401039	(0, 128, 0)	#008000 green
3	24061	(128, 0, 0)	#800000 maroon
4	1337730	(0, 128, 128)	#008080 teal
5	72484	(128, 128, 128)	#808080 fractal
6	25018	(255, 255, 255)	#FFFFFF white
7	20673	(192, 192, 192)	#C0C0C0 silver
8	12032	(0, 0, 0)	#000000 black
9	4415	(255, 255, 0)	#FFFF00 yellow
10	2986	(0, 0, 128)	#000080 navy
11	820	(128, 0, 128)	#800080 purple
12	224	(0, 255, 255)	#00FFFF cyan
13	65	(0, 0, 255)	#0000FF blue
14	9	(0, 255, 0)	#00FF00 lime
15	8	(255, 0, 0)	#FF0000 red

снижения вероятности брака. Полученные параметры прижогов поверхности (1) и микротвердости представляют собой случайные величины (СВ), образующие независимые множества:

$$\{y_{ev}\}, e = \overline{1;5}, v = \overline{1;n}. \quad (2)$$

В технических приложениях используют два направления статистических методов: параметрическое и непараметрическое (в частности, ранговое). Характеристиками одномерного распределения частот для (2) служат [17; 18]: средние $\bar{y}_e = y_{e\bullet}$, стандарты отклонений $(SD)_e$, размахи $R_e = |y_{\max} - y_{\min}|_e$ – для первого направления; медианы \tilde{y}_e , квартильные широты $KШ_e = |y_{0,75} - y_{0,25}|_e$ – для второго направления. Первая из указанных частот характеризует меру положения (опорное значение) СВ, а последующие – меры рассеяния (прецизионность). Сдвиг между \tilde{y}_e и $y_{e\bullet}$ свидетельствует об асимметрии (скошенности) кривых распределений [17]: $As_e = [3(y_{e\bullet} - \tilde{y}) / SD]_e, e = \overline{1;5}$.

Параметрический метод статистики используется в том случае, когда (2) обладают свойствами гомоскедастичности (синонимы однородность или гомогенность дисперсий отклонений) и нормальности распределений. При нарушении этих ограничений рекомендуется, в частности, привлекать ранговый метод, который не связан с конкретным семейством распределений и его свойствами. В работе [17] изложены методика выбора статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних $\hat{y}_{e\bullet}$ и медиан $m\hat{y}_e, e = \overline{1;5}$. На первом этапе для (2) проводится одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия между уровнями мер положения, а на последующем – их множественный анализ, который завершается

поиском ожидаемых аналогов для переменной $e = \overline{1;5}$. Обработка наблюдений (2) требует большого объема вычислений и проведена в программной среде *Statistica* 6.1.478.0. Влияние непараметрического метода на меры положения оценивается медианными коэффициентами при неизменном $e = \overline{1;5}$:

$$K_{me} = (\tilde{y} / y_{e\bullet})_e, \quad (3)$$

$$\hat{K}_{me} = (m\hat{y} / \hat{y}_{e\bullet})_e. \quad (4)$$

Оценку работоспособности кругов $e = \overline{2;5}$ относительно базового ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ($e=1$) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (2) [16; 19]:

$$K_e = \tilde{y}_e / \tilde{y}_1, \quad (5)$$

$$\hat{K}_e = m\hat{y}_e / m\hat{y}_1, \quad (6)$$

$$K_{cre1} = SD_1 / SD_e, \quad (7)$$

$$K_{cre2} = R_1 / R_e, \quad (8)$$

$$K_{cre3} = KШ_1 / KШ_e. \quad (9)$$

Здесь индексы $q = \overline{1;3}$ в (7)–(9) отражают принятые меры рассеяния: 1 – по SD_e , 2 – по R_e ; 3 – по $KШ_e$. Если предсказаны: $(K_e, \hat{K}_e) > 1$ и $K_{creq} < 1, q = \overline{1;3}$, то меры положения и рассеяния выходных параметров процесса при шлифовании кругами $e = \overline{2;5}$ превышают аналоги для базового ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ($e=1$) и уступают ему по выбранным критериям стабильности процесса;

в противном случае – их превосходят. Коэффициенты (4), (6)–(9) необходимы для комплексной оценки режущих способностей абразивных кругов и расширения информационной базы при многокритериальном управлении процессом шлифования с использованием моделей многомерного дисперсионного анализа с учетом конструктивных особенностей и служебного назначения деталей [14]. Опытный медианный коэффициент (3) позволяет оценить скошенность кривых распределений, а (5) – возможные ошибки при оценке режущих способностей кругов по опытным мерам положения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера на рис. 2 представлены фотофайлы шлифованной поверхности детали $v=9$ кругом (92A, 25A)F46L6V24. Результаты обработки фотофайлов данной детали содержатся в таблице 1, в которой зарегистрировано количество пикселей для различных цветов $i=1;15$. Из рис. 2 б и таблицы 1 видно, что количество пикселей прижогов $i=1;3$ составляет: 3705906 (128, 128, 0) – *olive* для $i=1$; 1401039 (0, 128, 0) – *green* для

$i=2$; 24061 (128, 0, 0) – *maroon* для $i=3$, которые расположены в последовательности снижения интенсивности прижогов. Аналогичным образом был выполнен поиск прижогов по другим опытам и кругам.

В таблице 2 показаны результаты проверки однородности дисперсий с помощью трех критериев: Хартли, Кохрена, Бартлетта; Левене и Брауна-Форсайта. Первая группа из трех статистик в программе представлена общей совокупностью. Знаки «←» в последнем столбце таблицы 2 означают, что нуль-гипотезы (H_0) об однородности дисперсий наблюдений для обоих параметров отклонены в полном объеме. Это позволяет утверждать, что дисперсии наблюдений для прижогов и микротвердостей являются неоднородными.

Нормальность распределений (H_0) множеств (2) проверены с помощью критерия Шапиро-Уилка. Из теоретической статистики известно, что H_0 подтверждается при удовлетворении неравенств [16]: $\alpha_e > 0,5$, $e=1;5$. Из таблицы 3 видно, что наблюдения (2) аппроксимируются кривой нормального распределения при шлифовании всеми кругами за исключением: ВПК 25AF46L10V5-КФ35 ($e=2$) с уровнем надежности

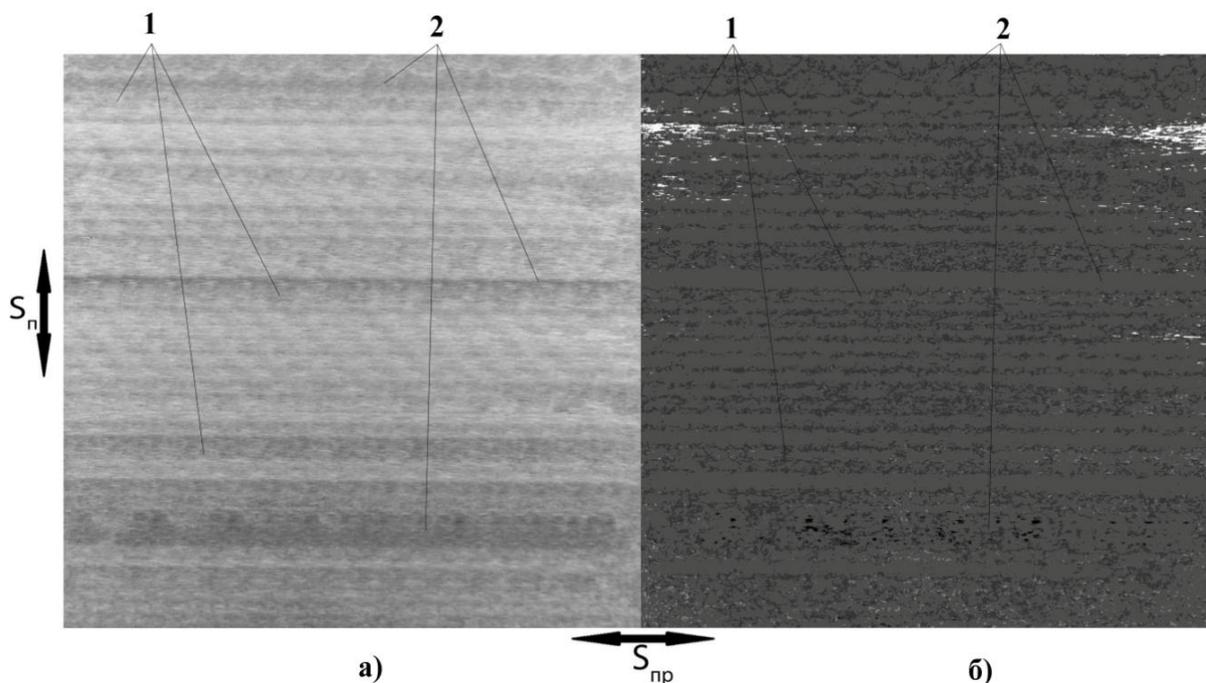


Рис. 2. Фотофайлы шлифованной поверхности детали $v=9$ кругом (92A, 25A)F46L6V24: а – исходный фотофайл; б – фотофайл, представленный 16-тибитным цветным рисунком; 1 – участки без прижогов, 2 – с прижогом

Таблица 2. Проверка однородности дисперсий для прижогов и микротвердости при принятом уровне значимости $\alpha=0,05$

Параметр	Критерий	Расчетный уровень значимости α	Принятие H_0
P_e	Хартли, Кохрена, Бартлетта	0,9754	←
	Левене	0,9418	←
	Брауна-Форсайта	0,8093	←
HV_e	Хартли, Кохрена, Бартлетта	0,9657	←
	Левене	0,9801	←
	Брауна-Форсайта	0,9748	←

Таблица 3. Проверка нормальности распределений H_0 по критерию Шапиро-Уилка

Параметр	Круги, $e = \overline{1;5}$	Расчетный уровень значимости α_e	Принятие H_{0e}
P_e	1	0,7767	+
	2	0,1384	-
	3	0,5490	+
	4	0,8455	+
	5	0,0411	-
HV_e	1	0,5151	+
	2	0,7809	+
	3	0,8040	+
	4	0,3207	-
	5	0,5762	+

$\alpha_2=0,1384$ и круга ЕКЕ46К3V ($e=5$) – $\alpha_5=0,0411$ для прижогов; ВПК 25AF46M12V5-ПО3 ($e=4$) – $\alpha_4=0,3207$ для микротвердостей. Нарушение однородности дисперсий для прижогов и микротвердостей, которые являются обязательными условиями применимости параметрического метода статистики, вынуждает обратиться к непараметрическому аналогу. Параметрический метод приведен в качестве справочного с целью подтверждения его несостоятельности.

На рис. 3 представлены описательные статистики прижогов (а) и микротвердостей (б) на базе непараметрического метода. На них «квадратом» выделены меры положения медиан; «прямоугольник» ограничивает КШ_e, включающие 50 % наблюдений, и «усики» – размахи.

Из рис. 3 видно, что при плоском шлифовании деталей из закаленной стали 30ХГСА снижение твердости кругов сопровождается уменьшением прижогов. При этом детали, шлифуемые ВПК 25AF46M12V5-ПО3 ($e=4$), имеющим самую высокую степень твердости (M), дают наибольшие прижоги $\tilde{P}_4=43,58\%$, а ВПК 25AF46K10V5-ПО3 ($e=1$) – самым мягким кругом (K), характеризуются снижением прижогов до $\tilde{P}_1=18\%$. Сказанное объясняется тем, что мостики связи, скрепляющие отдельные зерна, при резании упруго деформируются. У мягких кругов данный процесс протекает в большей степени, чем у твердых, содержащих повышенное количество связи. Это позволяет выступающим зернам в мягких кругах во время работы частично вдавливаясь в его «черепок». Тогда припуск снимается большим числом равновыступающих абразивных зерен при меньшей толщине среза, в силу чего уменьшается интенсивность тепловых импульсов и температур в зоне шлифования [1].

