

ВЕКТОР НАУКИ

Тольяттинского
государственного
университета

Основан в 2008 г.

№ 3-1(33-1)
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

Заместитель главного редактора по общим вопросам

Коростелев Александр Алексеевич, д.п.н.

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Машиностроение и машиноведение»

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

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Металлургия и материаловедение»

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

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Химическая технология»

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

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Социологические науки»

Иванова Татьяна Николаевна, д.соц.н., доцент

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание»

Тараносова Галина Николаевна, д.п.н., профессор

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 30.09.2015.
Формат 60x84 1/8.
Печать оперативная.
Усл. п. л. 19,5.
Тираж 500 экз. Заказ 3-505-15.

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

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

Криштал Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ректор Тольяттинского государственного университета.

Заместитель главного редактора по общим вопросам

Коростелев Александр Алексеевич, доктор педагогических наук, профессор кафедры «Педагогика и методики преподавания» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Машиностроение и машиноведение»

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Металлургия и материаловедение»

Мерсон Дмитрий Львович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института перспективных технологий Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по техническому направлению, секция «Химическая технология»

Остапенко Геннадий Иванович, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия, химические процессы и технологии» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Социологические науки»

Иванова Татьяна Николаевна, доктор социологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Социология» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание»

Тараносова Галина Николаевна, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры «Русский язык и литература» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Редколлегия:

Андреюшкина Татьяна Николаевна, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и практика перевода» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Бакалова Зинаида Николаевна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры «Русский язык, культура речи и методика их преподавания» Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Борисова Елена Борисовна, доктор филологических наук, профессор кафедры английской филологии и межкультурной коммуникации Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Бочкарев Петр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина (Саратов, Россия).

Бржозовский Борис Максевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина (Саратов, Россия).

Буранок Олег Михайлович, доктор филологических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой русской, зарубежной литературы и методики преподавания литературы Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Верещака Анатолий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (Москва, Россия).

Виноградов Алексей Юрьевич, доктор технических наук, замдиректора по научной работе Научно-исследовательского института перспективных технологий Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Москва, Россия).

Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук, профессор, директор института металловедения и физики металлов имени Г.В. Курдюмова ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт имени И.П. Бардина» (Москва, Россия).

Горбунов Юрий Иванович, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и практика перевода» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Готлиб Анна Семеновна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Методология социологических и маркетинговых исследований» Самарского государственного университета (Самара, Россия).

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» Самарского государственного технического университета (Самара, Россия).

Звоновский Владимир Борисович, доктор социологических наук, директор Самарской региональной общественной организации «Фонд социальных исследований» (Самара, Россия).

Иванян Елена Павловна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры «Русский язык, культура речи и методика их преподавания» Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Казаков Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлургические технологии» института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Санкт-Петербург, Россия).

Карнов Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института физики твердого тела РАН (Черноголовка, Россия).

Кострова Ольга Андреевна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры немецкого языка Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металловедения и физики прочности Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Москва, Россия).

Кузьминский Анатолий Иванович, член-корреспондент НАПН Украины, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры педагогики высшей школы и образовательного менеджмента Черкасского национального университета имени Богдана Хмельницкого (Черкассы, Украина).

Кулинич Марина Александровна, доктор культурологии, профессор кафедры английской филологии и межкультурной коммуникации Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Ларшин Василий Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Одесского национального политехнического университета (Одесса, Украина).

Лодатко Евгений Александрович, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры педагогики высшей школы и образовательного менеджмента Черкасского национального университета имени Богдана Хмельницкого (Черкассы, Украина).

Макаров Алексей Викторович, доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения и лабораторией механических свойств Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (Екатеринбург, Россия).

Морозова Алевтина Николаевна, доктор филологических наук, заведующий кафедрой английского языка и методики преподавания иностранных языков Поволжской государственной социально-гуманитарной академии (Самара, Россия).

Морозова Ирина Станиславовна, доктор психологических наук, профессор, заведующий кафедрой общей психологии и психологии развития Кемеровского государственного университета (Кемерово, Россия).

Наймарк Олег Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Физические основы прочности» Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (Пермь, Россия).

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», декан факультета машиностроения и автомобильного транспорта Самарского государственного технического университета (Самара, Россия).

Орлова Людмила Викторовна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление персоналом» Самарской академии государственного и муниципального управления (Самара, Россия).

Пилинский Александр Вениаминович, кандидат технических наук, доцент, MSME (Master of Science in Mechanical Engineering), менеджер компании «Реймер Металс Корпорейшн» (Лос-Анджелес, США).

Плахова Ольга Александровна, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и методика преподавания иностранных языков и культур» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Романов Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник сектора теории твердого тела Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, заведующий кафедрой светодиодных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Санкт-Петербург, Россия).

Рубаник Василий Васильевич, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, доцент Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси (Витебск, Беларусь).

Старобинский Рудольф Натанович, доктор технических наук, профессор, научный консультант инженерного бюро «Prof. Starobinski. Silencers. Consulting and Engineering» (Гамбург, Германия).

Табачков Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, Россия).

Тарский Юрий Иванович, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Социология и социальная политика» Поволжского института управления имени П.А. Столыпина (Саратов, Россия).

Тарская Ольга Юрьевна, доктор социологических наук, доцент, профессор кафедры «Социология и социальная политика» Поволжского института управления имени П.А. Столыпина (Саратов, Россия).

Худобин Леонид Викторович, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, Россия).

Шиняева Ольга Викторовна, доктор социологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Политология, социология и связи с общественностью» Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, Россия).

Шишков Владимир Александрович, доктор технических наук, начальник технического отдела ООО «Рекар» (Тольятти, Россия).

Щербакова Галина Ивановна, доктор филологических наук, профессор, профессор кафедры «Журналистика» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

Эстрин Юрий Захарович, кандидат физико-математических наук, доктор естественных наук (Германия), почетный доктор РАН, профессор кафедры материаловедения Университета имени Монаша (Мельбурн, Австралия).

Явон Снежана Владимировна, доктор социологических наук, доцент, доцент кафедры «Социальные технологии» Поволжского государственного университета сервиса (Тольятти, Россия).

Ярыгин Анатолий Николаевич, доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры «Информатика и вычислительная техника» Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

СОДЕРЖАНИЕ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НЕРАВНОМЕРНЫХ КОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛУ СВЯЗИ С.П. Ковальский, Р.М. Абдуразаков.....	11
---	-----------

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ В.Ф. Безъязычный.....	21
--	-----------

РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ Л.Г. Бокова, П.Ю. Бочкарев.....	29
---	-----------

РАСЧЕТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ШЛИФОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ Н.И. Веткасов, А.В. Степанов.....	36
---	-----------

ЛИНЕЙНАЯ И РАЗВЕТВЛЕННАЯ СХЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ А.В. Гордеев.....	42
--	-----------

ВИБРАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ МАСЛОУДЕРЖИВАЮЩИХ ЛУНОК НА ШЕЙКАХ ВАЛОВ А.А. Гордеев, А.К. Кармалита, А.И. Гордеев.....	47
---	-----------

О СВЯЗИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗАНИИ А.В. Гусев, В.В. Закураев, А.Г. Ничков.....	52
---	-----------

СВАРКА ТРУБ С СИЛИКАТНО-ЭМАЛЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ А.И. Ковтунов, Н.С. Алексеев, Д.И. Плахотный, О.В. Танасов.....	60
--	-----------

ВЛИЯНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ШЛИФОВАНИЯ Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин.....	68
---	-----------

ТЕМПЕРАТУРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПРЕРЫВИСТЫМИ И ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин.....	75
--	-----------

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ АЛМАЗНОМ ЗАТАЧИВАНИИ Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, П.В. Архипов.....	85
--	-----------

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ РЕЗАНИЯ Н.П. Мазур.....	92
---	-----------

ФОРМИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТЕРЖНЯХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ Д.А. Расторгуев, К.О. Семенов.....	100
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОВОЛЖЬЯ С.Ш. Сайриддинов.....	106
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ПОЛУФАБРИКАТОВ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА В.В. Сапунов, Н.И. Веткасов, Л.В. Худобин.....	117
ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В РЕЗОНАНСНОМ ВИБРАЦИОННОМ СТАНКЕ ДЛЯ ДОВОДКИ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ Р.И. Силин, В.В. Третько, А.И. Гордеев.....	123
ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОЙ ТЕХНИКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Е.М. Табакин, Г.В. Мирошниченко, А.В. Каплин, С.А. Андреев.....	129
ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ М.И. Фесина, А.В. Краснов, Л.Н. Горина, Е.Н. Шутова.....	135
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ИХ КОНТАКТЕ С ПОДЛОЖКОЙ А.А. Хафизов, Ю.И. Шакиров, С.Н. Тимергалиев, В.И. Ильин.....	141
ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ И СНЯТИЕ ЗАУСЕНЦЕВ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ, ГОРЯЩИМ МЕЖДУ СТРУЕЙ ЭЛЕКТРОЛИТА И ТВЕРДЫМ ЭЛЕКТРОДОМ Ю.И. Шакиров, Р.И. Валиев, А.А. Хафизов, А.Н. Сущикова, И.М. Нуриев.....	146
НАШИ АВТОРЫ.....	153

CONTENT

NATURAL SCIENCES

THE ANALYSIS OF NOISE STABILITY OF UNEVEN CODES APPLIED FOR THE INFORMATION TRANSFER VIA THE COMMUNICATION CHANNEL S.P. Kovalskiy, R.M. Abdurazakov.....	11
--	-----------

TECHNICAL SCIENCES

PROCESSING ERRORS ARISING FROM THERMAL DEFORMATION OF CUTTING TOOL AND PROCESSED PART V.F. Bezyazychny.....	21
---	-----------

DEVELOPMENT OF INDICATORS FOR ASSESSMENT OF PARTS OPERABILITY IN THE SYSTEM OF PLANNING OF ENGINEERING MECHANICAL PROCESSING L.G. Bokova, P.Y. Bochkarev.....	29
---	-----------

CALCULATION OF ROUGHNESS OF SURFACES GROUND USING SOLID LUBRICANTS N.I. Vetkasov, A.V. Stepanov.....	36
--	-----------

LINEAR AND SUBDIVIDED SCHEMES OF GETTING ENGINEERING SOLUTIONS A.V. Gordeev.....	42
--	-----------

VIBRATION EQUIPMENT FOR APPLYING OF OIL-RETAINING HOLES ON THE STUB SHAFTS A.A. Gordeev, A.K. Karmalita, A.I. Gordeev.....	47
--	-----------

ABOUT ASSOCIATION OF DEFORMATION PARAMETERS OF CHIP FORMATION AND CHARACTERISTICS OF FLUCTUATIONS DURING CUTTING A.V. Gusev, V.V. Zakuraev, A.G. Nichkov.....	52
---	-----------

WELDING OF PIPES WITH SILICATE ENAMEL COATING A.I. Kovtunov, N.S. Alekseev, D.I. Plakhotny, O.V. Tanasov.....	60
---	-----------

THE INFLUENCE OF LUBRICATING FLUID COOLANT ACTION ON GRINDING TEMPERATURE N.V. Lishchenko, V.P. Larshin.....	68
--	-----------

TEMPERATURE DURING GRINDING BY INTERRUPTED AND HIGHLY POROUS GRINDING WHEELS N.V. Lishchenko, V.P. Larshin.....	75
---	-----------

DEFLECTED MODE OF HARD-ALLOY CUTTING ELEMENTS AT DIAMOND SHARPENING D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, P.V. Arkhipov.....	85
---	-----------

IMPROVEMENT OF ANALYTICAL METHODS OF CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN THE CUTTING SYSTEM N.P. Mazur.....	92
--	-----------

THE FORMATION OF DISTRIBUTION OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATION IN THE RODS IN THE RESULT OF WAVE PROCESSES D.A. Rastorguev, K.O. Semenov.....	100
--	------------