Рис. 3 иллюстрирует, что наибольшей величине опытной медианы микротвердостей соответствует наименьшая опытная медиана прижогов деталей. Сказанное позволяет утверждать, что тепловой источник при шлифовании вызвал разупрочнение поверхностей (прижоги вторичного отпуски) закаленных деталей 30ХГСА без вторичной закалки [5; 12; 13]. Полученные результаты позволяют констатировать, что предложенный метод количественной оценки прижогов с использованием цифровых технологий по мерам положения показал высокую адекватность и может использоваться как в научных целях, так и в производственных условиях.

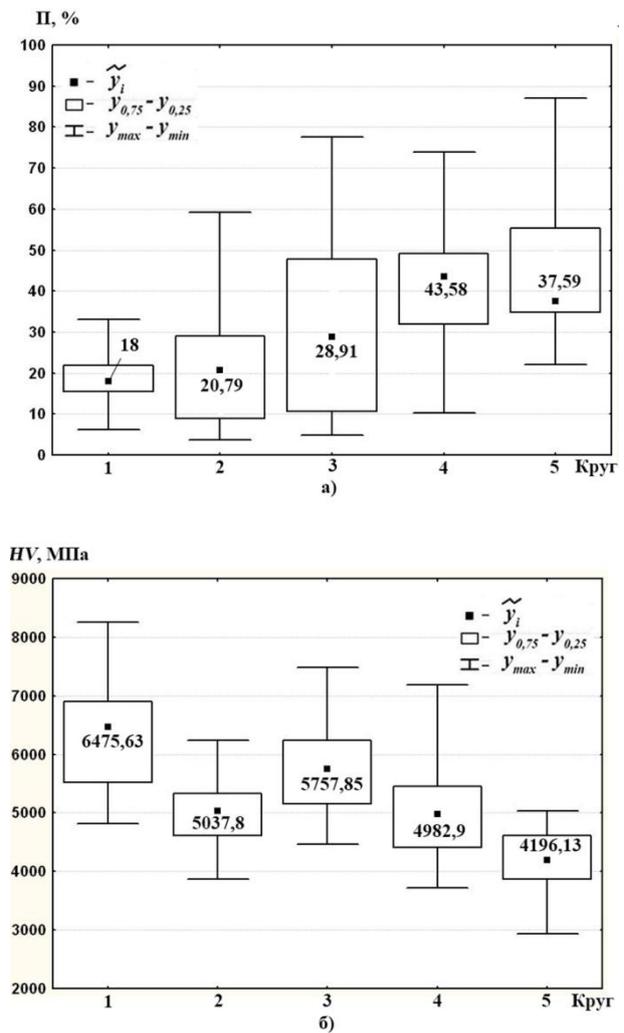


Рис. 3. Описательные непараметрические статистики для параметров P_e (а) и HV_e (б), $e = \overline{1;5}$

В таблице 4 представлены опытные и ожидаемые меры положения для прижогов и микротвердостей деталей, шлифованных кругами $e=\overline{1;5}$. По опытным коэффициентам K_{me} (3) выявлено, что кривые формы распределений для параметра прижогов чаще характеризуются положительной асимметрией: в четырех из пяти случаев они предсказаны меньше единицы, а для

Таблица 4. Влияние кругов на меры положения и коэффициенты (3)–(6)

Параметр	Круги e	$y_{e\bullet}$	\tilde{y}_e	$\hat{y}_{e\bullet}$	$m\hat{y}_e$	$K_{me}(3)$	$\hat{K}_{me}(4)$	$K_e(5)$	$\hat{K}_e(6)$
P_e , %	1	19,29	18,00	27,85	22,57	0,93	0,81	1,00	1,00
	2	24,41	20,79	31,54	29,77	0,85	0,94	1,16	1,32
	3	33,52	28,91	33,39	29,77	0,86	0,89	1,61	1,32
	4	42,62	43,58	35,85	32,72	1,02	0,91	2,42	1,45
	5	47,12	37,59	38,31	32,72	0,80	0,85	2,09	1,45
$HV_{e\bullet}$ МПа	1	6329,83	6475,63	6282,63	6116,74	1,02	0,97	1,00	1,00
	2	4974,54	5037,80	4998,22	5010,35	1,01	1,00	0,78	0,82
	3	5763,42	5757,85	5810,62	6116,74	1,00	1,05	0,89	1,00
	4	5021,90	4982,90	4998,22	5010,35	0,99	1,00	0,77	0,82
	5	4169,93	4196,13	4169,93	4196,13	1,01	1,01	0,65	0,69

Примечание. Круги e : 1 – 25AF46K10V5-П03; 2 – 25AF46L10V5-КФ35; 3 – (92А, 25А)F46L6V24; 4 – 25AF46M12V5-П03; 5 – ЕКЕ46К3V.

параметра микротвердостей – отрицательной асимметрией, поскольку в четырех из пяти случаев оказались больше единицы. Наименьшая опытная медиана по прижогам и наибольшая по микротвердостям получены при шлифовании ВПК 25AF46K10V5-П03 ($e=1$)– $\tilde{P}_1=18\%$,

$\tilde{H}V_1=6475,63$ МПа, что позволяет рекомендовать его для шлифования деталей из закаленной стали 30ХГСА. Наихудшие результаты по состоянию поверхности имеют место при работе кругами: по прижогам – 25AF46M12V5-П03 ($e=4$) при $\tilde{P}_4=43,58\%$; по микротвердостям – ЕКЕ46К3V ($e=5$) при $\tilde{H}V_5=4196,13$ МПа. В общем случае следует констатировать, что для кругов $e=2;5$ опытные медианы \tilde{P}_e возрастают по сравнению с базовым $e=1$: в 1,16 раза для ВПК 25AF46L10V5-КФ35 ($e=2$); в 1,61 раза для круга (92А, 25А)F46L6V24 ($e=3$); в 2,42 раза для ВПК 25AF46M12V5-П03 ($e=4$) и в 2,09 раза для круга ЕКЕ46К3V. По опытным медианам микротвердостей круги $e=1; 3; 4; 5$ образуют соответственно убывающую последовательность от 6475,63 до 4196,13 МПа, а круг $e=2$ занимает третью позицию при $\tilde{H}V_2=5037,8$ МПа. По прогнозируемым мерам положения отмеченные тенденции выглядят менее убедительно, поскольку некоторые из ожидаемых опорных значений представлены общими величинами мер положения для равноценных кругов по режущим свойствам.

Как видно из таблицы 4, они зависят от выходного параметра процесса. По прижогам к ним относятся круги $e=2;3$ ($m\hat{P}_\bullet=29,77\%$) и круги $e=4;5$ ($m\hat{P}_\bullet=32,72\%$), а по микротвердостям – круги $e=1;3$ ($m\hat{H}V_\bullet=6116,74$ МПа) и круги $e=2;4$ ($m\hat{H}V_\bullet=5010,35$ МПа).

Из таблицы 4 видно, что при плоском шлифовании деталей из закаленной стали 30ХГСА ВПК из электрокорунда белого 25А ($e=1; 2; 4$) и кругом (92А, 25А) обладают преимуществами перед инструментом из монокорунда ($e=5$). При этом детали при шлифовании кругом ЕКЕ46К3V имеют наибольшие прижоги $m\hat{P}_5=32,72\%$ и наименьшую микротвердость $m\hat{H}V_5=4193,13$ МПа. Преимущества кругов $e=1;4$ перед кругом из монокристаллического корунда следует объяснить тем, что радиус округления зерен электрокорунда белого меньше, чем у зерен монокорунда. Они содержат большее количество острых вершин: 20% – для 25А, 11% – для зерен монокорунда [20]. В то же время зерна 25А имеют твердость по Моссу 9,03, а монокристаллический корунд – 9. Все вместе изложенное позволяет им легче внедряться в металл и снижать температуру шлифования и прижоги на поверхности деталей.

В таблице 5 представлены результаты оценки стабильности образования прижогов и формирования

Таблица 5. Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния и коэффициентам стабильности (7)–(9)

Параметр	Круги e	SD_e	R_e	$KШ_e$	$K_{стаб}$		
					$q=1(7)$	$q=2(8)$	$q=3(9)$
P_e , %	1	7,34	26,98	6,34	1,00	1,00	1,00
	2	19,18	55,57	20,27	0,38	0,49	0,31
	3	24,65	72,89	37,08	0,30	0,37	0,17
	4	17,70	63,75	17,08	0,41	0,42	0,37
	5	22,82	65,00	20,49	0,32	0,42	0,31
$HV_{e\bullet}$ МПа	1	914,123	3443,68	1384,40	1,00	1,00	1,00
	2	589,657	2364,95	723,80	1,55	1,46	1,91
	3	755,362	3020,95	1082,00	1,21	1,14	1,28
	4	777,392	3466,58	1041,00	1,18	0,99	1,33
	5	536,993	2098,33	742,15	1,70	1,64	1,87

Примечание. Круги e : 1 – 25AF46K10V5-П03; 2 – 25AF46L10V5-КФ35; 3 – (92А, 25А)F46L6V24; 4 – 25AF46M12V5-П03; 5 – ЕКЕ46К3V.

микротвердостей. По результатам ОДА и множественного анализа (2) предпочтение отдано квартильным широтам и полученным на их базе коэффициентам $K_{\text{тез}}$, $e=1;5$. Выявлено, что наилучшая стабильность процесса по прижогам предсказана при шлифовании ВПК 25AF46K10V5-ПОЗ ($e=1$) – $KШ_1=6,34\%$, наихудшая – для круга из хромтитанистого электрокорунда (92А, 25А)F46L6V24 ($e=3$) – $KШ_3=37,08\%$. Круги $e=4; 2; 5$ последовательно занимают второе, третье и четвертое места. Параметрический метод «на чужом поле» показал близкие результаты. По непараметрической мере рассеяния микротвердостей наилучшая стабильность процесса предсказана при шлифовании ВПК 25AF46L10V5-КФ35 ($e=2$) – $K_{\text{ст}23}=1,91$ и кругом ЕКЕ46К3V ($e=5$) – $K_{\text{ст}53}=1,87$. Третья и четвертая позиции отданы последовательно ВПК 25AF46M12V5-ПОЗ ($e=4$) и кругу (92А, 25А)F46L6V24 ($e=3$). Наихудшие результаты показал ВПК 25AF46K10V5-ПОЗ ($e=1$) – $K_{\text{ст}13}=1$, который по мерам положения признан наилучшим. Сказанное относительно стабильности процесса по прижогам и микротвердостям наглядно иллюстрирует рис. 3.

Считаем, что точность измерений микротвердости выше по сравнению с прижогам. При этом дополнительно увеличен объем выборки с 10 до 30 опытов. В связи с изложенным окончательные выводы по стабильности работы кругов целесообразно вести по $KШ_e$, полученным для микротвердости. По результатам данного эксперимента метод поиска процентного содержания прижогов следует использовать для оценки мер положения и выявления физических явлений шлифования, протекающих в зоне резания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Подтверждена целесообразность привлечения методики количественного контроля прижогов с использованием цифровых технологий, которая апробирована при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА.

2. Возрастание прижогов, сопровождаемое снижением микротвердости поверхности, свидетельствует о том, что при шлифовании деталей доминирует тепловое разупрочнение поверхности без вторичной закалки. Для их снижения целесообразно использовать круги меньшей твердости.

3. Установлено, что наибольшее снижение прижогов обеспечивает ВПК 25AF46K10V5-ПОЗ, а наибольшую прецизионность процесса – ВПК 25AF46L10V5-КФ35.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эльянов В.Д., Куликов В.Н. Прижоги при шлифовании. М.: НИИМАШ, 1974. 63 с.
2. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
3. Рудометов Ю.И. Применение абразивных инструментов, пропитанных суспензиями импрегнаторов // СТИН. 2012. № 11. С. 34–37.
4. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
5. Лебедев В.Г., Клименко Н.Н., Аль-Аджейлат С.А. Механизм образования прижогов при шлифовании

деталей из закаленных сталей // НАУКОВИ НОТАТ-КИ: міжвуз. зб. 2013. Вып. 40. С. 141–143.

6. Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Формирование прижогов отпуска при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ // Проблемы техники. 2007. № 4. С. 128–150.
7. Аль-Аджейлат С.А., Лебедев В.Г. Энергетические условия образования прижогов закалки при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами КНБ // Проблемы техники. 2008. № 1. С. 130–152.
8. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface Temper Etch Inspection After Grinding, 1992.
9. Кочаров Э.А., Олешко В.С. Неразрушающий способ экспрессного выявления зон на поверхности металлических деталей со шлифовочными или эксплуатационными прижогам: патент РФ № 2407996; заявл. № 2008129897/28 от 27.01.2010.
10. Медведев М.Н., Мельникова Е.Н. Способ выявления прижогов на металлах, например на титане и его сплавах, и вещество для его осуществления: патент РФ № 2044302; заявл. № 92015489/25 от 30.12.1992.
11. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
12. Shaw B.A., Evans J.T., Wojtas A.S., Suominen L. Grinding process control using the magnetic Barkhausen noise method // Electromagnetic nondestructive evaluation (II). Italy, 1998. P. 82–91.
13. Суоминен Л. Обнаружение дефектов шлифования деталей из ферромагнитных материалов с использованием эффекта Баркгаузена // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 2. С. 74–78.
14. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Нгуен В.Л. Количественная оценка прижогов при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40Х абразивными кругами различной пористости // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 1. С. 6–19.
15. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю. Подходы к оценке опорной части поверхности шлифованных плоскостей титановых деталей абразивными кругами Norton // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5. С. 142–150.
16. Солер Я.И., Лгалов В.В. Изучение микротвердости формообразующих деталей штамповой оснастки при абразивном шлифовании // Вестник ИрГТУ. 2012. № 7. С. 48–54.
17. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
18. Hollander M., Wolfe D.A. Nonparametric statistical methods. 2nd ed. New York: Willy-Interscience, 1999. 787 p.
19. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. Основной метод определения повторяемости воспроизводимости стандартного метода измерений. М.: Изд-во стандартов, 2002. 58 с.
20. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 616 с.

REFERENCES

1. Elyanov V.D., Kulikov V.N. *Prizhogi pri shlifovanii* [Burns while grinding]. Moscow, NIIMASh publ., 1974, 63 p.
2. Suslov A.G., ed. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Parts surface engineering]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008, 320 p.
3. Rudometov Yu.I. Application of abrasive tools saturated with the impregnator suspension. *STIN*, 2012, no. 11, pp. 34–37.
4. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of materials grinding]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974, 320 p.
5. Lebedev V.G., Klimenko N.N., Al-Adjelat S.A. Mechanism of formation of burn marks when grinding parts of hardened steel. *Naukovi notatki: mizhvuz. zbirnik*, 2013, no. 40, pp. 141–143.
6. Al-Adjelat S.A., Lebedev V.G. Tempering burn formation when grinding heavy presses slideways by CBN wheels. *Problemi tekhniki*, 2007, no. 4, pp. 128–150.
7. Al-Adjelat S.A., Lebedev V.G. Energy conditions for hardening burns formation when grinding heavy presses slideways by CBN wheels. *Problemi tekhniki*, 2008, no. 1, pp. 130–152.
8. ANSI/AGMA 2007-B92. Surface Temper Etch Inspection After Grinding, 1992.
9. Kocharov E.A., Oleshko V.S. *Nerazrushayushchiy sposob ekspressnogo viyavleniya zon na poverkhnosti metallicheskih detaley so shlifovochnimi ili ekspluatatsionnimi prizhogami* [Nondestructive method of express-determination of areas on metal parts surface with grinding or operating burns]. Patent RF no. 2407996, 2010.
10. Medvedev M.N., Melnikov E.N. *Sposob viyavleniya prizhgov na metallakh, naprimer na titane i ego splavakh, i veshchestvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of determination of burns on metals, for example, titanium and its alloys, and the substance for its implementation]. Patent RF no. 2044302, 1992.
11. Geller Yu.A. *Instrumentalnie stali* [Instrument steels]. Moscow, Metallurgiya publ., 1983, 527 p.
12. Shaw B.A., Evans J.T., Wojtas A.S., Suominen L. Grinding process control using the magnetic Barkhausen noise method. *Electromagnetic nondestructive evaluation (II)*. Italy, 1998, pp. 82–91.
13. Suominen L. Detecting Grinding Damage in Gears with the Barkhausen Noise. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2011, no. 2, pp. 74–78.
14. Soler Y.I., Kazimirov D., Nguyen V.L. Quantitative assessment of burns while flat grinding hardened parts made of steel 37Cr4 by abrasive wheels of different porosity. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenti)*, 2015, no. 1, pp. 6–19.
15. Soler Y.I., Kazimirov D.Y. Principles for the estimation of a bearing area of polished planes of titanium parts by abrasive wheels Norton. *Fundamentalnie i prikladnie problemi tekhniki i tekhnologii*, 2014, no. 5, pp. 142–150.
16. Soler Y., Lgalov V. Study of shaping die tooling parts microhardness abrasive grinding. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 7, pp. 48–54.
17. Zaks L. *Statisticheskoe otsenivanie* [Statistical estimation]. Moscow, Statistika publ., 1976, 598 p.
18. Hollander M., Wolfe D.A. *Nonparametric statistical methods*. 2nd ed. New York, Willy-Interscience, 1999, 787 p.
19. *GOST R ISO 5725-2-2002*. Accuracy (trueness and precision) of methods and measurements results. P.2. Key method of determination of reproducibility repeatability of standard method of measurements. Moscow, Izdatelstvo standartov publ., 2002, 58 p. (In Russian).
20. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Technology of metals grinding]. Stariy Oskol, TNT publ., 2013, 616 p.

SELECTION OF ABRASIVE WHEELS ACCORDING TO THE GRINDING BURNS OF HARDENED PARTS USING DIGITAL TECHNOLOGIES

© 2015

Ya.I. Soler, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Mechanical Engineering Technology»

D.Yu. Kazimirov, candidate of technical sciences,
assistant professor of the Department «Mechanical Engineering Technology»

V.L. Nguyen, postgraduate student of the Department «Mechanical Engineering Technology»
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk (Russia)

Keywords: grinding; burns; microhardness; statistics; average; median; process precision; digital technologies.

Abstract: The authors developed the procedure of quantitative assessment of grinding burns on the base of digital technologies. This procedure includes three steps: macrophotography of original surface in the reflected light rays; its digitization using *Adobe Photoshop CS6 13.1.2* software and its conversion in the form of raster images of different colours. The advantages of this method are: low labor input, environmental safety and the possibility of wide use for any scientific purpose and in any industrial conditions. It was tested within the pendulum grinding of flat parts made of 30ChGSA hardened steel ($\sigma_{UST}=1080$ MPa, $\delta_E=10\%$). The parts were ground by different against grains, hardness and porosity wheels: 25AF46K10V5-PO3, 25AF46L10V5-KF35, (92A, 25A)F46L6V24, 25AF46M12V5-PO3, EKE46K3V.

To prove the reliability of this innovative technology of grinding burns assessment, the authors carried out the study of parts microhardness. Taking into account the stochastic nature of grinding, to process the observation results on both grinding output parameters, the authors used the statistical methods which are divided into parametric and nonparametric (in particular, the rank methods). Statistical methods are. The advantages of these methods are the possibility of taking statistical decisions with the given reliability, as well as the assessment of cutting wheels ability not only according to the position measures (averages, medians), but also according to the measures of dispersion: deviations standards, ranges and quartile latitudes. The measure of one-dimension latitudes dispersion is more important while grinding essential parts on pre-set machines to reduce the probability of rejected parts. The study showed that in the conditions of homoscedasticity and normality of distributions violations, it is necessary to use the non-parametric method, wherein the medians and quartile latitudes are used as one-dimensional frequency distributions. The authors revealed the correlation between the position measures for burn density and microhardness while grinding by abrasive wheels using the mode: $v_c=35$ m/s, $s_{lo}=7$ m/min, $s_{tr}=1$ mm/double pass, $t=0,015$ mm, $z=0,15$ mm, when the increase of burns is accompanied by the reduction of 30ChGSA parts microhardness. The best results according to the position measures were shown by 25AF46K10V5-PO3 wheel, and according to the grinding accuracy – 25AF46L10V5-KF35 wheel

ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ТОКАРНЫХ РЕЗЬБОВЫХ РЕЗЦОВ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

© 2015

В.П. Табаков, доктор технических наук, профессор

Д.И. Сагитов, кандидат технических наук

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: режущий инструмент; износостойкие покрытия; резьба; тепловое состояние инструмента.

Аннотация: Процесс нарезания резьбы характеризуется более неблагоприятными факторами процесса резания, чем обычное непрерывное точение. В связи с этим актуальной задачей является минимизировать воздействие этих факторов на режущий инструмент, и, следовательно, повысить его работоспособность. Одним из путей повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение на его рабочие поверхности износостойких покрытий, поэтому важной задачей при разработке новых более эффективных составов износостойких покрытий является оценка их влияния на тепловое состояние режущего инструмента. В статье представлены результаты исследований теплового состояния резьбовых резцов с однослойными одно- и многоэлементными нитридными покрытиями TiN, TiCrN и TiCrZrN, которые были нанесены на токарные резьбовые пластины полного профиля методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой. Показано влияние схемы нарезания резьбы на контактные характеристики процесса резания. Выявлены особенности деформации стружки при профильной схеме резания, которые позволили разработать методику расчета температурных полей в режущем клине резьбового резца. Исследованиями установлено влияние схемы нарезания резьбы и износостойких покрытий на показатели теплового состояния резьбовых резцов, на распределение температурных полей в режущем клине резьбовых резцов, на его контактных площадках и на тепловой баланс процесса резьбонарезания. Показано влияние покрытий на прогреваемый объем материала режущей части инструмента. На основе проведенных исследований предложены новые износостойкие покрытия многослойной архитектуры.

Условия резания на операциях резьбонарезания характеризуются рядом особенностей, основными из которых являются большая деформация стружки из-за течения металла от двух и более режущих кромок, одновременно участвующих в процессе резания, интенсивное трение по вспомогательным задним поверхностям, высокая теплонапряженность вершин режущего инструмента [1; 2]. Данные особенности, а также физико-химические процессы, протекающие на контактных площадках, вызывают интенсивный износ режущего инструмента. С целью минимизировать воздействие этих факторов на режущий инструмент и, следовательно, повысить его работоспособность на его рабочие поверхности наносят износостойкие покрытия [3–9]. Важной задачей при разработке новых более эффективных составов износостойких покрытий является оценка их влияния на тепловое состояние режущего инструмента.

Исходя из этого, целью работы является оценка теплового состояния токарных резьбовых резцов с износостойкими покрытиями, работающих в стесненных условиях резания.

Исследовали влияние однослойных износостойких покрытий на контактные характеристики процесса ре-

зания и тепловое состояние режущего клина инструмента при нарезании метрической резьбы на заготовках из стали 30ХГСА. Использовали токарные резьбовые пластины полного профиля CoroThread™ R.166 фирмы Sandvik Coromant (Швеция) из сплава H13A. На резьбовые пластины методом конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой наносили однослойные одно- и многоэлементные нитридные покрытия TiN, TiCrN и TiCrZrN. Контактные характеристики процесса резания определяли по методике работы [10], тепловое состояние оценивали по методике работы [11]. Распределение температур и напряжений в режущем клине инструмента строили с помощью пакета прикладных программ ANSYS.

Принимая во внимание, что тепловое состояние режущего инструмента определяется условиями пластического деформирования в зоне стружкообразования, на первом этапе исследовали контактные характеристики процесса резьбонарезания. Результаты исследований влияния износостойких покрытий на контактные характеристики процесса нарезания резьбы представлены в табл. 1.