HYDRAULIC AND TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF WATER SUPPLY SYSTEMS OPERATION IN THE VOLGA REGION ENVIRONMENT S.S. Sayriddinov.....	106
MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE HEATING OF SEMIFINISHED ABRASIVE TOOLS V.V. Sapunov, N.I. Vetkasov, L.V. Khudobin.....	117
DYNAMIC MODEL AND ITS IMPLEMENTATION IN RESONANT VIBRATION MACHINE FOR FLAT ARTICLES GRINDING R.I. Silin, V.V. Tret'ko, A.I. Gordeev.....	123
SPECIAL ASPECTS OF WELDING OF ALUMINUM ALLOYS COMPONENTS FOR NUCLEAR PLANTS E.M. Tabakin, G.V. Miroshnichenko, A.V. Kaplin, S.A. Andreev.....	129
INFORMATION ANALYSIS OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF UTILIZATION RECYCLING OF AUTOMOBILE BATTERIES M.I. Fesina, A.V. Krasnov, L.N. Gorina, E.N. Shutova.....	135
TEMPERATURE DISTRIBUTION DURING POWDER COATINGS APPLYING USING PLASMA STREAM WITHIN THEIR CONTACT WITH THE SUBSTRATE LAYER A.A. Khafizov, Yu.I. Shakirov, S.N. Timergaliev, V. I. Ilyin.....	141
PIERCING AND DEBURRING OF METAL PARTS USING ELECTRIC DISCHARGE BETWEEN ELECTROLYTE JET AND SOLID ELECTRODE Yu.I. Shakirov, R.I. Valiev, A.A. Khafizov, A.N. Sushchikova, I.M. Nuriev.....	146
OUR AUTHORS.....	153

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ НЕРАВНОМЕРНЫХ КОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛУ СВЯЗИ

© 2015

С.П. Ковальский, кандидат технических наук, сотрудник
Р.М. Абдуразаков, сотрудник
Академия Федеральной службы охраны России, Орел (Россия)

Ключевые слова: неравномерные коды; обнаружение синхронизации; последовательный анализ; вероятность ошибки обнаружения; полиномиальное распределение; оценка эффективности.

Аннотация: В статье решается задача обнаружения синхронизации в кодовой последовательности неравномерных кодов, потерянной за счет влияния ошибок в канале связи при передаче сжатых сообщений.

С этой целью на основе статистических свойств источника сообщений и цифрового канала связи были получены функции правдоподобия наблюдений при наличии и при отсутствии синхронизации. В этой ситуации в качестве наблюдений могут быть использованы частоты появления букв алфавита заданного объема в декодированной последовательности символов. В качестве базового распределения использовано полиномиальное распределение, которое характеризует частоты появления букв алфавита в выборке заданного объема в зависимости от их вероятностей. Особенностью предлагаемого подхода для обнаружения синхронизации является использование полиномиального распределения для описания функции правдоподобия отсутствия синхронизации на основе теории распознавания сложных гипотез при равномерном усреднении.

В результате такого подхода было получено отношение правдоподобия в зависимости от вероятностей появления букв алфавита, по которому можно сделать вывод о наличии или отсутствии синхронизации.

На основе процедуры последовательного анализа разработан алгоритм обнаружения синхронизации при неравномерном кодировании. В качестве показателя оценки эффективности алгоритма выбрана величина среднего байесовского риска, представленного в виде вероятности ошибки обнаружения синхронизации.

Анализ помехоустойчивости неравномерных кодов показывает, что при применении на сетях связи современных мультимедийных технологий возрастают объемы передаваемой информации и используемого алфавита сообщений, что приводит к потере синхронизации и эффекту размножения ошибок. Это приводит к частичной или полной потере информации. Разработанный алгоритм позволит восстанавливать сжатые сообщения, искаженные в результате передачи по каналу связи.

Основным условием осуществимости процесса сжатия информации является обеспечение безошибочной передачи кодовой последовательности с выхода компрессора на вход декомпрессора, т. е. канал связи не должен вносить искажений в передаваемый сигнал. Данное условие выступает в качестве главного ограничения при синтезе алгоритмов сжатия информации [1–3].

Поэтому дискретный канал, связывающий компрессор и декомпрессор, в обязательном порядке включает средства помехоустойчивого канального кодирования и декодирования. Однако в ряде случаев канальный декодер не позволяет исправить все возникающие ошибки. Тогда кодовая последовательность, поступающая на вход декомпрессора, содержит искажения, которые приводят к нарушениям процесса декомпрессии и не позволяют восстановить исходное сообщение частично (для статических методов сжатия) либо полностью (для адаптивных методов сжатия) [4; 5]. Особенно влияние искажений в канале связи сказывается на широко используемых в современных информационных технологиях неравномерных кодах. В этих кодах происходит потеря синхронизации, что приводит к эффекту размножения ошибок [6–8]. В связи с этим актуальной представляется задача восстановления сжатых с помощью неравномерных кодов сообщений, искаженных в результате передачи по каналу связи.

Исследование помехоустойчивости неравномерных кодов проводилось на основе анализа вероятностей ошибок синхронизации в последовательности символов

и в последовательности, образуемой узлами дерева неравномерного кодирования, для случая отсутствия ошибок в канале связи, а также влияния ошибок в канале связи на передачу сжатых сообщений.

Для восстановления сжатых сообщений необходимо решить задачу обнаружения синхронизации в кодовой последовательности.

Так как при обнаружении синхронизации в неравномерных кодах возможны две ситуации: синхронизация есть или синхронизации нет, то задачу обнаружения предлагается решать в рамках теории статистических гипотез [9–12].

При решении задачи обнаружения синхронизации имеется две гипотезы:

- синхронизация есть (H_1);
- синхронизации нет (H_0).

По правилу решения следует выбирать либо гипотезу H_1 , либо гипотезу H_0 . Пространство наблюдений разбито на две части: Z_1 и Z_0 . Если результат наблюдения оказывается в области Z_0 , то принимается гипотеза H_0 , а если результат наблюдения оказывается в области Z_1 , то принимается гипотеза H_1 .

Пространство наблюдений в данном случае – частоты появления букв алфавита, по которым принимается решение о наличии или отсутствии синхронизации в кодовой последовательности.

При наличии синхронизации в кодовой последовательности известен вектор вероятностей появления букв алфавита и кодовая последовательность описывается с помощью многомерного полиномиального

распределения с параметрами $(M, p_1, p_2, \dots, p_n)$; $(0 < p_i < 1, \sum p_i = 1)$, если

$$P = \frac{M!}{m_1! m_2! \dots m_n!} p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n}, \quad (1)$$

где M – длина последовательности символов;
 n – объем алфавита;
 m – частота появления буквы алфавита;
 p – вероятность появления буквы алфавита.

Для вектора $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$, $\sum_{i=1}^n m_i = M$.

При отсутствии синхронизации уровень априорной неопределенности выше, так как неизвестен вектор (p_1, p_2, \dots, p_n) вероятностей появления букв алфавита. Поэтому в случае отсутствия синхронизации необходимо прибегать к рассмотрению сложных гипотез. Отличие от простых гипотез состоит в том, что вводится дополнительное пространство параметров, характеризующих сложные гипотезы [13–15].

В этом случае пространством параметров будет вектор вероятностей появления букв алфавита, который неизвестен. Поэтому для получения описания кодовой последовательности при отсутствии синхронизации усредняется полиномиальное распределение по неизвестным параметрам с помощью многомерного равномерного распределения.

Отношение правдоподобия при обнаружении синхронизации вычисляется по формуле:

$$\Lambda(\bar{m}) = \frac{P(\bar{m} / H_0)}{P(\bar{m} / H_1)}, \quad (2)$$

где $P(\bar{m} / H_0)$ – плотность распределения вероятности частот появления m букв по гипотезе H_0 ;

$P(\bar{m} / H_1)$ – плотность распределения вероятности частот появления m букв по гипотезе H_1 .

Для наихудшего случая при отсутствии синхронизации считаем, что вектор вероятностей появления букв алфавита (p_1, p_2, \dots, p_n) распределен в области G равномерно и имеет плотность распределения $\frac{1}{V(G)}$, где

$V(G)$ – объем поверхности G [16]. Поверхность G в данном случае описывается уравнением $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$.

Плотность распределения вероятности параметра m по гипотезе H_0 определяется:

$$P(\bar{m} / H_0) = \frac{1}{V(G)} \int_G \frac{M!}{m_1! m_2! \dots m_n!} p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n} d\bar{p}. \quad (3)$$

Объем поверхности G для n -мерного случая:

$$V(G) = \int_G \sqrt{1 + \frac{\partial(1 - p_1 - p_2 - \dots - p_{n-1})}{\partial p_1} + \dots + \frac{\partial(1 - p_1 - p_2 - \dots - p_{n-1})}{\partial p_{n-1}}} d\bar{p}. \quad (4)$$

Получается выражение:

$$V(G) = \sqrt{n} \int_G d\bar{p}. \quad (5)$$

В итоге анализ результатов вычисления интегралов для одно-, двух-, трех-, четырех-, пяти- и шестимерного случая с помощью метода математической дедукции дает выражение для вычисления объема поверхности G :

$$V(G) = \frac{\sqrt{n}}{(n-1)!}. \quad (6)$$

При подстановке выражения (6) в формулу (3) получается:

$$P(\bar{m} / H_0) = \frac{(n-1)!}{\sqrt{n}} \int_G \frac{M!}{m_1! m_2! \dots m_n!} p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n} d\bar{p}. \quad (7)$$

Выражение $\int_G p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n} d\bar{p}$ обозначается как A .

Тогда:

$$A = \int_0^{1-p_1} \int_0^{1-p_1-p_2} \dots \int_0^{1-p_1-p_2-\dots-p_{n-2}} p_1^{m_1} \dots p_{n-1}^{m_{n-1}} (1 - p_1 - \dots - p_{n-1})^{m_n} dp_1 dp_2 \dots dp_{n-1} \sqrt{n}. \quad (8)$$

Для вычисления интегралов полином вида $(1 - p_1 - p_2 - \dots - p_{n-1})^{m_n}$ преобразуется по формуле бинома Ньютона [16]:

$$(a - b)^n = \sum_{k=0}^n (-1)^k C_n^k a^{n-k} b^k, \quad (9)$$

где $a=1$;

$b = (p_1 - p_2 - \dots - p_{n-1})$.

Получается следующее выражение:

$$(1 - p_1 - p_2 - \dots - p_{n-1})^{m_n} = \sum_{k=0}^{m_n} (-1)^k C_{m_n}^k 1^{m_n-k} (p_1 - p_2 - \dots - p_{n-1})^k.$$

Преобразование A приводит к выражению:

$$A = \sqrt{n} \prod_{i=0}^{n-2} \sum_{k=0}^{i+1} (-1)^k C_{i+1}^k \frac{1}{(\sum_{j=1}^{i+1} m_{n-(j-1)}) + i} \frac{1}{m_{n-(i+1)} + k + 1}. \quad (10)$$

Итоговое выражение для плотности распределения вероятности частот появления m букв по гипотезе H_0 получается подстановкой (10) в (7):

$$P(\bar{m} / H_0) = (n-1)! \frac{M!}{m_1! m_2! \dots m_n!} \prod_{i=0}^{n-2} \sum_{k=0}^{(\sum_{j=1}^{i+1} m_{n-(j-1)})+i} (-1)^k C_{(\sum_{j=1}^{i+1} m_{n-(j-1)})+i}^k \frac{1}{m_{n-(i+1)} + k + 1} \quad (11)$$

Выражение (2) определяется как отношение (1) к (11):

$$\Lambda(\bar{m}) = \frac{(n-1)!}{p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n}} \prod_{i=0}^{n-2} \sum_{k=0}^{(\sum_{j=1}^{i+1} m_{n-(j-1)})+i} (-1)^k C_{(\sum_{j=1}^{i+1} m_{n-(j-1)})+i}^k \frac{1}{m_{n-(i+1)} + k + 1} \quad (12)$$

Данное выражение позволяет обнаружить наличие или отсутствие синхронизации в кодовой последовательности при неравномерном кодировании. Однако на практике решить задачу обнаружения с помощью параллельного анализа сложно из-за ограничений на вычислительную сложность ПЭВМ. Поэтому задачу приходится решать поэтапно, разбивая кодовую последовательность на блоки.