Процесс резьбонарезания по профильной схеме резания характеризуется тяжелыми условиями

Таблица 1. Контактные характеристики процесса резьбонарезания

Покрытие	C_p , мм	K_L	P_Z , Н	P_y , Н	q_N , МПа	q_F , МПа
Без покрытия	1,32/1,2	1,58/1,95	4070/5090	1600/2000	167/233	64/94
TiN	0,7/0,67	1,36/1,68	3550/4440	1340/1680	285/346	98/131
TiCrN	0,79/0,7	1,4/1,71	3570/4460	1360/1700	274/308	95/119
TiCrAlN	0,88/0,73	1,44/1,8	3580/4470	1380/1720	264/277	90/110
TiCrZrN	0,9/0,75	1,48/1,86	3590/4480	1380/1730	257/271	89/107

Примечание. Данные представлены для последнего прохода резьбового резца; $V=120$ м/мин; $r=3$ мм; в числителе значения параметров для генераторной, в знаменателе – для профильной схемы нарезания резьбы.

стружкообразования. Установлено, что микротвердость стружки при нарезании резьбы по профильной схеме больше по сравнению с генераторной на 10...30 % в зависимости от ширины стружки. При этом различие в величинах микротвердости стружки для профильной и генераторной схем нарезания резьбы увеличивается по мере приближения к вершине резцового резца. Данный факт подтверждает более тяжелые условия стружкообразования для профильной схемы резания.

Применение износостойких покрытий (рис. 1) ведет к уменьшению микротвердости стружки вследствие снижения силовой нагрузки на режущий клин резцового резца в результате нанесения покрытий. При этом степень изменения микротвердости вдоль ширины стружки различна в зависимости от схемы резбонарезания.

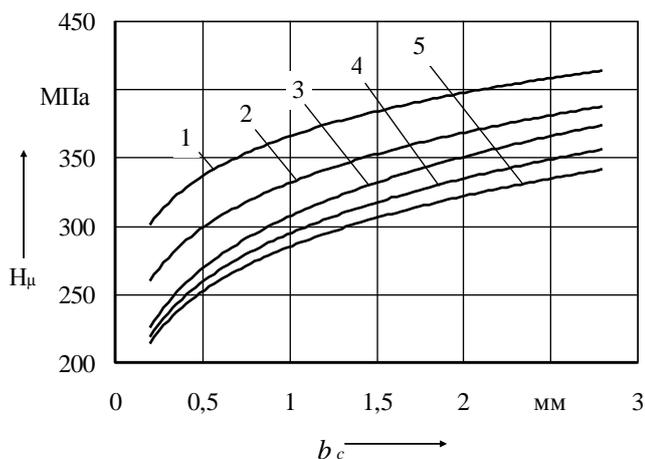


Рис. 1. Распределение микротвердости H_c стружки по ее ширине b_c при нарезании резьбы на заготовке из стали 38ХГН по профильной схеме резания: 1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – TiCrN; 4 – TiCrAlN; 5 – TiCrZrN; $V=120$ м/мин, $P=3$ мм

Для профильной схемы характерно меньшее снижение микротвердости у вершины резца и наибольшее – на противоположной стороне стружки. При генераторной схеме резания влияние покрытий на микротвердость по всей ширине стружки примерно одинаковое. Полученные результаты говорят о том, что в наиболее стесненных участках зоны стружкообразования покрытие в меньшей степени влияет на процесс деформации стружки. По мере удаления от вершины влияние покрытий возрастает.

Для оценки влияния покрытий на контактные характеристики процесса резания (коэффициент укорочения стружки K_L и составляющие силы резания P_z, P_y, P_x) при профильной схеме нарезания резьбы использовали специальную заготовку, позволяющую исключить из процесса резания вершину резца, где происходит «наложение потоков» стружки от двух режущих кромок. Результаты исследований (табл. 2) показали, что влияние покрытий на коэффициент укорочения стружки K_L и составляющие силы резания больше проявляется при резании, исключающем из процесса вершину резца, по сравнению с обычной профильной схемой. Снижение коэффициента укорочения стружки K_L и составляющих силы резания P_z, P_y и P_x при нанесении покрытий TiN в первом случае составило соответственно 16,5 % и 22...17 %, для обычной профильной схемы – соответственно 13,8 % и 16...12,7 %.

Рассмотренные особенности деформирования стружки при профильной схеме резания отражаются на влиянии покрытий на характеристики процесса резания. Профильная схема резания характеризуется большими значениями коэффициента укорочения стружки, сил резания и контактных нагрузок. Величина коэффициента K_L и составляющих P_z, P_y, P_x для профильной схемы резания выше по сравнению с генераторной в среднем на 25 %. Нанесение покрытий TiN снижает коэффициент укорочения стружки и составляющие силы резания на 14...16 % в зависимости от схемы резбонарезания.

Анализ полученных данных показывает, что при нарезании резьбы по профильной и генераторной схеме резания наблюдаются общие закономерности влияния покрытий на контактные характеристики процесса резания. Нанесение одноэлементных покрытий TiN уменьшает длину контакта стружки с передней поверхностью S_γ , коэффициент укорочения стружки K_L и составляющие силы резания по сравнению с инструментом без покрытия. Нанесение многоэлементных покрытий TiCrN и TiCrZrN увеличивает данные характеристики по сравнению с одноэлементным покрытием TiN. Снижение длины контакта S_γ при нанесении покрытий TiN повышает средние нормальные удельные нагрузки q_N , а нанесение многоэлементных покрытий из-за роста длины контакта S_γ вызывает их уменьшение. Влияние покрытий на средние касательные удельные нагрузки q_F аналогично: нанесение покрытий TiN их увеличивает, а использование многоэлементных покрытий – снижает по отношению к покрытию TiN.

Влияние покрытий на характеристики теплового состояния резцовых резцов представлено в табл. 3.

Таблица 2. Влияние условий резания на контактные характеристики процесса нарезания резьбы (для последнего прохода резца) на заготовке из стали 38ХГН

Покрытие	$P_z, Н$	$P_y, Н$	$P_x, Н$	K_L
Без покрытия	4330/5090	1670/2000	810/890	1,46/1,95
TiN	3400/4440	1300/1680	670/750	1,22/1,68
TiCrN	3640/4460	1390/1700	670/790	1,32/1,71
TiCrAlN	3640/4470	1400/1720	690/860	1,39/1,8

Примечание. В числителе даны значения для случая, когда вершина резца исключена из процесса резания, в знаменателе – для обычной профильной схемы; $V=120$ м/мин; $p=3$ мм.

Таблица 3. Показатели теплового состояния резбовых резцов

Покрытие	$Q_n, 10^6$ Вт	$Q_3, 10^6$ Вт	$q_n, 10^6$ Вт/м	$q_3, 10^6$ Вт/м	$T_{n\text{ ср}}, \text{C}$	$T_{3\text{ ср}}, \text{C}$
Без покрытия	49,8/70,7	-1,1/-1,2	4,8/14,5	-5,6/-17,4	674/812	361/450
TiN	34,7/60,5	-0,6/-0,7	6,4/16,9	-7,9/20,4	636/776	340/428
TiCrN	36,6/64,5	-0,7/-0,9	5,5/13,3	-5,8/-16,6	648/782	341/436
TiCrAlN	38,3/65,7	-0,7/-0,9	4,2/12,7	-5,2/-15,7	653/786	350/420
TiCrZrN	41,2/66,7	-0,7/-0,9	3,5/12,0	-4,1/-15,0	653/790	356/437

Примечание. Данные представлены для последнего прохода резбового резца; $V=120$ м/мин; $p=3$ мм; в числителе значения параметров для генераторной, в знаменателе – для профильной схемы нарезания резьбы.

Анализ данных, представленных в табл. 3, позволяет сделать заключение, что применение покрытий TiN уменьшает мощность теплового потока на передней поверхности Q_n , более высокие значения сил резания, характерные для режущего инструмента с многоэлементными покрытиями, вызывают увеличение мощности теплового потока Q_n по сравнению с покрытием TiN. Снижение длины контакта C_γ при нанесении покрытия TiN несколько увеличивает интенсивность теплового потока по передней поверхности q_n , а увеличение величины C_γ при использовании многоэлементных покрытий, несмотря на повышение мощности теплового потока, снижает интенсивности тепловых потоков на передней q_n и задней q_3 поверхности по сравнению с инструментом с покрытием TiN. Изменение мощности тепловых потоков на передней Q_n и задней Q_3 и их интенсивностей q_n и q_3 приводит к изменению контактных температур, действующих на передней и задней поверхностях. Нанесение покрытий TiN вызывает уменьшение контактных температур по передней $T_{n\text{ ср}}$ и задней $T_{3\text{ ср}}$ поверхностям, а нанесение многоэлементных покрытий по сравнению с покрытием TiN их увеличивает.

Условия процесса резания при нарезании резьбы сказываются на влиянии износостойких покрытий на характеристики теплового состояния режущего инструмента. Стесненные условия процесса резания при профильной схеме нарезания резьбы резцом без покрытия вызывают рост мощности теплового потока на передней поверхности Q_n и его интенсивности q_n соответственно на 42 % и в 3,1 раза по сравнению с такими же показателями при генераторной схеме резания. Для резцов с износостойкими покрытиями эти цифры составили 62...74 % и 2,4...3,4 раза.

Условия процесса резания при нарезании резьбы отражаются на формировании температурных полей в режущем клине инструмента. Расчет температурных полей проводили с использованием пакета прикладных программ ANSYS по разработанной методике, отличительной особенностью которой является наложение тепловых потоков вдоль режущих кромок резбового резца с учетом закона распределения микротвердости стружки. На рис. 2 в качестве примера показаны температурные поля в режущем клине резбового резца, из которого видно, что, независимо от схемы резания, наибольшее снижение температуры наблюдается при нарезании резьбы резцом с покрытием TiN. При этом изотермы температуры из-за уменьшения длины контакта стружки с передней поверхностью резца вследствие нанесения покрытия смещаются в сторону задней поверхности. Увеличение величины C_γ , характерное для многоэлементного покрытия TiCrZrN по сравнению

с покрытием TiN, наряду с повышением мощности теплового источника приводит к смещению изотерм температурных полей в режущем клине инструмента в сторону от задней поверхности и режущих кромок инструмента и вглубь инструментальной основы.

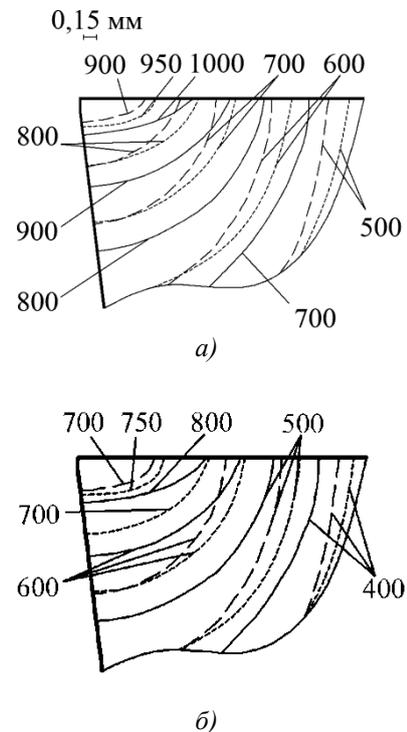


Рис. 2. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) в режущем клине резбового резца при нарезании резьбы в заготовках из стали 38ХГН:

а) профильная схема, б) генераторная схема;
без покрытия – сплошная линия,
TiN – длинный пунктир, TiCrZrN – короткий пунктир ($V=120$ м/мин; $p=3$ мм)

Большая площадь контакта стружки с передней поверхностью резца и меньшая скорость перемещения стружки при профильной схеме резания по сравнению с генераторной схемой резания способствует большему поступлению теплоты в инструмент и вызывает большее смещение изотерм температуры в основу инструментального материала.

В табл. 4 представлены данные теплового баланса процесса нарезания резьбы резцами с покрытиями различного состава.

Таблица 4. Тепловой баланс при нарезании резьбы резцами с различными покрытиями

Покрытие	Номер прохода	Мощность теплового потока, $Q \cdot 10^6$ Вт	Тепловой баланс P , %		
			стружка	инструмент	заготовка
<i>Профильная схема резания</i>					
Без покрытия	4	69,57	53	34	13
TiN	4	59,62	62	26	12
TiCrN	4	63,67	64	25	11
TiCrAlN	4	64,84	65	24	11
TiCrZrN	4	65,74	66	23	11
<i>Генераторная схема резания</i>					
Без покрытия	4	48,75	65	27	8
TiN	4	34,05	73	18	9
TiCrN	4	35,84	74	16	10
TiCrAlN	4	37,61	75	15	10
TiCrZrN	4	40,45	76	14	10

Большая площадь контакта стружки с передней поверхностью и меньшая скорость перемещения стружки по передней поверхности при профильной схеме резания увеличивает количество теплоты, поступающей в резец, по сравнению с генераторной схемой. Следовательно, по тепловой напряженности процесс резания при профильной схеме находится в более худших условиях по сравнению с генераторной. Так, количество тепла, поступающего в инструмент при профильной схеме резания по сравнению с генераторной схемой, больше на 37...32 % для резца без покрытия, а для резцов с покрытиями – на 53...38 % в зависимости от состава покрытия и прохода резца.

Нанесение покрытий на контактные площадки резцовых резцов приводит к перераспределению количества теплоты, выделяющейся в зоне резания, между инструментом, стружкой и заготовкой. При нанесении покрытий доля теплоты, уходящей в стружку, увеличивается, а в резец и заготовку – снижается. Наблюдаемое перераспределение количества теплоты, поступающей в стружку, резец и заготовку, объясняется тем, что нанесение покрытий уменьшает коэффициент укорочения стружки K_L и полную длину контакта стружки с перед-

ней поверхностью S_r . Это приводит к увеличению скорости перемещения стружки относительно режущего инструмента и уменьшению площади контакта стружки с передней поверхностью. Кроме того, уменьшение интенсивности источника теплоты деформации и его размеров для резца с покрытием уменьшает подогрев стружки и увеличивает ее способность аккумулировать теплоту трения на передней поверхности, что также способствует снижению доли теплоты, уходящей в резец со стороны передней поверхности.

Доля теплоты, уходящей в инструмент при нанесении покрытий по сравнению с резцом без покрытия, снижается в 1,3–1,4 раза при профильной и в 1,5–2 раза при генераторной схемах резания.

Оценка температурных полей на контактных площадках резцовых резцов, полученных с помощью термоиндикаторных красок Tempilstik (США), показала, что нанесение покрытий снижает количество теплоты, поступающей в режущий клин резца. Как видно из рис. 3, нанесение покрытий уменьшает объем прогреваемого материала режущей части резца. При этом больший объем прогреваемого материала режущей части имеет место для профильной схемы резания.

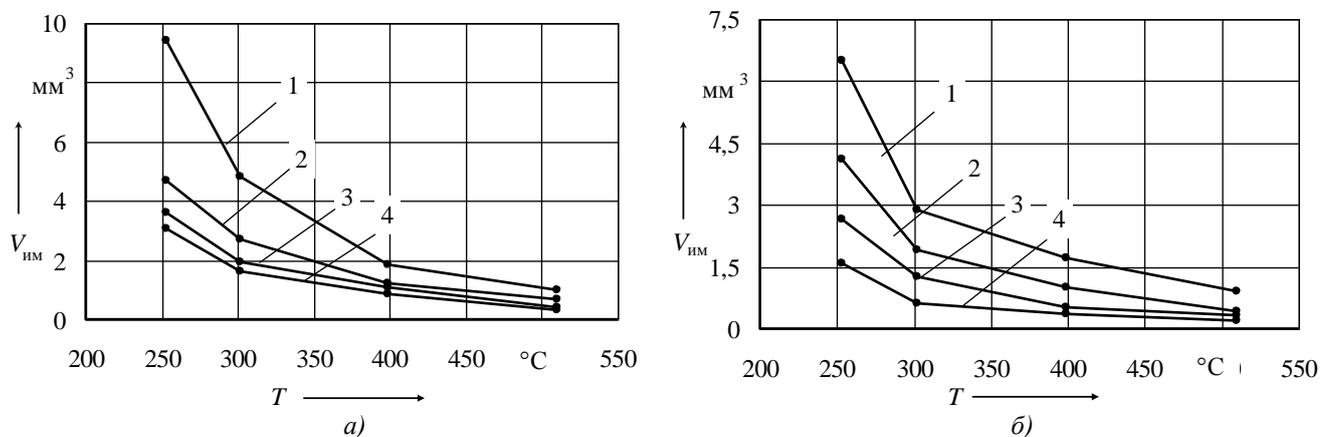


Рис. 3. Влияние покрытий на прогреваемый объем материала режущей части резца ($V_{им}$) при нарезании резьбы по профильной (а) и генераторной (б) схемам резания: 1 – без покрытия; 2 – TiN; 3 – TiCrN; 4 – TiCrZrN

Анализ результатов исследований контактных характеристик процесса резбонарезания и теплового состояния резбовых резцов позволяет сделать заключение, что изменение указанных процессов при нанесении покрытий подчиняется одним и тем же закономерностям, что и при продольном точении [1]. При этом наилучшее тепловое состояние резбовых резцов обеспечивают трехэлементные нитридные покрытия. Принимая это во внимание, были разработаны многослойные покрытия для токарных резбовых резцов, позволившие существенно повысить их работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резьбообразующий инструмент / В.А. Гречишников [и др.]. М.: СТАНКИН, 1999. 405 с.
2. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976. 415 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
4. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
5. Волосова М.А., Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких покрытий для применения в инструментальном производстве // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 6. С. 37–42.
6. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9–18.
7. Григорьев С.Н., Андреев А.А., Шулаев В.М. Наноструктурные износостойкие покрытия, полученные методами физического осаждения в вакууме // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 4–8.
8. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 18–32.
9. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating // Material Science Forum. 1994. Vol. 163–165. P. 527–532.
10. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
11. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки металлов. М.: Машиностроение, 1981. 286 с.

REFERENCES

1. Grechishnikov V.A. et al. *Rezboobrazuyushchiy instrument* [Tapping tool]. Moscow, STANKIN publ., 1999, 405 p.
2. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. *Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii* [Deformation and strength of materials under complex stress condition]. Kiev, Naukova dumka publ., 1976, 415 p.
3. Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost rezhushchego instrumenta s iznosostoykimi pokritiyami* [Efficiency of the cutting tool with anti-wear coatings]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1993, 336 p.
4. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoykikh ionno-plazmennikh pokritiy rezhushchego instrumenta* [Formation of anti-wear ion-plasma coatings of a cutting tool]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2008, 311 p.
5. Volosova M.A., Grigoriev S.N. Technological principles of deposition of wear-resistant nano for use in tool production. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2010, no. 6, pp. 37–42.
6. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improving the efficiency of the tool by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2005, no. 9, pp. 9–18.
7. Grigoriev S.N., Andreev A.A., Shulaev V.M. Nanostructured durable coatings produced by physical vapor deposition in the vacuum. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2005, no. 9, pp. 4–8.
8. Vereshchaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P. Methodological principles of creation the functional coatings of new generation for cutting tool manufacture. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokritiya*, 2013, no. 2, pp. 18–32.
9. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. *Material Science Forum*, 1994, vol. 163–165, pp. 527–532.
10. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1976, 278 p.
11. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki metallov* [Thermal physics processes of machining process of metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 286 p.

**ASSESSMENT OF THERMAL CONDITION OF TURNING SCREW
TOOLS WITH ANTI-WEAR COATINGS**

© 2015

V.P. Tabakov, Doctor of Engineering, Professor
D.I. Sagitov, candidate of technical sciences
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: cutting tool; anti-wear coatings; thread; thermal condition of the tool.

Abstract: The process of thread cutting is characterized by more unfavorable factors of cutting process than traditional continuous turning. In this connection, the minimization of these factors influence on cutting tool and, consequently, the improvement of its working ability, is the relevant objection. One of the ways of improvement of the cutting tool working ability is the application of wear-resistant coatings on its working surfaces; that is why the evaluation of influence of wear-resistant coatings compound on the thermal condition of the cutting tool is the important task while developing new more effective wear-resistant coatings compounds. The article gives the results of study of thermal condition of threading tool with one- and multi-elements of nitride coatings (TiN, TiCrN и TiCrZrN) which were applied on the turning thread planes of full profile by the substance condensation in vacuum using the ionic bombardment. The article shows the influence of scheme of thread cutting on the contact characteristics of the cutting process. The article provides the results of finding the contact characteristics of the screw cutting process and thermal condition of turning screw tools with different coatings. It shows the influence of tapping scheme and anti-wear coatings on temperature fields in cutting threaded wedge cutters, and heat balance of screw cutting process. Based on the results of the research, the authors suggest new durable coatings of multi-element and multilayer architecture.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ШЛИФОВАНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2015

А.Н. Унянин, доктор технических наук, доцент

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: шлифование; ультразвуковые колебания; температурное поле; локальная температура; моделирование температурного поля при шлифовании.

Аннотация: Перспективным направлением повышения эффективности процесса шлифования является использование энергии ультразвуковых колебаний. Для оценки условий работы шлифовального круга и параметров качества поверхностного слоя заготовки необходимо знать локальные температуры. Однако аналитическое исследование локальных температур при шлифовании с ультразвуковыми колебаниями не выполнено.

Целью исследований является установление влияния параметров колебаний на температурное поле процесса шлифования.

Задачи исследования: разработка физических и математических моделей для расчета температурного поля, методики, алгоритма и программного обеспечения для расчета температур, выполнение численного моделирования температур.

Научная новизна: впервые аналитическим путем выполнено исследование температурного поля при шлифовании с ультразвуковыми колебаниями.

Разработаны физические и математические модели для расчета температурного поля при шлифовании, учитывающие изменение кинематики микрорезания абразивными зернами и механических характеристик материала заготовки при наложении ультразвуковых колебаний, а также зависимости параметров, характеризующих сопротивление материала заготовки диспергированию и теплофизических свойств материалов взаимодействующих объектов (абразивного зерна, заготовки, стружки, внешней среды), от температуры. Моделирование выполнено на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для каждого из взаимодействующих объектов. Для расчета уравнений использован метод конечных элементов. Разработана методика и программное обеспечение для расчета температурного поля. Приведены результаты численного моделирования температур при малых амплитудах колебаний, незначительно изменяющих кинематику микрорезания. При наложении ультразвуковых колебаний температура заготовки оказалась ниже на 10 %, а локальные температуры в зоне контакта абразивного зерна с заготовкой и со стружкой – на 14 % и 15 % соответственно.

Повышение работоспособности круга и улучшение качества обработанных деталей при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний (УЗК) во многом связано с изменением тепловой напряженности этого процесса [1–3]. Однако аналитическое исследование температурного поля при шлифовании с УЗК не выполнено.

Тепловые процессы при шлифовании изучены достаточно полно [4–6], однако в большинстве аналитических исследований зона контакта шлифовального круга с заготовкой представляет сплошной тепловой источник и рассчитываются средние контактные температуры. Для оценки условий работы шлифовального круга и параметров качества тонкого поверхностного слоя шлифуемой заготовки необходимо знать локальные температуры [7–9].

В наших исследованиях приняты во внимание тепловыделения в зоне деформирования *DE* абразивным зерном (АЗ) материала заготовки и в зонах контакта АЗ со стружкой *NE* и заготовкой *EV* (плотности источников тепловыделения q_{∂} , q_{1T} , q_{2T} соответственно) (рис. 1). Полагали, что источник плотностью q_{∂} распределен равномерно, а источники плотностью q_{1T} и q_{2T} – по несимметричному нормальному и экспоненциальному закону соответственно [9–11]. Составляющие силы микрорезания, мощности и плотности источников тепловыделения рассчитывали по аналитическим зависимостям [10]. Например, плотность тепловыделения в зоне контакта АЗ с заготовкой на расстоянии x_3 от точки *E* (см. рис. 1) можно вычислить, как:

$$q_{2T}(x_3) = q_{2T} \cdot \exp[-k_0 \cdot x_3];$$

$$q_{2T} = \frac{W_{2T} \cdot k_0}{l_2 \cdot \exp[-k_0 \cdot l_2]};$$

$$W_{2T} = \frac{\mu_0 \cdot \tau_s \cdot f_{тр} \cdot V_{кр}}{3 \cdot \mu_s},$$

где k_0 – коэффициент, m^{-1} ;
 $f_{тр}$ – площадь поверхности трения АЗ о заготовку, m^2 ;
 μ_s – коэффициент внутреннего трения [12];
 l_2 – размер площадки затупления на АЗ, m ;
 τ_s – напряжения сдвига, Pa [12–14];
 μ_0 – коэффициент трения АЗ о заготовку;
 $V_{кр}$ – рабочая скорость круга, m/c ;
 W_{2T} – мощность тепловыделения, $Вт$.