Таким образом, необходимо разработать алгоритм с помощью последовательной процедуры анализа, на основе которого принималась бы одна из двух гипотез: отсутствие или наличие синхронизации.

Классическая процедура последовательного анализа для выбора одной из двух гипотез может быть описана следующим образом. Дается правило принятия на каждом этапе эксперимента при k -й пробе (k – число блоков) одного из следующих трех решений:

- 1) закончить эксперимент принятием H_0 ;
- 2) закончить эксперимент принятием H_1 ;
- 3) продолжить эксперимент, производя дополнительное наблюдение.

Такая процедура выполняется последовательно. На основе первого наблюдения принимается одно из вышеупомянутых решений. Если принимается одно из двух первых решений, процесс заканчивается. Если принимается последнее решение, производится второе наблюдение. Снова на основе первых двух наблюдений принимается одно из трех решений. Если принимается последнее решение, производится третье наблюдение и т. д. Процесс продолжается до окончания сообщения, т. е. последнего блока, и заканчивается принятием одного из двух решений [17].

Для задачи обнаружения синхронизации решение будет приниматься после анализа всей кодовой последовательности. Кодовая последовательность разбивается на блоки равной длины. Фиксируется число наблюдений, то есть частот, на всех блоках. На длине каждого блока подсчитывается количество выпадений каждой буквы алфавита и формируется вектор \bar{m} .

Затем вычисляются условные вероятности отсутствия $P(H_0 / \bar{m})$ и наличия $P(H_1 / \bar{m})$ синхронизации относительно результатов наблюдений на каждом блоке. Сначала эти условные вероятности определяются для первого блока:

$$P(H_0 | \bar{m}_1) = \frac{P(\bar{m}_1 | H_0) P(H_0)}{\sum_{i=0}^1 P(\bar{m}_i) P(\bar{m} | H_i)} \quad (13)$$

где \bar{m} – вектор частот появления букв;

$$P(H_1 | \bar{m}_1) = \frac{P(\bar{m}_1 | H_1) P(H_1)}{\sum_{i=0}^1 P(\bar{m}_i) P(\bar{m} | H_i)} \quad (14)$$

Для k -го блока:

$$P(H_0 | \bar{m}_k) = \frac{P(\bar{m}_k | H_0) P(H_0 | \bar{m}_{k-1})}{\sum_{i=0}^1 P(H_i | \bar{m}_{k-1}) P(\bar{m}_k | H_i)} \quad (15)$$

$$P(H_1 | \bar{m}_k) = \frac{P(\bar{m}_k | H_1) P(H_1 | \bar{m}_{k-1})}{\sum_{i=0}^1 P(H_i | \bar{m}_{k-1}) P(\bar{m}_k | H_i)} \quad (16)$$

Таким образом, априорные вероятности изменяются от блока к блоку.

Принятие решения о наличии или отсутствии синхронизации происходит по полученным значениям для последнего блока, то есть k -го блока [18]:

- если $P(H_1 | \bar{m}_k) > P(H_0 | \bar{m}_k)$ – синхронизм есть;
- если $P(H_1 | \bar{m}_k) < P(H_0 | \bar{m}_k)$ – синхронизма нет.

На основе процедуры последовательного анализа разработан алгоритм обнаружения синхронизации при неравномерном кодировании:

1. Исходные данные:

- n – объем алфавита;
- k – число блоков;
- \bar{m} – вектор частот появления букв алфавита;
- c – номер шага.

2. Выходные данные:

принять гипотезу: синхронизация есть или синхронизации нет.

П. 1. Разбить кодовую последовательность на k равных блоков.

П. 2. $c=1$.

П. 3. Вычислить условные вероятности наличия $P(H_1 | \bar{m}_c)$ или отсутствия синхронизации $P(H_0 | \bar{m}_c)$ для c -го блока по (13) и (14).

П. 4. $c=c+1$.

П. 5. Повторять п. 3. и п. 4. для последующих блоков до тех пор, пока $c \leq k$.

П. 6. Если $c = k$, то вычислить условные вероятности наличия $P(H_1 | \bar{m}_k)$ или отсутствия синхронизации $P(H_0 | \bar{m}_k)$ для k -го блока по (15) и (16).

П. 7. Принять решение о наличии или отсутствии синхронизации по значениям $P(H_0 | \bar{m}_k)$ и $P(H_1 | \bar{m}_k)$:
 – если $P(H_1 | \bar{m}_k) > P(H_0 | \bar{m}_k)$ – синхронизация есть;

– если $P(H_1 | \bar{m}_k) < P(H_0 | \bar{m}_k)$ – синхронизации нет.

В качестве показателя оценки эффективности разработанного алгоритма выбрана величина среднего байесовского риска [19], представленного в виде вероятности ошибки обнаружения синхронизации:

$$\mathfrak{R} = p_0 \int_{Z_1} p(\bar{m} | H_0) d\bar{m} + p_1 \int_{Z_0} p(\bar{m} | H_1) d\bar{m}, \quad (17)$$

где p_0 – априорная вероятность отсутствия синхронизации; p_1 – априорная вероятность наличия синхронизации; Z – пространство наблюдений (частоты появления букв алфавита);

Z_1 – подпространство наблюдений, где решение принимается в пользу гипотезы H_1 ;

Z_0 – подпространство наблюдений, где решение принимается в пользу гипотезы H_0 .

Нетрудно заметить, что (17) есть просто полная вероятность допустить ошибку.

Так как вектор частот \bar{m} принимает дискретные значения, то плотности вероятностей заменяются на ряды распределения вероятностей, а интегралы переходят в суммы.

$$\mathfrak{R} = p_0 \sum_{Z_1} P_O(\bar{m}) + p_1 \sum_{Z_0} P_C(\bar{m}) \rightarrow \min_{Z_1, Z_0, Z_1 \cup Z_0 = Z}, \quad (18)$$

где $P_C(\bar{m})$ – ряд распределения вероятностей при наличии синхронизации;

$P_O(\bar{m})$ – ряд распределения вероятностей при отсутствии синхронизации.

Чтобы определить вероятность ошибки согласно (18), необходимо разбить пространство частот появления букв алфавита Z на подпространства Z_1 и Z_0 .

Для выбранной процедуры последовательного анализа данных вычисление (18) необходимо проводить для последовательности блоков. При этом при переходе от блока к блоку изменяются априорные вероятности p_1 и p_0 путем замены их на апостериорные вероятности.

Такая замена после преобразований приводит к выражениям вероятности ошибки обнаружения синхронизации $P_{ОШ\text{ ОБ}}$:

– для первого блока:

$$P_{ОШ\text{ ОБ}_1} = p_1 \sum_{Z_{01}} P_C(\bar{m}_1) + p_0 \sum_{Z_{11}} P_O(\bar{m}_1), \quad (19)$$

где $Z_{11} \cup Z_{01} = Z_1$;

– для второго блока:

$$P_{ОШ\text{ ОБ}_2} = p_1 \sum_{Z_{01}} P_C(\bar{m}_1) \sum_{Z_{02}} P_C(\bar{m}_2) + p_0 \sum_{Z_{11}} P_O(\bar{m}_1) \sum_{Z_{12}} P_O(\bar{m}_2), \quad (20)$$

где $Z_{11} \cup Z_{01} = Z_1$;

$Z_{12} \cup Z_{02} = Z_2$.

Выражение $P_{ОШ\text{ ОБ}}$ для последнего k -го блока:

$$P_{ОШ\text{ ОБ}_k} = p_1 \sum_{Z_{01}} P_C(\bar{m}_1) \dots \sum_{Z_{0k}} P_C(\bar{m}_k) + p_0 \sum_{Z_{11}} P_O(\bar{m}_1) \dots \sum_{Z_{1k}} P_O(\bar{m}_k), \quad (21)$$

где $Z_{11} \cup Z_{01} = Z_1$;

$Z_{1k} \cup Z_{0k} = Z_k$.

Определение $P_{ОШ\text{ ОБ}}$ по выражению (21) приводит к значительным вычислительным затратам, вследствие независимости в общем случае разбиения каждого из k пространств.

С целью уменьшения вычислительной сложности оценка эффективности производилась по верхней границе $P_{ОШ\text{ ОБ}}$. Для формирования верхней границы вводится ограничение на множество возможных разбиений k пространств. Таким ограничением является равенство разбиений.

Ряды распределения вероятностей, зависящие от вектора частот, при наличии синхронизации одинаковы при обработке любого из k блоков. То же самое можно сказать о рядах распределения при отсутствии синхронизма.

Введение ограничения, а также равенство рядов распределения позволяет (21) записать в виде:

$$P_{ОШ\text{ ОБ}} = p_1 \sum_{Z_{01}} P_C(\bar{m}_1) \dots \sum_{Z_{0k}} P_C(\bar{m}_k) + p_0 \sum_{Z_{11}} P_O(\bar{m}_1) \dots \sum_{Z_{1k}} P_O(\bar{m}_k), \quad (22)$$

где $Z_0 = Z_{01} = Z_{02} = \dots = Z_{0k}$;

$Z_1 = Z_{11} = Z_{12} = \dots = Z_{1k}$.

Тогда задача нахождения верхней границы $P_{ОШ\text{ ОБ}}$ сводится к минимизации (22) на множестве всех возможных разбиений Z на Z_1 и Z_0 , где $Z = Z_1 \cup Z_0$.

Эта задача является задачей дискретного математического программирования в силу дискретности вектора частот. Кроме того, она имеет большую размерность пространства решений. В связи с этим выбирается лишь приближенный метод поиска оптимального решения – метод последовательного увеличения значения функционала на каждом шаге [18].

В качестве начального приближения решения (22) выбирается ситуация, когда $Z_0 = Z$, а $Z_1 = \emptyset$. При этом в начальной точке $P_{ОШ\text{ ОБ}} = 0,5$. Шагом процесса оптимизации является перемещение некоторого вектора частот из подпространства Z_0 в подпространства Z_1 .

Трудность выбора перемещаемого вектора частот, обеспечивающего наибольшее уменьшение функционала (22), обусловила выбор метода случайного поиска этого вектора.

Нахождение верхней оценки $P_{ОШ\text{ ОБ}}$ по (22) для различного объема алфавита n , где M – длина последовательности символов источника сообщений, показано на рис. 1. В ходе эксперимента использовались вероятности появления букв русского алфавита [20].

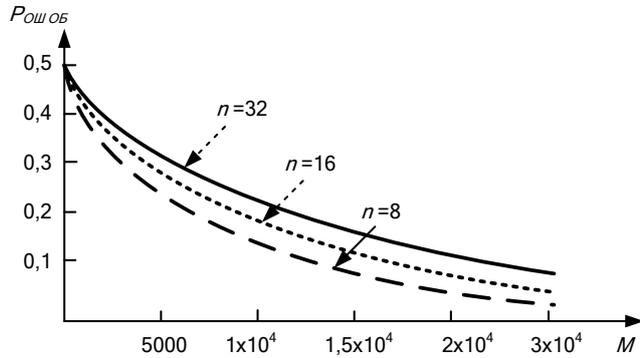


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки обнаружения синхронизации от длины последовательности символов

Анализ результатов (рис. 1) показывает, что с возрастанием объема алфавита источника увеличивается $P_{ОШ\text{ ОБ}}$.

Влияние потери синхронизации на передачу сжатых с помощью неравномерных кодов сообщений производилось с использованием выражения:

$$P_{\text{синхр}} = 1 - (1 - \bar{p}_D^T \cdot \bar{p}_D)^L, \quad (23)$$

где $\bar{p}_D^T = (p_{D1}, p_{D2}, \dots, p_{DN})$;

N – количество узлов дерева неравномерного кодирования;

p_{Dj} – вероятность появления j -го узла в N -ичной последовательности; $j = \overline{1, N}$;

L – длина N -ичной последовательности.