Абразивное зерно представили в виде усеченной пирамиды, стружку и заготовку – в виде прямоугольных параллелепипедов [5; 9]. Для повышения достоверности результатов учтены зависимости параметров, характеризующих сопротивление материала заготовки диспергированию [14; 15], а также теплофизических свойств всех взаимодействующих объектов (в том числе внешней среды), от температуры. Моделирование выполнили на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для каждого из взаимодействующих объектов и учитывающих скорости их относительно-

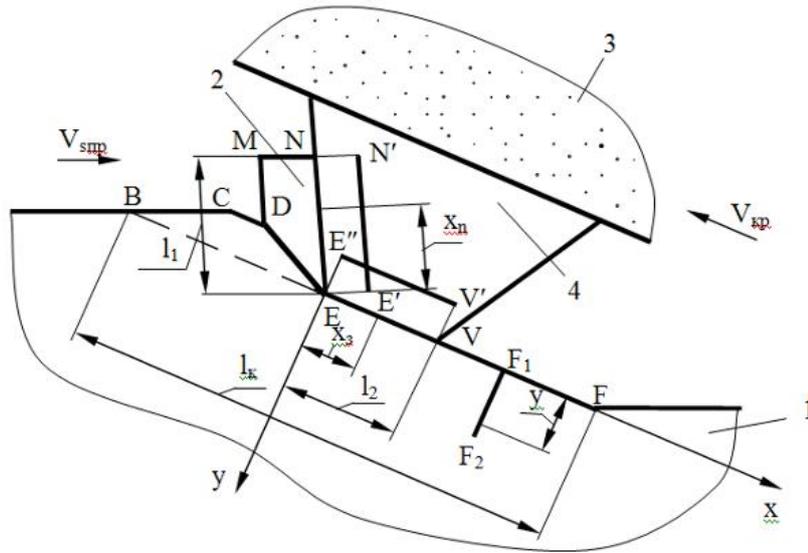


Рис. 1. Схема к расчету теплообмена в зоне контакта режущего АЗ с заготовкой:
1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – шлифовальный круг; 4 – абразивное зерно

го перемещения (АЗ относительно заготовки и стружки относительно АЗ).

Чтобы учесть формирование температурного поля как результат наложения тепловых импульсов от отдельных АЗ, моделировали перемещение (см. рис. 1) ряда последовательно вступающих в контакт с заготовкой зерен.

При плоском шлифовании без наложения УЗК изменение глубины внедрения режущего АЗ в материал заготовки по длине l дуги контакта:

$$a_3(l) = a_{кр} + A \cdot l,$$

где $a_{кр}$ – критическая глубина микрорезания, м;
 A – коэффициент [10].

При колебании частиц материала заготовки в направлении y , перпендикулярном обрабатываемой по-

верхности (рис. 2), глубину внедрения режущего АЗ можно представить, как:

$$a_{31}(l) = a_3(l) + A_y \cdot \sin(\omega \frac{l}{V_{кр}} + \varphi),$$

где A_y – амплитуда колебания заготовки в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, м;
 ω – циклическая (круговая) частота колебаний, рад/с;
 φ – фаза УЗК, град.

Колебание заготовки с ультразвуковой частотой приводит к качественному изменению процесса диспергирования ее материала абразивными зернами шлифовального круга. Наложение УЗК сопровождается уменьшением пределов прочности и текучести материала заготовки, а также его способности к упрочнению в процессе деформации [1; 16].

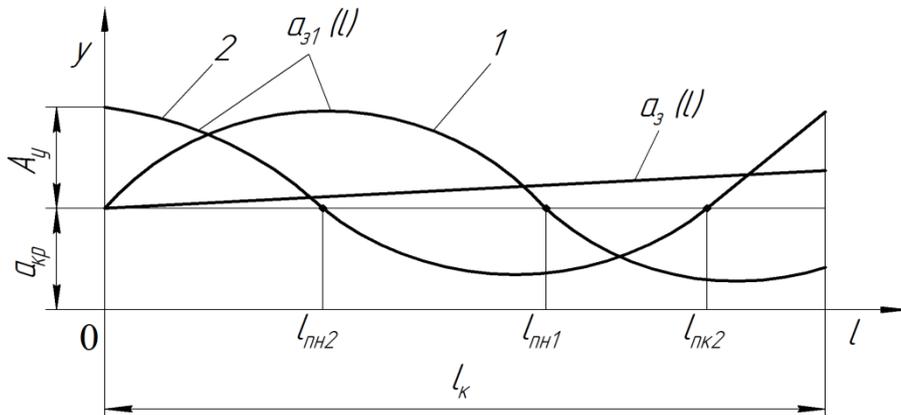


Рис. 2. Схема к расчету глубины внедрения режущего зерна в заготовку: 1 – фаза УЗК $\varphi=0^\circ$;
2 – $\varphi=90^\circ$ (на дуге траектории контакта зерна с заготовкой укладывается менее одной волны УЗК)

Таблица 1. Результаты расчета температур

Способ шлифования	Средняя температура заготовки T_1 , К		Средняя локальная температура на площадке контакта	
	на глубине 10 мкм	на глубине 50 мкм	А3 с заготовкой T_2 , К	А3 со стружкой T_2' , К
Без наложения УЗК	1218	1066	2535	2179
С наложением УЗК	1097	960	2181	1852

Средние по плоскости сдвига касательные напряжения, определяющие силу микрорезания единичными зернами круга:

$$\tau_s = \frac{\sigma_{иш}}{\sqrt{3}},$$

где $\sigma_{иш}$ – интенсивность напряжений при скорости и температуре деформации процесса шлифования, Па [14], которую можно определить по зависимости, предложенной в работе [17]:

$$\sigma_{иш} = \sigma_B \cdot 1,558 \cdot e^{2,34 \cdot 10^{-3} \cdot T},$$

где σ_B – временное сопротивление материала заготовки, Па;
 T – температура деформации, К. Наложение на заготовку УЗК приводит к изменению временного сопротивления ее материала, которое становится равным

$$\sigma_B^1 = k_\sigma \cdot \sigma_B,$$

где k_σ – коэффициент, показывающий степень уменьшения временного сопротивления σ_B при наложении колебаний [1; 16]. Поскольку этот коэффициент меньше единицы, то можно прогнозировать снижение силы микрорезания и температуры за счет уменьшения τ_s .

Для расчета дифференциальных уравнений теплопроводности использовали метод конечных элементов [18]. Методика численного расчета на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в оригинальных программах.

Адекватность физических и математических моделей, принятых при расчете температур, реальным условиям проверяли путем сравнения экспериментальных значений средней контактной температуры в зоне шлифования заготовок из сталей 40Х и 30Х13, измеренной полусинтетической термпарой, в наших исследованиях и локальной температуры, зафиксированной Г.В. Бокучавой при микрорезании заготовок из стали 40 и твердого сплава ВТ14, с расчетными значениями [10; 11; 19]. Расхождения между расчетными и экспериментальными значениями не превышают 15 %, что свидетельствует о возможности использования метода для теплофизического анализа процесса шлифования.

Численное моделирование температур выполнили при следующих исходных данных: плоское многопроходное шлифование периферией круга; материал заготовки – сталь 40Х; материал АЗ шлифовального круга – электрокорунд нормальный; зернистость – F60 (25-я); рабочая скорость круга $V_{кр}=35$ м/с; скорость продольной подачи $V_{сп}=10$ м/мин; глубина шлифования $t=0,01$ мм.

Моделировали наложение на заготовку УЗК частотой 18600 Гц с различной амплитудой. Фиксировали локальные температуры T_2 на площадке контакта АЗ с заготовкой и площадке АЗ со стружкой T_2' , а также температуру T_1 в поверхностных слоях заготовки на глубине 10 и 50 мкм в сечении, расположенном в середине дуги контакта АЗ с заготовкой (линия $F_1 F_2$ на рис. 1).

Наложение УЗК приводит к снижению температур как при движении через зону шлифования первых зерен, когда температура деформируемого материала заготовки относительно невелика, так и зерен, деформирующих заготовку, нагретую до 800 ... 1000 К.

При работе первого АЗ с амплитудой A_y , равной 1 мкм, температура T_2 оказалась ниже на 8 ... 9 %, а T_2' на 8 ... 13 %, чем без наложения УЗК ($A_y=0$). При увеличении A_y до 2 мкм температуры снизились в большей степени: T_2 на 9 ... 14 %, а T_2' на 17 ... 31 %. Локальные температуры существенно зависят от фазы УЗК и принимают минимальное значение при фазе φ , равной 180° , при которой длина траектории, на которой АЗ осуществляет микрорезание, минимальна. Максимальные температуры зафиксированы при $\varphi=0^\circ$, при которой длина траектории микрорезания имеет максимальное значение (см. рис. 2).

Результаты численного моделирования при работе 18-го АЗ, деформирующего прогретую заготовку ($A_y=0,5$ мкм), представлены в табл. 1.

При наложении УЗК температура заготовки оказалась ниже на 10 %, а локальные температуры в зоне контакта АЗ с заготовкой и со стружкой – на 14 % и 15 % соответственно.

При наложении колебаний, имеющих относительно малую амплитуду, изменение кинематики микрорезания практически не влияет на температурное поле. Основной причиной уменьшения температур при наложении УЗК является уменьшение касательных напряжений τ_s , определяющих силу микрорезания единичными зернами круга, которая при обработке с УЗК снижается [1; 16; 20]. При больших амплитудах УЗК на локальные температуры влияет также изменение кинематики микрорезания, причем в большей степени на температуру T_2 .

В результате разработаны физические и математические модели для расчета температурного поля при шлифовании, позволяющие учесть изменение кинематики микрорезания абразивными зернами и механических характеристик материала заготовки при наложении УЗК. Приведены результаты численного моделирования температур при малых амплитудах колебаний, незначительно изменяющих кинематику микрорезания.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект 14-08-01059).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин [и др.]. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
2. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
3. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепло-массопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.
4. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1978. 128 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
6. Ящерицын П.И., Цокур А.К., Еременко М.П. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1974. 210 с.
7. Унянин А.Н. Исследование режущей способности шлифовального круга при обработке пластичных материалов // СТИН. 2006. № 1. С. 28–32.
8. Унянин А.Н. Влияние локальных температур на налипание материала заготовки на абразивные зерна // СТИН. 2008. № 6. С. 26–31.
9. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
10. Унянин А.Н. Аналитическое исследование локальных температур при шлифовании // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 6. С. 41–50.
11. Унянин А.Н. Численное моделирование локальных температур при шлифовании // СТИН. 2006. № 8. С. 27–33.
12. Ефимов В.В. Модель процесса шлифования с применением СОЖ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1992. 132 с.
13. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. М.-Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1973. 136 с.
14. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
15. Дьяконов А.А. Теплофизическая модель заготовки от действия единичного теплового источника – абразивного зерна // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 7. С. 60–62.
16. Штриков Б.Л., Малкина И.В. Влияние ультразвука на характер пластической деформации материалов при обработке клепаных соединений // Высокие технологии в машиностроении: материалы междунар. НТК. Самара: СГТУ, 2005. С. 140–142.
17. Носенко В.А. Шлифование адгезионно-активных металлов. М.: Машиностроение, 2000. 262 с.
18. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена. М.: Мир, 1988. 544 с.
19. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. 238 с.
20. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.

REFERENCES

1. Volgin M.F. et al. *Primenenie ultrazvuka i vzriva pri obrabotke i sborke* [Application of ultrasonic vibrations and explosion when processing and assembling]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2002, 264 p.
2. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ratsionalnim ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Enhancement of the processes of mechanical processing by efficient use of ultrasonic field energy]. Ulyanovsk, UIGTU publ., 2003, 186 p.
3. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomassoperenosa* [Mechanical processing of blank parts in the circumstances of critical heat and mass transfer]. Moscow, RAN publ., 2008, 250 p.
4. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Basic physics of grinding process]. Saratov, Saratovsky universitet publ., 1978, 128 p.
5. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1981, 279 p.
6. Yashcheritsin P.I., Tsokur A.K., Eremenko M.P. *Teplovie yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannikh poverkhnostey* [Heat phenomena when grinding and the properties of processed surfaces]. Minsk, Nauka i tekhnika publ., 1974, 210 p.
7. Unyanin A.N. Research of cutting facility of grinding wheel when processing plastic materials. *STIN*, 2006, no. 1, pp. 28–32.
8. Unyanin A.N. Influence of local temperatures on the sticking of the blank part material on the grinding grain. *STIN*, 2008, no. 6, pp. 26–31.
9. Reznikov A.N. *Teplovie protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990, 288 p.
10. Unyanin A.N. Local temperatures analytical research while grinding. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2006, no. 6, pp. 41–50.
11. Unyanin A.N. Numerical simulation of local temperatures while grinding. *STIN*, 2006, no. 8, pp. 27–33.
12. Efimov V.V. *Model protsessa shlifovaniya s primeneniem SOZh* [Model of the process of grinding using the coolants-lubricants]. Saratov, Saratovsky universitet publ., 1992, 132 p.
13. Filimonov L.N. *Stoykost shlifovalnikh krugov* [Grinding wheels life]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973, 136 p.
14. Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessa shlifovaniya stalnikh detaley* [Rate of grinding process of steel parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974, 280 p.
15. Dyakonov A.A. Thermophysical model of blank part obtained from a single heat source – abrasive grain. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2007, no. 7, pp. 60–62.
16. Shtrikov B.L., Malkina I.V. Ultrasonic influence on the materials plastic deformation property when processing riveted joints. *Materiali mazhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Visokie tekhnologii v mashinostroenii"*. Samara, SGTU publ., 2005, pp. 140–142.

17. Nosenko V.A. *Shlifovanie adgezionno-aktivnikh metallov* [Grinding of adhesion- active metals]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2000, 262 p.
18. Shi D. *Chislennye metody v zadachakh teploobmena* [Numerical methods in the heat transfer issues]. Moscow, Mir publ., 1988, 544 p.
19. Bokuchava G.V. *Tribologiya protsessa shlifovaniya* [Grinding process tribology]. Tbilisi, Sabchata Sakartvelo publ., 1984, 238 p.
20. Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 424 p.

THE STUDY OF TEMPERATURE FIELD WHEN GRINDING WITH ULTRASONIC ACTIVATION

© 2015

A.N. Unyanin, Doctor of Engineering, Associate Professor
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: grinding; ultrasonic vibrations; temperature field; local temperature; simulation.

Abstract: The application of ultrasonic vibrations power is the promising direction of the grinding process efficiency improvement. To estimate the work conditions of grinding wheel and the quality parameters of the surface layer of a blank part, it is necessary to know local temperatures. However, the analytical research of local temperatures when grinding with ultrasonic vibrations is not carried out.

The goal of this research is the determination of vibrations parameters influence on the temperature field of grinding process.

The research objectives are: the development of physical and mathematical models for calculation of temperature field, methodology, algorithm and software for temperatures calculation, temperature numerical simulation.

Scientific novelty: it is the first analytical research of temperature field when grinding with ultrasonic activation.

The authors developed physical and mathematical models for calculation of temperature field while grinding that take into account the alteration of kinematics of abrasive grains micro-cutting and the mechanical properties of blank part material while grinding with ultrasonic activation, and the parameters dependences characterizing blank part material dispersion resistance and thermophysical properties of interacting objects materials (abrasive grain, blank part, chippings, environment) on the temperature. The simulation is carried out on the basis of joint solution of thermal conductivity differential equations written for each interacting object. To calculate equations, the authors used the finite-elements method. The authors developed the methods and the software for temperature field calculation. The article gives the results of numerical simulation of temperatures by low vibration amplitudes slightly changing micro-cutting kinematics. By ultrasonic vibrations, the blank part temperature was by 10% lower, and the local temperatures in the zone of contact of abrasive grain with the blank part and the chippings was by 14% and 15% lower correspondingly.

НАШИ АВТОРЫ

Адаевская Татьяна Ивановна, кандидат исторических наук, доцент.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

E-mail: headcoun@tltsu.ru

Амирджанова Ирина Юрьевна, ассистент кафедры «Дизайн и инженерная графика».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 49-96-29

E-mail: iya67@list.ru

Андреев Степан Алексеевич, инженер.

Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Россия, Ульяновская область, г. Димитровград, 10.

Тел.: (84235) 6-50-77

E-mail: Stepan-alekseevich@mail.ru

Бобровский Игорь Николаевич, кандидат технических наук, начальник лаборатории НИЧ НИЛ-7 «Автомобильные технологии».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89626129325

E-mail: bobri@yandex.ru

Бобровский Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование и технология машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89626114011

E-mail: bobrnm@yandex.ru

Боргардт Евгений Дмитриевич, лаборант-исследователь НИО-4.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14.

Тел.: 89171391388

E-mail: euletech13@gmail.com

Бородынкина Дарья Львовна, магистрант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-85

E-mail: rsi-tgu@tltsu.ru; reshetnikovadaria@gmail.com

Бочкарев Петр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

E-mail: bpy@mail.ru

Бржозовский Борис Максевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-98

E-mail: bmb sar85@mail.ru

Васькин Кирилл Яковлевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-95-82

E-mail: Vaskink@mail.ru

Виткалов Виталий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Дизайн и инженерная графика».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 49-96-29

E-mail: iya67@list.ru

Глибин Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная электроника».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: (8482) 53-92-03
E-mail: zhenya118@gmail.com

Гордеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: (8482) 53-92-85.
E-mail: rsi-tgu@tltsu.ru; shura_37@mail.ru

Горина Лариса Николаевна, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: (8482) 53-92-36
E-mail: Gorina@tltsu.ru

Горшков Борис Михайлович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сервис технических и технологических систем».
Адрес: Поволжский государственный университет сервиса, 445677, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Гагарина, 4.
Тел.: 8(8482)48-63-49
E-mail: kaf_ekis@tolgas.ru

Данилина Наталья Евгеньевна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: (8482) 54-63-67
E-mail: Danilina@tltsu.ru

Зинина Елена Петровна, доктор технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов».
Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
Тел.: (8452) 99-86-39
E-mail: e-zinina@bk.ru

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, начальник НИО-4, доцент кафедры «Энергетические машины и системы управления».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: 8 (8482) 53-91-46
E-mail: ivashinpv@gmail.com

Казаков Юрий Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры «Оборудование и технология сварочного производства и пайки».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: (8482) 53-95-73
E-mail: Kazakov_Ju.V.@tltsu.ru

Казимиров Денис Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».
Адрес: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
Тел.: 8 (3952) 40-54-59
E-mail: solera@istu.irk.ru

Каплин Александр Васильевич, инженер.
Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Россия, Ульяновская область, г. Димитровград, 10.
Тел.: (84235) 6-50-77
E-mail: Kaplinav@yandex.ru

Киселев Евгений Степанович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: 8 (8422) 418247

E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Костюченко Николай Александрович, инженер.

Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Россия, Ульяновская область, г. Димитровград, 10.

Тел.: (84235) 6-50-77

E-mail: Cpm6mfy2@yandex.ru

Криштал Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика», ректор.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14.

Тел.: 8 (8482) 28-01-25, 48-14-75, 53-95-22

E-mail: krishtal@tltsu.ru

Левашкин Денис Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Тел.: (8482) 53-92-85

E-mail: LevashkinD@rambler.ru

Левицких Олеся Олеговна, ведущий экономист лаборатории НИЛ-7.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89626129325

E-mail: loo-05@mail.ru

Лукьянов Алексей Александрович, магистрант.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89178206581

E-mail: a.lukyanov@tehnomasch.ru

Макаров Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения».

Адрес: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29.

Тел.: 8 (342) 219-82-95

E-mail: makarovv@pstu.ru

Мартынов Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-39

E-mail: v_martynov@mail.ru

Мельзитдинова Анна Викторовна, магистр-инженер, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-25

E-mail: otsp@tltsu.ru

Мельников Павел Анатольевич, кандидат технических наук, директор института Химии и инженерной экологии.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89277717447

E-mail: topavel@mail.ru

Меркулов Роман Вячеславович, старший преподаватель кафедры «Строительство и сварочное производство».
Адрес: Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт, 357100, Россия, Ставропольский край, г. Невинномысск, Гагарина, 134.
Тел.: 8-928-307-06-42
E-mail: romanmerkul@yandex.ru

Митин Сергей Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов».
Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.
Тел.: (8452) 99-86-31
E-mail: ser_gen@inbox.ru

Назаров Михаил Владимович, магистрант кафедры «Технология машиностроения».
Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.
E-mail: nazarov.mv@inbox.ru

Нгуен Ван Ле, аспирант кафедры «Технология машиностроения».
Адрес: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
Тел.: 8 (3952) 40-54-59
E-mail: solera@istu.irk.ru

Нескоромный Станислав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства», докторант.
Адрес: Донской государственный технический университет, 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.
Тел.: 89044485512
E-mail: nescoromniy@mail.ru

Никитин Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».
Адрес: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29.
Тел.: 8 (342) 219-83-65
E-mail: perkan@perm.ru

Огин Павел Александрович, аспирант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: 8-908-42-142-65
E-mail: fantom241288@yandex.ru

Пахоменко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент.
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: 89270297094
E-mail: pakhomenko@tltu.ru

Пилинский Александр Вениаминович, магистр техники и технологии.
Адрес: Реймер металс корпорейшн, 15135, Raymer Street, Van Nuys, CA 91405, Лос-Анджелес, США.
Тел.: (818) 782-9395
E-mail: apilinsky@yahoo.com

Позднов Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника».
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: 89297176167
E-mail: instan@mail.ru

Полунин Антон Викторович, младший научный сотрудник НИО-4.
Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, РФ, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14.
Тел.: 8 (8482) 53-91-46
E-mail: Anpol86@gmail.com

Почекуев Евгений Николаевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные материалы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89053057279

E-mail: enpster@gmail.com

Прядилов Алексей Вадимович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89061298623

E-mail: limitov@yandex.ru

Путеев Павел Александрович, аспирант, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные материалы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89608365606

E-mail: pputeev@gmail.com

Ремнева Оксана Юрьевна, кандидат технических наук, ассистент кафедры «Сервис технических и технологических систем».

Адрес: Поволжский государственный университет сервиса, 445677, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Гагарина, 4.

E-mail: RemnevaOJ@mail.ru

Родионов Игорь Игоревич, инженер по эксплуатации зданий и сооружений.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-86

E-mail: inmylave@mail.ru

Родионов Игорь Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-86

E-mail: riktlt@mail.ru

Сагитов Дамир Ильдарович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: 41-80-83

E-mail: sagdam@mail.ru

Сидоров Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 539245.

E-mail: otsp@tltsu.ru.

Солер Яков Иосифович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Тел.: 8 (3952) 40-54-59

E-mail: solera@istu.irk.ru

Стрижаков Евгений Львович, доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства».

Адрес: Донской государственный технический университет, 344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Тел.: 89198944330

E-mail: strizhakov@inbox.ru

Табакон Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: 41-80-83

E-mail: vpt@ulstu.ru

Твердохлебов Андрей Яковлевич, младший научный сотрудник НИО-4.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14.