Результаты анализа (23) для различного количества узлов дерева кодирования показаны на рис. 2.

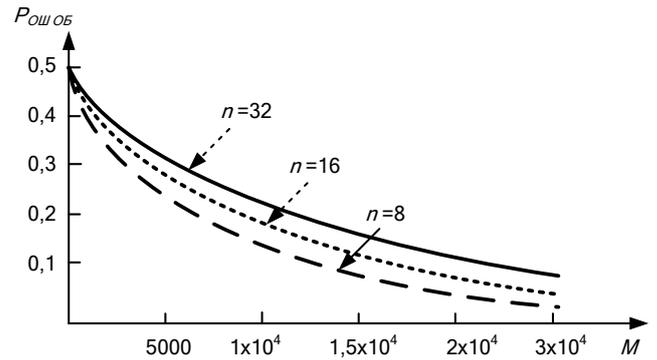


Рис. 2. Зависимость вероятности вхождения в синхронизацию от длины последовательности неравномерного кода

Влияние ошибок в канале связи на передачу сжатых сообщений производилось с использованием выражения:

$$P_{ОШ\text{ БЛОК}} = 1 - (1 - P_{ОШ N})^L, \quad (24)$$

где $P_{ОШ N}$ – средняя вероятность ошибки N -ичного символа;

$P_{ОШ}$ – вероятность ошибки в ДСК.

Результаты анализа (24) для $N=64$ показаны на рис. 3.

Таким образом, анализ помехоустойчивости неравномерных кодов показывает, что при применении на сетях связи современных мультимедийных технологий возрастают объемы передаваемой информации и используемого алфавита сообщений, что приводит к потере синхронизации и эффекту размножения ошибок. Это приводит к частичной или полной потере информации, что неприемлемо для передачи информации по каналу связи.

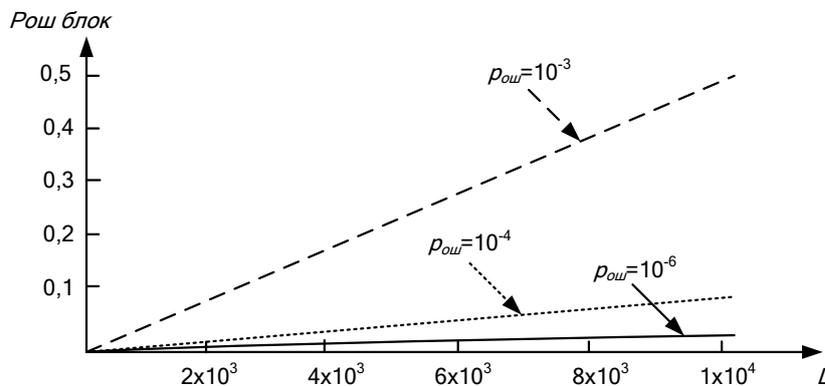


Рис. 3. Зависимость вероятности ошибки блока $P_{ОШ\text{ блок}}$ от длины последовательности неравномерного кода для различных $P_{ОШ}$ в ДСК

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сергеенко В.С., Баринов В.В. Сжатие данных, речи, звука и изображений в телекоммуникационных системах. М.: РадиоСофт, 2009. 360 с.
- Крук Б.И., Попантонопуло В.Н., Шувалов В.П. Телекоммуникационные системы и сети. В 3 т. Т. 1. Современные технологии. Изд. 3-е. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 647 с.
- Григорьев В.А., Григорьев С.В. Передача сообщений. СПб.: ВУС, 2002. 460 с.
- Кричевский Р.Е. Сжатие и поиск информации. М.: Радио и связь, 1989. 168 с.
- Сэлмон Д. Сжатие данных, изображений и звука. М.: Техносфера, 2004. 368 с.
- Стиффлер Д.Д. Теория синхронной связи. М.: Связь, 1975. 488 с.
- Сухман С.М., Бернов А.В., Шевкопляс Б.В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. М.: Эко-Трендз, 2003. 272 с.
- Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 384 с.
- Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
- Вернер М. Основы кодирования. М.: Техносфера, 2004. 288 с.
- Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1982. 624 с.
- Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. 3-е изд. М.: Академия, 2003. 427 с.
- Кудряшов Б.Д. Теория информации. СПб.: Питер, 2009. 320 с.
- Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. 2-е изд. М.: Радио и связь, 2004. 608 с.
- Сейдж Э., Мелс Д. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976. 496 с.
- Бронштейн И.П., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1981. 718 с.
- Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 447 с.
- Таха Х. Введение в исследование операций. Кн. 1. М.: Мир, 1985. 479 с.
- Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Советское радио, 1972. 744 с.
- Яглом А.М., Яглом И.М. Вероятность и информация. Изд. 5-е. М.: КомКнига, 2007. 512 с.
- Grigoryev V.A., Grigoryev S.V. *Peredacha soobshcheniy* [Messages transfer]. S. Petersburg, VUS Publ., 2002, 460 p.
- Krichevsky R.E. *Szhatie i poisk informatsii* [Information compression and search]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1989, 168 p.
- Selomon D. *Szhatie dannykh, izobrazheniy i zvuka* [Compression of data, images and sound]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004, 368 p.
- Stiffler D.D. *Teoriya sinkhronnoy svyazi* [Theory of synchronous communication]. Moscow, Svyaz Publ., 1975, 488 p.
- Sukhman S.M., Bernov A.V., Shevkoplyas B.V. *Sinkhronizatsiya v telekommunikatsionnykh sistemakh. Analiz inzhenernykh resheniy* [Synchronization in telecommunication systems. Analysis of engineering decisions]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2003, 272 p.
- Vatolin D., Ratushnyak A., Smirnov M., Yukin V. *Metody szhatiya dannykh. Ustroystvo arkhivatorov, szhatie izobrazheniy i video* [Methods of data compression. Arrangement of archivers, images and video compression]. Moscow, Dialog-MIFI Publ., 2002, 384 p.
- Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye* [Digital communication. Theoretical foundations and practical application]. 2nd ed. Moscow, Williams Publ., 2003, 1104 p.
- Verner M. *Osnovy kodirovaniya* [Basics of coding]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004, 288 p.
- Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* [Statistical radioengineering]. 2nd ed. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982, 624 p.
- Ventsel E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya sluchaynykh protsessov i ee inzhenernye prilozheniya* [Theory of random processes and its engineering applications]. 3rd ed. Moscow, Akademiya Publ., 2003, 427 p.
- Kudryashov B.D. *Teoriya informatsii* [Theory of information]. S. Petersburg, Piter Publ., 2009, 320 p.
- Tikhonov V.I., Kharisov V.N. *Statisticheskiiy analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem* [Statistical analysis and synthesis of radioengineering devices and systems]. 2nd ed. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2004, 608 p.
- Sage A.P., Melse J.L. *Teoriya otsenivaniya i ee primeniye v svyazi i upravlenii* [Estimation theory with application to communication and control]. Moscow, Svyaz Publ., 1976, 496 p.
- Bronshteyn I.P., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike* [Reference book on mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 718 p.
- Vapnik V.N. *Vosstanovlenie zavisimostey po empiricheskim dannym* [Reconstruction of dependences according to empirical data]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 447 p.
- Takha Kh. *Vvedeniye v issledovaniye operatsiy* [Introduction to operations study]. Moscow, Mir Publ., 1985, kn. 1, 479 p.
- Van Trees Harry L. *Teoriya obnaruzheniya, otsenki i modulyatsii* [Detection, estimation and modulation theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972, vol. 1, 744 p.
- Yaglom A.M., Yaglom I.M. *Veroyatnost' i informatsiya* [Theory and Decision Library]. 5th ed. Moscow, KomKniga Publ., 2007, 512 p.

REFERENCES

- Sergeenko V.S., Barinov V.V. *Szhatie dannykh, rechi, zvuka i izobrazheniy v telekommunikatsionnykh sistemakh* [Compression of data, speech, sound and images in telecommunication systems]. Moscow, RadioSoft Publ., 2009, 360 p.
- Kruk B.I., Popantonopulo V.N., Shuvalov V.P. *Telekommunikatsionnye sistemy i seti. Tom 1. Sovremennye tekhnologii* [Telecommunication systems and networks. Vol. 1. Modern technologies]. 3rd ed. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2004, 647 p.

**THE ANALYSIS OF NOISE STABILITY OF UNEVEN CODES APPLIED FOR THE INFORMATION
TRANSFER VIA THE COMMUNICATION CHANNEL**

© 2015

S.P. Kovalskiy, PhD (Engineering), member
R.M. Abdurazakov, member
Academy of Russian Federal Protective Service, Orel (Russia)

Keywords: uneven codes; synchronization detection; sequential analysis; probability of error detection; polynomial distribution; effectiveness evaluation.

Abstract: The article meets the challenge of the synchronization detection in the code sequence of uneven codes, lost in the result of impact of errors in the communication channel when transmitting compressed messages.

For this purpose, basing on statistical properties of the messages and digital communication channel source, the authors got the observation likelihood functions in the presence and in the absence of synchronization. In this situation, the frequencies of occurrence of volume-defined alphabetic letters in the decoded sequence of characters can be used as the observations. As a primary distribution, the authors used a polynomial distribution, which characterizes the frequencies of occurrence of alphabetic letters in the volume-defined selection depending on their probabilities. The peculiarity of this approach for the synchronization detection is the use of polynomial distribution for description of the function of synchronization unavailability likelihood on the basis of the theory of complex hypotheses recognition with a uniform averaging.

In the result of such approach, the authors obtained the likelihood ratio depending on the probabilities of alphabetic letters occurrence using which it is possible to make the conclusion about the presence or absence of synchronization.

The algorithm for synchronization detection in event of non-uniform encoding was developed on the base of the sequential analysis procedure. The value of average Bayes risk presented in the form of probability of synchronization detection error was selected to be an indicator for the algorithm effectiveness evaluation.

The analysis of noise stability of uneven codes shows that the application of modern multimedia technologies in communication networks increases the amount of transmitted information and used alphabet of messages that leads to the loss of synchronization and the effect of error propagation. It causes partial or total loss of data. The developed algorithm will allow recovering of the compressed messages that were distorted during their transmission via communication channel.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ
НАУКИ**

ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ ВСЛЕДСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА И ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

© 2015

В.Ф. Безъязычный, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения»
Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, Рыбинск (Россия)

Ключевые слова: заготовка; режущий инструмент; режим резания; температура резания; температурные деформации; погрешность обработки.

Аннотация: Излагается методика расчетного определения погрешностей обработки вследствие тепловых деформаций в процессе обработки заготовки и режущего инструмента. Решение поставленной задачи выполнено с использованием безразмерных комплексов процесса резания, которые учитывают технологические условия процесса обработки, а именно: режим резания (скорость резания, подача и глубина резания), геометрию режущей части инструмента (передний и задний углы резца, радиус при вершине резца в плане, радиус округления режущей кромки резца и др.), физико-механические и теплофизические свойства обрабатываемого и инструментального материалов (сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, температуропроводность обрабатываемого материала, теплопроводность обрабатываемого и инструментального материалов, коэффициенты температурного линейного расширения обрабатываемого и инструментального материалов и др.).

Полученные теоретические зависимости позволили получить численные значения погрешностей, обусловленных тепловыми деформациями заготовки и режущего инструмента, что позволило определить степень влияния на их величину подачи, скорости резания и других параметров процесса резания.

При определении погрешности, обусловленной тепловой деформацией режущего инструмента, учтена теплоотдача в окружающее пространство через боковые поверхности резца.

При получении теоретических зависимостей для определения погрешностей обработки использованы ранее полученные зависимости для расчетного определения температуры в зоне резания и распространения его в заготовке и режущем инструменте профессорами С.С. Силиным, А.Н. Резниковым, А.В. Лыковым и др.