Тел.: 89171385482

E-mail: sarc@bk.ru

Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент.

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, Ульяновская область, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

Тел.: (8422) 43-19-71

E-mail: a_un@mail.ru

Фрезе Татьяна Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 54-63-63

E-mail: freze-family@yandex.ru

Хрипунов Николай Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная информатика в экономике».

Адрес: Поволжский государственный университет сервиса, 445677, Россия, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4.

Тел.: (8482) 22-94-05

E-mail: hrnv2@ya.ru

Шевцов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-03

E-mail: a_shevtsov@list.ru

Шенбергер Полина Николаевна, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-98

E-mail: Shenberger@tltsu.ru

OUR AUTHORS

Adaevskaya Tatiana Ivanovna, candidate of historical sciences, Associate Professor.
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: headcoun@tltsu.ru

Amirdzhanova Irina Yurievna, assistant of the Department «Design and Engineering Graphics».
Address: Togliatti State University, 445667, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 49-96-29
E-mail: iya67@list.ru

Andreev Stepan Alekseevich, engineer
Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russia, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad, 10.
Tel.: (84235) 6-50-77
E-mail: Stepan-alekseevich@mail.ru

Bobrovskiy Igor Nickolaevich, candidate of technical sciences, Head of SRD SRL-7 laboratory «Automobile technologies».
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 89626129325
E-mail: bobri@yandex.ru

Bobrovskiy Nikolai Mikhailovich, Doctor of Engineering, Professor of the Department «Equipment and machinery production technology».
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 89626114011
E-mail: bobrnm@yandex.ru

Bochkaryov Pyotr Yuryevich, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Technologies.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.
E-mail: bpy@mail.ru

Borgardt Evgeny Dmitrievich, assistant researcher of the Research division № 4.
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 89171391388
E-mail: euletech13@gmail.com

Borodynkina Daria Livovna, graduate student of the department «Equipment and Technologies of Mechanical Engineering».
Address: Togliatti State University, 445667, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-85
E-mail: rsi-tgu@tltsu.ru; reshetnikovadaria@gmail.com

Brzhozovsky Boris Maksovich, Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Design of engineering and technological complexes.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.
Tel.: (8452) 99-86-98
E-mail: bmsar85@mail.ru

Danilina Natalia Evgenievna, candidate of pedagogical sciences, associate professor, assistant professor of the Department «Management of Industrial and Environmental Safety».
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 54-63-67
E-mail: Danilina@tltsu.ru

Freze Tatiana Yurievna, candidate of economic sciences, assistant professor of the Department «Management of Industrial and Environmental Safety».
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 54-63-63
E-mail: freze-family@yandex.ru

Glibin Yevgeny Sergeevich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Industrial Electronics».
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-03
E-mail: zhenya118@gmail.com

Gordeyev Aleksander Vladimirovich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the department «Equipment and Technologies of Mechanical Engineering».
Address: Togliatti State University, 445667, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-85.
E-mail: rsi-tgu@tltsu.ru; shura_37@mail.ru

Gorina Larissa Nikolaevna, Doctor of Pedagogy, Full Professor, Professor of the Department «Management of Industrial and Environmental Safety».
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel. (8482) 53-92-36
E-mail: Gorina@tltsu.ru

Gorshkov Boris Mikhailovich, Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department «Service of technical and technological systems».
Address: Volga Region State University of Service, 445677, Samara region, Togliatti, Gagarin Street, 4.
Tel.: 8(8482)48-63-49
E-mail: kaf_ekis@tolgas.ru

Ivashin Pavel Valentinovich, candidate of technical sciences, Head of the Research division № 4, assistant professor of the Department «Energy machines and controlling systems».
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 8 (8482) 53-91-46.
E-mail: ivashinpv@gmail.com

Kaplin Alexander Vasilievich, engineer.
Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russia, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad, 10.
Tel.: (84235) 6-50-77
E-mail: Kaplinav@yandex.ru

Kazakov Yury Vasilievich, Doctor of Engineering, Professor, professor-counsellor of the Department «Equipment and technology of welding and soldering».
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8284) 53-95-73
E-mail: Kazakov_Ju.V.@tltsu.ru

Kazimirov Denis Yurievich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Mechanical Engineering Technology».
Address: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov Street, 83.
Tel.: 8 (3952) 40-54-59
E-mail: solera@istu.irk.ru

Khripunov Nikolay Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Applied informatics in economics».
Address: Volga Region State University of Service, 445677, Russia, Togliatti, Gagarin Street, 4.
Tel.: (8482) 22-94-05
E-mail: hrnv2@ya.ru

Kiselyov Evgeny Stepanovich, Doctor of Engineering, Full Professor, professor of the department «Engineering technology».
Address: Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia
Tel.: 8 (8422) 418247
E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Kostyuchenko Nikolay Alexandrovich, engineer
Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russia, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad, 10.
Tel.: (84235) 6-50-77
E-mail: Cpm6mfy2@yandex.ru

Krishtal Mikhail Mikhailovich, Doctor of Physics and Mathematics, Rector, professor of the Department «Nanotechnologies, materials sciences and mechanics».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 8 (8482) 28-01-25, 48-14-75, 53-95-22

E-mail: krishtal@tltsu.ru

Levashkin Denis Gennadyevich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Equipment and technology of engineering production».

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-85

E-mail: LevashkinD@rambler.ru

Levitskih Olesya Olegovna, chief economist of SRL-7 laboratory.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89626129325

E-mail: loo-05@mail.ru

Lukyanov Aleksey Aleksandrovich, undergraduate student.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89178206581

E-mail: a.lukyanov@tehnomasch.ru

Makarov Vladimir Fiodorovich, Doctor of Engineering, Full Professor, Professor of the Department «Innovative Machine Technology».

Address: Perm National Research Polytechnic University, Russia, 614990, Perm, Komsomolsky prospect, 29.

Tel.: 8 (342) 219-82-95

E-mail: makarovv@pstu.ru

Martynov Vladimir Vasilievich, Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Design of engineering and technological complexes.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.

Tel.: (8452) 99-86-39

E-mail: v_martynov@mail.ru

Melnikov Pavel Anatolievich, candidate of technical sciences, the Director of Chemistry and Engineering Ecology Institute.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89277717447

E-mail: topavel@mail.ru

Melzidinova Anna Viktorovna, master-engineer, senior lecturer of the Department «Welding, material pressure processing and allied processes ».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-25

E-mail: otsp@tltsu.ru

Merkulov Roman Vyacheslavovich, senior lecturer of the Department «Construction and welding engineering».

Address: Nevinnomyssk State Institute of Humanities and Engineering, 357100, Russia, Stavropol Territory, Nevinnomyssk, Gagarin Street, 134

Tel.: 8-928-307-06-42

E-mail: romanmerkul@yandex.ru

Mitin Sergei Gennadyevich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Technologies.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.

Tel.: (8452) 99-86-31

E-mail: ser_gen@inbox.ru

Nazarov Mikhail Vadimovich, graduate student of the department «Engineering technology».

Address: Ulyanovsk State Technical University, 32, Severny Venets Street, Ulyanovsk, 432027, Russia.

E-mail: nazarov.mv@inbox.ru

Nescoromny Stanislav Valeryevich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Machinery and automation of welding production», Doctoral candidate.

Address: Don State Technical University, 344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Sq., 1.

Tel.: 89044485512

E-mail: nescoromniy@mail.ru

Nguyen Van Le, postgraduate student of the Department «Mechanical Engineering Technology».

Address: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov Street, 83.

Tel.: 8 (3952) 40-54-59

E-mail: solera@istu.irk.ru

Nikitin Sergey Petrovich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department «Metal Cutting Machines and Tools».

Address: Perm National Research Polytechnic University, Russia, 614990, Perm, Komsomolsky prospect, 29.

Tel.: 8 (342) 219-83-65

E-mail: perkan@perm.ru

Ogin Pavel Aleksandrovich, post-graduate student of the Department «Equipment and technology of machinery production».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 8-908-42-142-65

E-mail: fantom241288@yandex.ru

Pakhomenko Anatoly Nikolayevich, candidate of technical sciences, Associate Professor.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89270297094

E-mail: pakhomenko@tltsu.ru

Pilinsky Alexander Veniaminovich, Master of Science in Mechanical Engineering.

Address: Raymer Metals, Inc., 15135, Raymer Street, Van Nuys, CA 91405, Los Angeles, USA.

Tel.: (818) 782-9395

E-mail: apilinsky@yahoo.com

Pochekuev Eugeny Nikolaevich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the department «Welding, materials pressure processing and related processes».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89053057279

E-mail: enpster@gmail.com

Polunin Anton Victorovich, junior researcher of the Research division № 4.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 8 (8482) 53-91-46

E-mail: Anpol86@gmail.com

Pozdnov Maxim Vladimirovich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89297176167

E-mail: instan@mail.ru

Pryadilov Aleksey Vadimovich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the Department of Industrial Electronics.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89061298623

E-mail: limitov@yandex.ru

Puteyev Pavel Aleksandrovich, post-graduate student, lecturer of the department «Welding, materials pressure processing and related processes».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89608365606

E-mail: pputeev@gmail.com

Remneva Oksana Yurievna, candidate of technical sciences, assistant at the Department «Service of technical and technological systems».

Address: Volga Region State University of Service, 445677, Samara region, Togliatti, Gagarin Street, 4.

E-mail: RemnevaOJ@mail.ru

Rodionov Igor Igorevich, buildings maintenance engineer.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-86

E-mail: inmylave@mail.ru

Rodionov Igor Konstantinovich, candidate of technical sciences, Associate Professor, assistant professor of the department «Urban Construction and Management».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482)53-92-86

E-mail: riklt@mail.ru

Sagitov Damir Ildarovich, candidate of technical sciences, assistant professor of the department «Metal-cutting machines and tools».

Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.

Tel.: 41-80-83

E-mail: sagdam@mail.ru

Shenberger Polina Nikolaevna, senior lecturer of the department «Welding, materials pressure processing and related processes».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-98

E-mail: Shenberger@tltsu.ru

Shevtsov Alexander Alexandrovich, candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department «Industrial Electronics».

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-92-03

E-mail: a_shevtsov@list.ru

Sidorov Vladimir Petrovich, Doctor of Engineering, Professor of the Department «Welding, material pressure processing and allied processes».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Тел.: (8482) 539245

E-mail: otsp@tltsu.ru

Soler Yakov Iosifovich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Mechanical Engineering Technology».

Address: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Russia, Irkutsk region, Irkutsk, Lermontov Street, 83.

Tel.: 8 (3952) 40-54-59

E-mail: solera@istu.irk.ru

Strizhakov Yevgeny Lvovich, Doctor of Engineering, Professor of the Department « Machinery and automation of welding production ».

Address: Don State Technical University, 344000, Russia, Rostov-on-Don, Gagarin Sq., 1.

Tel.: 89198944330

E mail: strizhakov@ inbox.ru

Tabakov Vladimir Petrovich, Doctor of Engineering, Professor, Head of the department «Metal-cutting machines and tools».

Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.

Tel.: 41-80-83

E-mail: vpt@ulstu.ru

Tverdohlebov Andrey Yakovlevich, junior researcher of the Research division № 4.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89171385482

E-mail: sarc@bk.ru

Unyanin Aleksandr Nikolaevich, Doctor of Engineering, Associate Professor.

Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk region, Ulyanovsk, Severniy Venets Street, 32.

Tel.: (8422) 43-19-71

E-mail: a_un@mail.ru

Vaskin Kirill Yakovlevich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Equipment and machinery production technologies».

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-95-82

E-mail: Vaskink@mail.ru

Vitkalov Vitaly Grigorievich, candidate of technical sciences, assistant professor of the Department «Design and Engineering Graphics».

Address: Togliatti State University, 445667, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 49-96-29

E-mail: iya67@list.ru

Zinina Elena Petrovna, Doctor of Engineering, assistant professor of the Department of Design of engineering and technological complexes.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.

Tel.: (8452) 99-86-39

E-mail: e-zinina@bk.ru