Сопоставление расчетных значений погрешностей обработки с экспериментальными результатами, обусловленных температурной деформацией обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, показало достаточно близкое их совпадение, что вполне приемлемо для практических целей.

В процессе обработки вследствие выделения тепла в зоне резания происходит нагрев как режущего инструмента, так и обрабатываемой заготовки, вследствие чего происходят их температурные деформации и, как следствие, погрешность обработки. В связи с этим возникает задача расчетного определения погрешностей, обусловленных этими деформациями [1–3].

При расчетном определении погрешности, возникающей вследствие температурной деформации резца, задача формулируется следующим образом: на торце бесконечно длинного стержня действует источник тепла постоянной интенсивности. Требуется определить удлинение стержня вследствие его нагревания с учетом теплоотдачи через боковые поверхности этого стержня.

Для линейного (вдоль оси z) мгновенного источника тепла (рис. 1) температура вдоль стержня определяется по формуле [4]:

$$\theta = \frac{q}{\frac{\lambda_{ст}^{3/2}}{\sqrt{(ср)_{ст}}} (4\pi\tau)^{3/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2+y^2+z^2}{4a_{ст}\tau}} dz, \quad (1)$$

где θ – температура в любой точке стержня резца, °С;
 q – интенсивность теплового источника, Дж/м·с;
 $a_{ст}$ – температуропроводность материала державки резца, м²/с;
 τ – время нагревания, с;

$\lambda_{ст}$ – теплопроводность материала державки резца, Вт/(м·К);
 $(ср)_{ст}$ – удельная объемная теплоемкость материала державки резца, Дж/(м³·К).

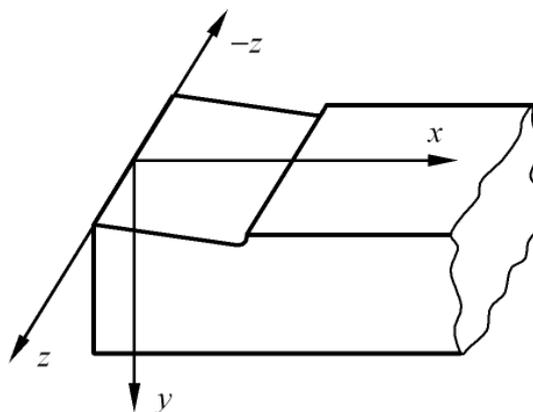


Рис. 1. Схема координат для определения температуры в державке резца

После интегрирования (1) получим [5]

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda_{ст}\tau} e^{-\frac{R^2}{4a_{ст}\tau}}, \quad (2)$$

где R – радиус расположения рассматриваемой точки державки резца от его условной вершины.

Для постоянно действующего источника теплоты, что соответствует условиям резания, с учетом (2) получим

$$\theta = \frac{q}{4\pi\lambda_{ст}} \int_0^{\tau} e^{-\frac{R^2}{4a_{ст}\tau}} \frac{d\tau}{\tau} = -\frac{q}{4\pi\lambda_{ст}} E_i\left(-\frac{R^2}{a_{ст}\tau}\right),$$

где $E_i\left(-\frac{R^2}{a_{ст}\tau}\right)$ – интегрально-показательная функция

Эйлера.

Резец схематизируется до четверти пространства, поэтому температура в любом сечении резца возрастает в π/β раз [6; 7]

$$\theta_p = \theta \frac{\pi}{\beta} = -\frac{q}{4\lambda_{cm}\beta} \left[E_i\left(-\frac{R^2}{4a_{cm}\tau}\right) \right], \quad (3)$$

где β – угол заострения режущей кромки инструмента.

Максимальная температура по задней поверхности резца будет в середине площадки контакта резца с деталью, т. е. при радиусе $R=\Delta/2$ (точка N на рис. 2).

В этом случае температура в точке N

$$\theta_N = \frac{q}{4\lambda_{ст}\beta} \left[-E_i\left(-\frac{\Delta^2}{16a_{ст}\tau}\right) \right],$$

Откуда

$$q = \frac{4\lambda_{ст}\beta\theta_N}{\left[-E_i\left(-\frac{\Delta^2}{16a_{ст}\tau}\right) \right]}. \quad (4)$$

Значение θ_N может быть определено по формуле С.С. Силина [8]:

$$\theta_N = \theta_A \left(0,5 + \frac{0,36\sin^{0,25}\alpha}{B^{1,25}\sqrt{BE}} + \frac{0,465B^{1,275}B^{0,625}E^{0,55}\cos\alpha}{\Gamma^{0,25}D^{0,075}\sin^{0,275}\alpha \operatorname{erf}\sqrt{\frac{BB}{4}}} \right), \quad (5)$$

где $B = \frac{va_1}{a_g}$ – безразмерный комплекс процесса реза-

ния, характеризующий степень влияния режимных условий обработки по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала,

где v – скорость резания, м/с;

a_1 – толщина среза, м;

a_g – температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с;

$\Gamma = \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \beta \varepsilon$ – безразмерный комплекс, отражающий

влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов,

где λ_p и λ_g – теплопроводность инструментального и обрабатываемого материалов, Вт/м·°К;

ε и β – угол при вершине режущей части инструмента в плане и угол заострения режущей кромки инструмента соответственно, радиан;

$D = a_1/b_1$ – безразмерный комплекс, характеризующий геометрию сечения среза,

где b_1 – ширина среза, м;

$E = \rho_1/a_1$ – безразмерный комплекс, характеризующий влияние на процесс резания геометрической формы режущей кромки инструмента,

где ρ_1 – радиус округления режущей кромки инструмента, м;

$B = \frac{CB^X D^Z}{\Gamma^Y (1 - \sin \gamma)^{0,73}}$ – безразмерный комплекс, харак-

теризующий степень пластических деформаций материала снимаемого припуска и материала поверхностного слоя обрабатываемой детали,

где γ – передний угол резца. Значения коэффициентов и показателей степени приведены в табл. 1 [7].

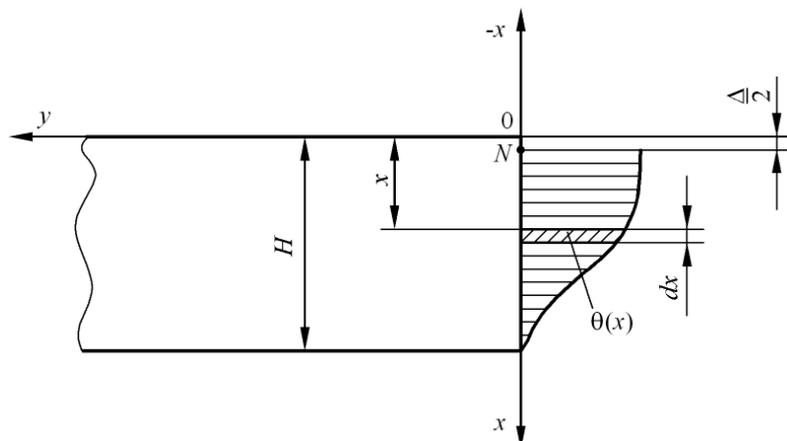


Рис. 2. Схема к определению усредненной температуры на торце резца

Таблица 1. Значения коэффициентов и показателей степени в формуле для определения комплекса В

Обозначение величин	Интервалы изменения B, λ_g и произведения ΓD	Значения величин		
		$\Gamma \leq 9,5$	$\Gamma > 9,5$	
C	$B \leq 60 \Gamma^{0,05} D^{0,11}$	$\lambda_g \leq 20$	0,9	
		$\lambda_g > 20$	1,35	
	$B > 60 \Gamma^{0,05} D^{0,11}$	$\lambda_g \leq 20$	0,45 $\Gamma^{-0,09}$	
		$\lambda_g > 20$	6,05	2,6
x	$B \leq 0,6 \Gamma^{0,7} D^{0,11}$	$-0,21[\Gamma(1-\sin\gamma)]^{-0,3+m}$		
	$60 \Gamma^{0,05} D^{0,11} \geq B > 0,6 \Gamma^{0,7} D^{0,11}$	$0,31[\Gamma(1-\sin\gamma)]^{-0,22+m}$		
	$B > 60 \Gamma^{0,05} D^{0,11}$	$-0,16[\Gamma(1-\sin\gamma)]^{-0,22+m}$		
y	$\lambda_g \leq 20$	$-0,11[B(1-\sin\gamma)]^{-0,6}$		
	$20 \leq \lambda_g \leq 110$	$-0,62[B(1-\sin\gamma)]^{-0,82}$		
	$\lambda_g > 110$	0,195		
z	$0,19[B\Gamma(1-\sin\gamma)]^{0,11}$			

Значения m для расчета величин x (табл. 1) определяются следующим образом:

- при $\lambda_g \leq 20$ при $B < 10 \Gamma^{0,05} D^{0,11}$ $m=0,045$;
- при $10 \Gamma^{0,05} D^{0,11} \leq B < 60 \Gamma^{0,7} D^{0,11}$ $m=0,03$;
- при $B \geq 60 \Gamma^{0,05} D^{0,11}$ $m=-0,055$;
- при $\lambda_g > 20$ при тех же интервалах изменения B величина m равна 0,105; 0,09 и 0,005 соответственно.

Значение Δ определяется по формуле [7]:

$$\Delta = \rho_1 \left\{ \arccos \left[1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}} \right] + \frac{a_2 B^{-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}}}{\sin\alpha(\cos\gamma + B\sin\gamma)} + \frac{\delta}{\rho_1} \right\},$$

где δ – высота площадки износа режущего инструмента по задней поверхности; значения коэффициентов a_2, b_2 и x приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов a_2, b_2 и x в формуле для определения Δ

Коэффициент	Значение B		
	$B \leq 0,5$	$0,5 < B \leq 0,9$	$B > 0,9$
a_2	0,557	0,44	0,294
b_2	0,078	0,45	3,4
x	0,75	0,53	0,445

С учетом (5)

$$\theta_p = \frac{-E_i\left(-\frac{R^2}{4a_{cr}\tau}\right)}{-E_i\left(-\frac{\Delta^2}{16a_{cr}\tau}\right)} \cdot \theta_N. \quad (6)$$

Формула (6) позволяет определять температуру в любой точке на задних поверхностях резца.

На любом элементарном участке площади задней поверхности резца температура θ_p пропорциональна радиусу удаления его от точки N , и на основании этого можно записать

$$\bar{\theta}_p = \frac{\int_{\Delta/2}^H \theta(y) dy}{H - \frac{\Delta}{2}} \quad \text{или} \quad \bar{\theta}_p = \frac{k_1 \int_{\Delta/2}^H \left[-E_i\left(-\frac{x^2}{4a_{cr}\tau}\right) \right] dx}{H}, \quad (7)$$

где $k_1 = \frac{\theta_N}{-E_i\left(-\frac{\Delta^2}{16a_{cr}\tau}\right)}$, т. к. $H - \frac{\Delta}{2} \approx H$.

Проинтегрировав выражение (7), получим

$$\bar{\theta}_p = \frac{2\theta_N \sqrt{a_{cr}\tau}}{H \left[-E_i\left(-\frac{\Delta^2}{16a_{cr}\tau}\right) \right]} \times \left\{ \frac{H}{2\sqrt{a_{cr}\tau}} \left[-E_i\left(-\frac{H^2}{4a_{cr}\tau}\right) \right] - \frac{\Delta}{4\sqrt{a_{cr}\tau}} \times \left[-E_i\left(-\frac{\Delta^2}{16a_{cr}\tau}\right) \right] + 2\pi \left(\operatorname{erf} \frac{H}{2\sqrt{a_{cr}\tau}} - \operatorname{erf} \frac{\Delta}{4\sqrt{a_{cr}\tau}} \right) \right\}. \quad (8)$$

Формула (8) пригодна для условий свободного резания при условии $\alpha=\gamma=0$. Для несвободного резания с учетом влияния переднего и заднего углов резца в плане усредненная температура будет уменьшаться на величину $k = \frac{\pi}{2\beta} \cdot \frac{\pi}{\varepsilon} = \frac{\pi^2}{2\beta\varepsilon}$. Тогда $\bar{\theta}_{рн} = \frac{\bar{\theta}_p}{k}$, где $\bar{\theta}_{рн}$ – усредненная температура на задней поверхности резца для условий несвободного резания. Значения β и ε при определении коэффициента k следует подставлять в радианах.

Значение функции $-Ej(-x)$ при малых значениях x (менее 0,01) определяется по формуле

$$Ej(-x) \approx \ln \gamma \cdot x,$$

где $\gamma = 1,781$ – постоянная Эйлера.

Для $x > 0,01$ значения интегрально-показательной функции приведены в [9].

При известной средней температуре на поверхности стержня (торце резца) температура вдоль стержня определяется по формуле [10]:

$$\theta_{ст} = \frac{1}{2} \theta_p \left[e^{-\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} x} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) + e^{\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} x} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} + \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) \right], \quad (9)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи, Дж/м²·с·°С;
 τ – время нагревания (работы) резца, с;
 h – отношение площади сечения державки резца к его периметру, м;
 $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала державки резца, Дж/м·с·°С.

Разложение в ряд функции $\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right)$

и анализ слагаемых показали, что значение интеграла вероятности при возможных пределах изменения подынтегральной функции может быть принято равным

$$\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right).$$

Поэтому

$$\theta_{ст} = \frac{\bar{\theta}_p}{2k} \left\{ e^{-\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} x} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) \right] + e^{\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} x} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} + \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) \right] \right\}.$$

Удлинение резца будет определяться по следующей формуле:

$$\Delta L_p = \beta_p \frac{\bar{\theta}_p}{2k} \times \int_0^{L_p} \left\{ e^{-\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} x} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) \right] + e^{\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} x} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_{ст} \tau}} + \sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\lambda_{ст} h}} \right) \right] \right\} dx, \quad (10)$$

где L_p – длина вылета державки резца;

β_p – коэффициент температурного линейного расширения материала державки резца.

После интегрирования выражения (10) получаем формулу для определения температурного удлинения резца или половины величины погрешности выдерживаемого при обработке диаметрального размера детали.

$$\Delta L_p = \frac{\beta_p \bar{\theta}_p}{2k} \times \left\{ \left(1 + 2\sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\pi \lambda_{ст} h}} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}}} \left[1 - \exp \left(-L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} \right) \right] - \frac{1}{\sqrt{\pi a_{ст} \tau}} \left[\frac{\lambda_{ст} h}{\alpha_1} \exp \left(-L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} \right) \times \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} + 1 \right) + \frac{\lambda_{ст} h}{\alpha_1} \right] - \left(1 - 2\sqrt{\frac{\alpha_1 a_{ст} \tau}{\pi \lambda_{ст} h}} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}}} \left[1 - \exp \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} \right) \right] - \frac{1}{\sqrt{\pi a_{ст} \tau}} \times \left[\frac{\lambda_{ст} h}{\alpha_1} \exp \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} \right) \times \left(L_p \sqrt{\frac{\alpha_1}{\lambda_{ст} h}} - 1 \right) + \frac{\lambda_{ст} h}{\alpha_1} \right] \right\}. \quad (11)$$

Определение коэффициента теплоотдачи через боковые поверхности резца выполнено в соответствии с рекомендациями [11–13]. При условии:

$$\beta = \frac{1}{273 + \left(\frac{\theta_p + \theta_f}{2} \right)}$$

коэффициент объемного расширения, 1/°С;

θ_p – температура в зоне резания, °С [14];

θ_f – температура окружающего воздуха, °С;

$\Delta t = \theta_p - \theta_f$ – температурный напор, °С;

$d_{экр} = 4F/P$ – эквивалентный приведенный диаметр, м;

F – площадь поперечного сечения державки резца, м²;

$P = 2(B_1 + H_1)$ – периметр поперечного сечения державки резца, м,

где B_1 и H_1 – ширина и высота сечения державки резца, получена формула для определения коэффициента теплоотдачи в следующем виде:

$$\alpha_1 = \frac{5,4 \left(d_{экр}^3 \beta \Delta t \right)^{0,25}}{d_{экр}}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{°С}}. \quad (12)$$

Сопоставление рассчитанных по формуле (11) и экспериментальных значений температурного удлинения резца приведено на рис. 3, что подтверждает достаточно близкое их совпадение.

Вследствие выделения тепла в зоне резания происходит также нагревание детали и в связи с этим увеличение ее диаметра. Возникает погрешность, обусловленная

температурной деформацией детали, т. к. после остывания ее диаметр становится меньше на величину значения температурной деформации. Условно можно предположить, что деталь нагревается кольцевым источником тепла, т. к. ее опоясывает линейный быстровращающийся относительно оси X тепловой источник (рис. 4).

Задача формуруется следующим образом: «По цилиндрической поверхности детали диаметром $2R$ бесконечной длины в направлении отрицательного X

движется бесконечно долго ($\tau_1 \approx \infty$) кольцевой источник тепла протяженностью l в направлении оси X . Требуется определить температурное поле, развивающееся вокруг кольцевого источника в движущейся вместе с источником системе координат с началом в точке 0 , расположенной на оси детали. На боковой поверхности детали имеется конвективный теплообмен с окружающей средой (коэффициент теплоотдачи α , $\frac{Дж}{м^2 \cdot с \cdot ^\circ C}$).

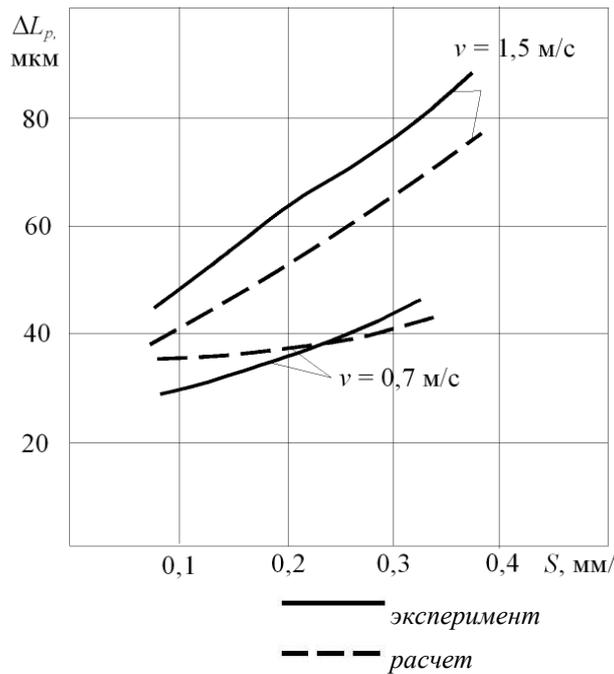


Рис. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений ΔL_p . Обработываемый материал 13Х12НВМФА. Резец из Т15К6.

$t=1$ мм; $L_p=40$ мм; $B \times H=16 \times 25$ мм; $\alpha=12^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_1=15^\circ$; $r=1$ мм; $\rho_1=30$ мкм; $\tau=300$ с

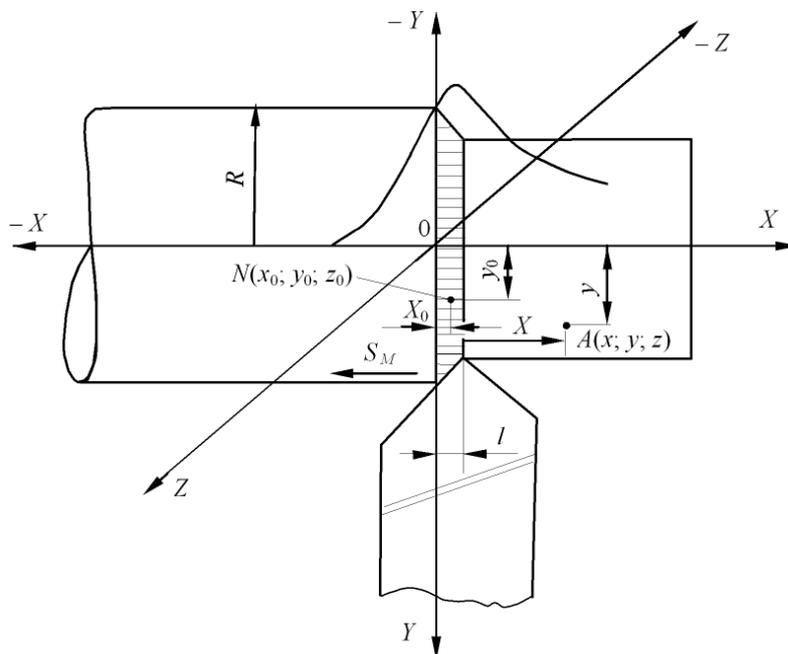


Рис. 4. Схема к расчету температурной деформации обрабатываемой детали при точении

Температурные деформации резца в радиальном направлении определяются по формуле

$$\Delta R = \beta_g \bar{\theta} R,$$

где β_g – коэффициент температурного линейного расширения материала обрабатываемой детали;

R – наружный радиус детали;

$\bar{\theta}$ – средняя температура по радиусу детали сплошного сечения (без отверстия) будет определяться по формуле

$$\bar{\theta} = \frac{C \theta_m \left(\frac{a \tau}{R^2} \right)^m}{0,5R + 1} \left(\frac{l}{S_M} \right)^n,$$

где S_M – минутная подача; l – длина кольцевого источника тепла; τ – время нагревания.

Тогда

$$\Delta R = \frac{C \beta_g R \theta_m (F_0)^m}{0,5R + 1} \left(\frac{l}{S_M} \right)^n, \quad (12)$$

где $F_0 = a\tau/R^2$ – критерий Фурье. В формуле (12) приняты следующие размерности: β_g – $1/^\circ\text{C}$; R – мм; θ_m – $^\circ\text{C}$;

l – мм; $S_M = 500 \frac{Sv}{\pi R K_{\text{сож}}}$, $\frac{\text{мм}}{\text{с}}$, где S и R в мм, v в м/с.

Критерий F_0 определяется при $\tau = 20l/S_M$; C , m , n – коэффициенты, определяемые по табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов в формуле (15)

Обозначение коэффициентов	Интервалы изменения l/S_M и F_0	Значения коэффициентов
n	$l/S_M \leq 0,1$	0,58
	$l/S_M > 0,1$	0,132
m	$F_0 \leq 0,1$	0,7
	$F_0 > 0,1$	0,27
C	$F_0 \leq 0,1$	$10 \cdot 10^3$
	$F_0 > 0,1$	3,8

Длина условного кольцевого источника тепла l зависит от подачи, радиуса при вершине резца в плане, главного и вспомогательного углов резца в плане и определяется в соответствии с источником [7].

При наличии в детали центрального отверстия (полюс вал)

$$\bar{\theta} = \frac{C \theta_m F_0^m}{(0,5R_H + 1) R_H^{0,5R_H} (R_H - R_B)} \times \left(\frac{l}{S_M} \right)^n \left(R_H^{0,5R_H + 1} - R_B^{0,5R_H + 1} \right).$$

Погрешность вследствие температурной деформации детали в форме полого вала определяется по формуле

$$\Delta R = \frac{C \beta_g \theta_m F_0^m}{0,5R_H + 1} \left(\frac{l}{S_M} \right)^n \left[R_H - \left(\frac{R_B}{R_H} \right)^{0,5R_H} R_B \right]. \quad (13)$$

Выполненные расчеты позволили выявить влияние отдельных технологических факторов на величину погрешности ΔR . С увеличением подачи погрешность, обусловленная температурными деформациями детали, сначала увеличивается, а затем стабилизируется и даже уменьшается (рис. 5). Объясняется это тем, что при увеличении подачи возрастает температура в зоне резания и большее количество тепла переходит в деталь. Аналогичная картина наблюдается при изменении скорости резания.

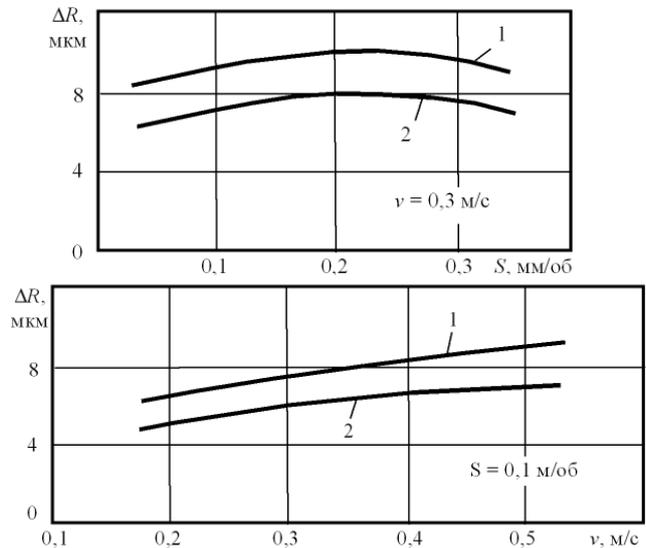


Рис. 5. Влияние подачи и скорости резания на погрешность ΔR при точении сплава ХН73МБТЮ (ЭИ698) резцом из ВК8. $t=1$ мм; $r=0,5$ мм; $\alpha=12^\circ$; $\gamma=10^\circ$; $\varphi=45^\circ$; $\varphi_l=15^\circ$; $\rho_l=30$ мкм; $R_H=40$ мм; $1-R_B=0,2$ мм; $2-R_B=37$ мм

Аналогичные теоретические зависимости получены для расчета погрешностей при торцевом фрезеровании [15; 16].

Суммарная погрешность обработки, обусловленная температурной деформацией режущего инструмента и обрабатываемой детали, будет определяться суммой погрешностей, определенных расчетом по формулам (11, 12 и 13) [17; 18].

С использованием этих формул могут определяться режимы резания, обеспечивающие требуемую точность обработки [19; 20].

Исследование выполнялось в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (НИР № 824).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Соколовский А.П. Расчёты точности обработки на металлорежущих станках. М.: Машгиз, 1952. 288 с.
- Тарасов В.А., Кашуба Л.А. Теоретические основы технологии ракетостроения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 352 с.
- Корсаков В.С. Точность механической обработки. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. 380 с.
- Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
- Чистяков Ю.П. Расчётный метод определения погрешностей обработки, обусловленных процессом резания при точении сталей и сплавов // Повышение эффективности и качества в механосборочном производстве. Пермь: Издательство ДНТП, 1985. С. 63–64.
- Безъязычный В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
- Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
- Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции. М.: Наука, 1968. 344 с.
- Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Госэнергоиздат, 1948. 280 с.
- Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 526 с.
- Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. М.: Машгиз, 1963. 256 с.
- Силин С.С. Теория подобия в приложении к технологии машиностроения. Ярославль: Изд-во ЯПИ, 1989. 109 с.
- Силин С.С. Исследование процессов резания методами подобия // Труды Рыбинского авиационного технологического института. 1966. № 1. С. 3–85.
- Безъязычный В.Ф., Бакунина Т.А. Погрешности обработки, обусловленные температурной деформацией режущего инструмента и обрабатываемой детали при фрезеровании // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 7. С. 15–21.
- Обработка металлов резанием. Справочник технолога / под общ. ред. А.А. Панова. Изд. 2-е. М.: Машиностроение, 2004. 784 с.
- Безъязычный В.Ф. Суммарная погрешность обработки и взаимное влияние её составляющих // Современные технологические системы в машиностроении. Барнаул, 2006. С. 75–78.
- Безъязычный В.Ф. Расчётное определение погрешности при механической обработке // Современные наукоёмкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. СПб., 2014. С. 42–53.
- Силин С.С., Козлов В.А. Теоретическое определение оптимальной скорости при точении // Производственная обработка и технологическая надёжность деталей машин. Ярославль: ЯПИ, 1978. С. 3–16.
- Большаков Е.М., Фоменко Р.Н. Технологические возможности современных обрабатывающих центров и фрезерных станков при обработке деталей авиационных двигателей // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 5. С. 21–29.
- Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. 5-е изд. М.: Машиностроение, 2001. 941 с.

REFERENCES

- Sokolovsky A.P. *Raschety tochnosti obrabotki na metallorezhushchikh stankakh* [Calculations of metal cutting processing accuracy]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952, 288 p.
- Tarasov V.A., Kashuba L.A. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii raketostroeniya* [Theoretical foundations of rocket production technology]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2006, 352 p.
- Korsakov V.S. *Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki* [Mechanical processing accuracy]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatelstvo mashinostroitel'noy literatury Publ., 1961, 380 p.
- Reznikov A.N. *Teplofizika rezaniya* [Thermophysics of cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 288 p.
- Chistyakov Yu.P. Calculation method for evaluation of processing errors arising from the cutting process when steel and alloys turning. *Povyshenie effektivnosti i kachestva v mekhanosborochnom proizvodstve*. Perm, DNTP Publ., 1985, pp. 63–64.
- Bezyazychny V.F. *Metod podobiya v tekhnologii mashinostroeniya* [Similarity method in engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, 320 p.
- Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [Similarity method when materials cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 152 p.
- Yanke E., Emde F., Lesh F. *Spetsialnie funktsii* [Special functions]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 344 p.
- Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Thermal Conductivity]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1948, 280 p.
- Koshkin V.K., ed. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Basics of heat transfer in aviation and aerospace engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 526 p.
- Reznikov A.N. *Teploobmen pri rezanii i okhlazhdenii instrumentov* [Heat transfer when cutting and tool cooling]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 256 p.
- Silin S.S. *Teoriya podobiya v prilozhenii k tekhnologii mashinostroeniya* [Theory of similarity as applied to the engineering technology]. Yaroslavl, YaPI Publ., 1989, 109 p.
- Silin S.S. Cutting processes study using similarity methods. *Trudy Rybinskogo aviatsionnogo tekhnologicheskogo instituta*, 1966, no. 1, pp. 3–85.
- Bezyazychny V.F., Bakunina T.A. Processing error arising from thermal deformation of cutting tool and processed part when milling. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2010, no. 7, pp. 15–21.
- Panov A.A., ed. *Obrabotka metallov rezaniem. Spravochnik tekhnologa* [Metal cutting processing. Reference book for technologist]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004, 784 p.
- Bezyazychny V.F. Combined processing error and interference of its components. *Sovremennye tekhnologicheskie sistemy v mashinostroenii*. Barnaul, 2006, pp. 75–78.
- Bezyazychny V.F. Calculated evaluation of errors during mechanical processing. *Materialy mezhdunar.*

- nauchno-tekhn. konf. "Sovremennye naukoemkie tekhnologii, oborudovanie i instrumenty v mashinostroenii".* S. Petersburg, 2014, pp. 42–53.
18. Silin S.S., Kozlov V.A. Theoretical evaluation of optimal speed when turning. *Proizvoditel'naya obrabotka i tekhnologicheskaya nadezhnost detaley mashin.* Yaroslavl, YaPI Publ., 1978, pp. 3–16.
19. Большаков Е.М., Фоменко Р.Н. Технологические возможности современных обрабатывающих центров и фрезерных станков при обработке деталей авиационных двигателей. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*, 2008, no. 5, pp. 21–29.
20. Dalsky A.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G., eds. *Spravochnik tekhnologamashinostroitelya* [Reference book of technologist-mechanical engineer]. 5th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, vol. 2, 941 p.

PROCESSING ERRORS ARISING FROM THERMAL DEFORMATION OF CUTTING TOOL AND PROCESSED PART

© 2015

V.F. Bezyazychny, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Honoured master of sciences and engineering of the Russian Federation,
Head of Chair "Technology of aero engines and general engineering"
Solov'yev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk (Russia)

Keywords: blank part; cutting tool; cutting mode; cutting temperature; thermal deformations; processing errors.

Abstract: The author presents the technique of calculated evaluation of processing errors arising from thermal deformations during the blank part and cutting tool processing. The assigned task was solved using the dimensionless groups of cutting process which consider process conditions, such as: cutting mode (cutting speed, feed motion and cutting depth), tool cutting part geometry (face and clearance angles, plan root radius, cutting edge rounding-off radius), mechanical and physical and thermophysical properties of processed and tool materials (flow shear resistance of processed material, heat conduction of processed and tool materials, temperature linear expansion factors of processed and tool materials).

Theoretical dependences allowed getting the numerical values of errors arising from thermal deformations of a blank part and the cutting tool. It allowed evaluating the efficiency of feed, cutting speed and other cutting process parameters.

When evaluating errors arising from thermal deformation of cutting tool, the author considered heat transfer to the external environment through the cutting tool side face.

When getting theoretical dependences for evaluation of processing errors, the author used the dependences for evaluation of temperature in the cutting area and its expansion within the blank part and cutting tool got by the Professors S.S. Silin, A.N. Reznikov, A.V. Lykov and others.

The comparison of values of processing errors arising from thermal deformation of processed blank part and cutting tool showed their close agreement that is quite acceptable for practical purposes.

РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ В СИСТЕМЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНООБРАБОТКИ

© 2015

Л.Г. Бокова, кандидат технических наук,
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: технологичность; производственная технологичность; технологические процессы; количественные показатели оценки технологичности; механообрабатывающие системы; система планирования многономенклатурных технологических процессов.

Аннотация: Значительную роль в жизненном цикле изделия играют решения, принятые на этапах конструкторско-технологической подготовки при оценке технологичности, позволяющей определить соответствие запланированного для обработки комплекта деталей возможностям производственной системы и обеспечить достижение наибольшей производительности и эффективности технологических процессов изготовления. В статье представлены методы количественной оценки производственной технологичности изделий, учитывающие возможности использования оборудования для их изготовления и позволяющие создать формализованные процедуры обеспечения технологичности конструкции. В рамках разработанной методики для количественной оценки дополнительных показателей производственной технологичности, учитывающих специфику технологической подготовки единичного, мелко- и среднесерийного производства, выявлены взаимосвязи между производственной технологичностью и ее влиянием на технологические составляющие обработки заданной номенклатуры в конкретной производственной системе, выполнено обоснование состава дополнительных количественных показателей оценки производственной технологичности в системе планирования многономенклатурных технологических процессов. Методика определения дополнительных количественных показателей выполнена в виде самостоятельных проектных процедур, включающих проверку конструктивных характеристик деталей на возможность их изготовления в рамках конкретной производственной системы с учетом технологических возможностей механообрабатывающего оборудования, определение уровня использования технического потенциала оборудования, оценку комплекта изготавливаемых деталей по показателю однородности по виду и конструктивным характеристикам поверхностей как составляющих элементов деталей, и заключение о степени их унификации, прогнозирование технико-экономических показателей изготовления запланированной номенклатуры деталей. Предложенные в статье дополнительные количественные показатели для оценки производственной технологичности расширяют и углубляют знания, получаемые на основе анализа конструктивных элементов деталей и возможностей производственной системы для их изготовления на стадии оценки технологичности при технологической подготовке производства с целью повышения эффективности функционирования многономенклатурных производственных систем.

Технологичность конструкции является одним из базовых научных понятий технологии машиностроения и основой обеспечения использования конструкторско-технологических резервов подготовки производства для решения задач, связанных с повышением технико-экономических показателей изготовления изделий. Сложность оценки технологичности во многом связана с субъективностью оценки, зависящей от опыта и знаний отдельных конструкторов и технологов, что не учитывает существенно расширяющиеся возможности современных производственных систем и не позволяет обеспечить высокую эффективность их эксплуатации.

Процесс обеспечения технологичности изделия, отражающий связь между конструктивными особенностями изделия и уровнем затрат при его производстве, является противоречивым и не имеет в настоящее время полного описания его проведения [1–4]. То, что в одних определенных условиях, характеризующихся, например, специализацией цехов, наличием того или иного оборудования и средств технологического оснащения, может быть рациональным, технологичным, в других может оказаться неприемлемым. К производственным условиям следует отнести также программу выпуска, в зависимости от которой и разрабатывается

технологический процесс изготовления изделия. Конструкция, технологичная в условиях многономенклатурного производства, оказывается нетехнологичной в условиях массового производства и наоборот [5–8].

Процесс оценки технологичности изделий является противоречивым и сложноформализуемым, поэтому реализация оценки технологичности проектного решения возможна только после создания моделей, адекватно устанавливающих связь между конструктивными элементами изделий и характеристиками производственных систем и представленных в виде систем автоматизированного проектирования.

Проводя анализ известных методик оценки производственной технологичности, следует отметить подход [9] как отличающийся более детальной проработкой технико-экономических вопросов изготовления деталей, в основу которого положено установление связей между частными показателями технологичности и их влиянием на технологические составляющие обработки.

Другой отличительной особенностью данного подхода является разработанное представление об исходных данных для расчета показателей технологичности, которое включает как информацию по рассматриваемой детали, так и систематизированную справочно-

методическую информацию, связывающую конструктивные характеристики элементов детали с технологическими методами их получения.

Представленная система показателей позволяет установить связь между конструктивными элементами детали и сложившимися к настоящему времени уровнями конструкторско-технологической стандартизации и унификации. Однако она обладает рядом недостатков: не направлена на оценку технологичности для конкретной производственной системы, в которой будет выполняться обработка детали; справочная и нормативно-техническая информация, используемая в качестве составления исходных таблиц для расчета, требует постоянных корректировок, что отражается на методике вычисления, особенно в установлении применяемых весовых коэффициентов показателей; методика расчета не отражает тип производства и особенности как самой производственной системы, так и применяемых подходов к технологической подготовке производства; ведется оценка производственной технологичности отдельно каждой детали, хотя в условиях многономенклатурного производства для его рационального функционирования важна не только унификация на уровне отдельных конструктивных элементов в рамках одной детали, но и унификация конструктивных характеристик для всей номенклатуры деталей, обрабатываемых одновременно в рамках производственной системы.

Для учета этих факторов необходима разработка дополнительных критериев оценки производственной технологичности, которые позволяли бы вести расчет для конкретной производственной системы и были ориентированы на особенности организации многономенклатурных производственных систем механообработки. Такие исследования стали возможными в рамках создания системы планирования многономенклатурных технологических процессов [10–12]. Возможность разработки дополнительных критериев оценки производственной технологичности обусловлена следующими факторами: сформированной в системе планирования многономенклатурных технологических процессов базой данных о технологических возможностях оборудования [13–15]; принципиально отличающимся подходом к технологической подготовке производства, позволяющим обеспечить многовариантность принятия

решений при проектировании и реализации технологии в зависимости от складывающейся производственной ситуации.

На основе представленных направлений развития подхода к обеспечению производственной технологичности можно сформировать требования к дополнительным критериям для оценки производственной технологичности для многономенклатурных производственных систем (рис. 1).

Определение возможности изготовления конструктивных элементов детали известными в настоящее время технологическими методами с применением имеющегося в рамках конкретной производственной системы оборудования и оснастки разделяется на две задачи:

1. Установление наличия разработанных технологических методов получения конкретного элемента детали с учетом его пространственного расположения относительно других элементов, с обеспечением заданных технических требований.

Данная задача традиционна для оценки технологичности деталей и строится на основе анализа нормативно-справочной литературы, опыта разработчиков для отдельных отраслей машиностроения (авиационная, приборостроительная, подшипниковая и т. д.) [16; 17] с учетом их специфики.

2. Анализ технологических возможностей оборудования, имеющегося в рамках производственной системы с позиции обеспечения получения заданных технических требований поверхностей детали, выполняемый на основе имеющихся информационных баз данных системы планирования многономенклатурных технологических процессов (рис. 2).

Эффективность изготовления деталей в условиях реально складывающейся производственной ситуации основывается на прогнозируемых характеристиках обработки, заданной номенклатуры деталей в конкретной производственной системе. Структура задач для установления дополнительных показателей производственной технологичности представлена на рис. 3.

На основе представленных требований к оценке производственной технологичности, с учетом условий конкретной производственной системы и ориентации на особенности многономенклатурных систем механообработки, установленных взаимосвязей между

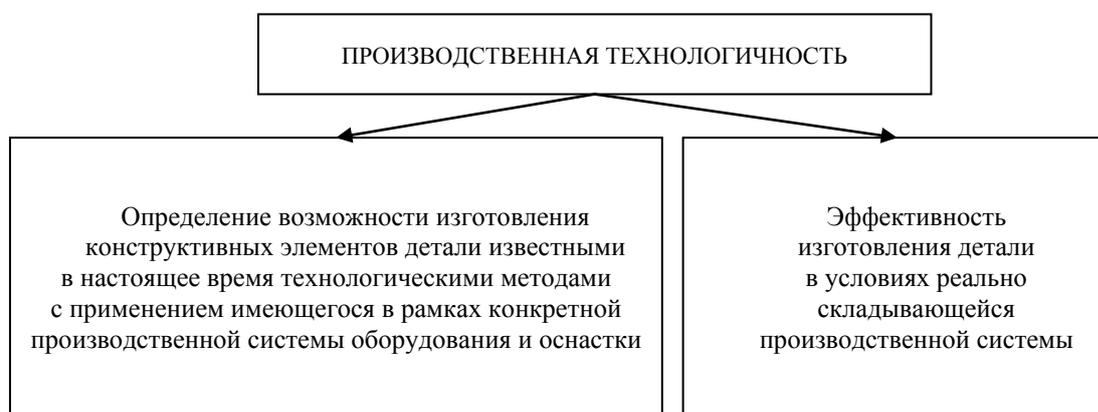


Рис. 1. Требования для оценки производственной технологичности для многономенклатурных производственных систем

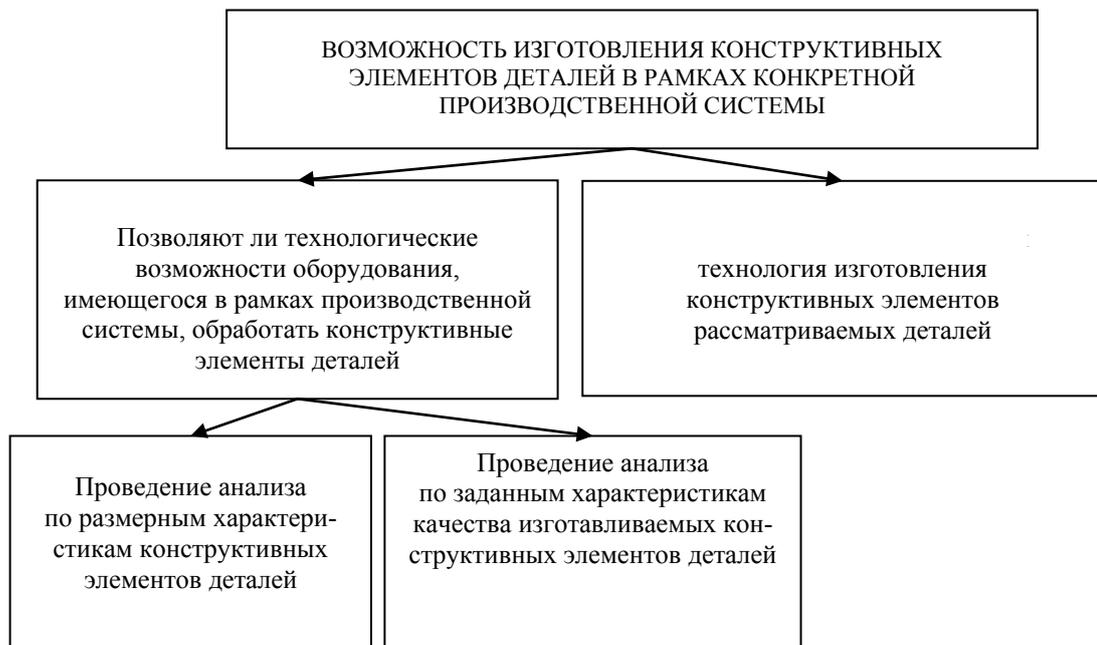


Рис. 2. Возможность изготовления конструктивных элементов деталей в рамках конкретной производственной системы

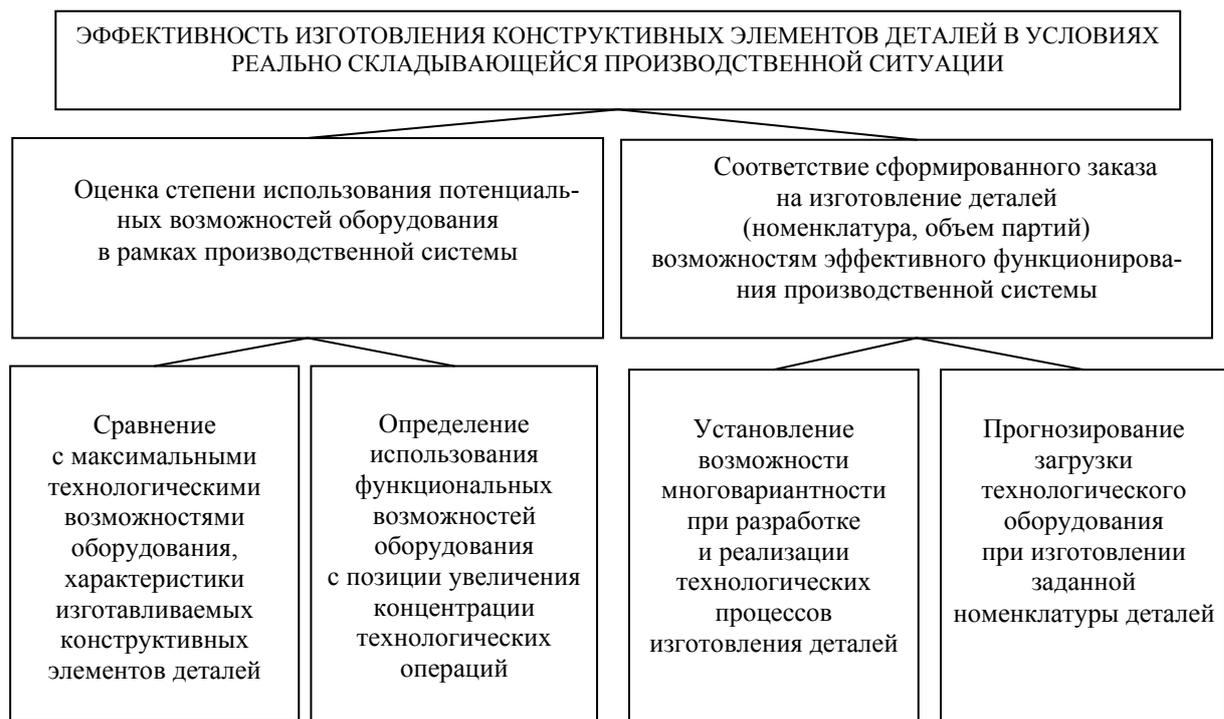


Рис. 3. Структура задач для установления дополнительных показателей производственной технологичности в части эффективности изготовления деталей

производственной технологичностью и ее влиянием на технологические составляющие обработки обоснован состав дополнительных показателей оценки производственной технологичности для использования в системе планирования многономенклатурных технологических процессов: показатель возможности изготовления заданной номенклатуры деталей [18–20]; показатель использования технологических возможностей производственной систе-

мы; показатель технологичности детали по однородности технологического оборудования; показатель прогнозирования уровня загрузки технологического оборудования при обработке заданной номенклатуры деталей; показатели многовариантности принятия решений при проектировании и реализации технологических процессов.

Предлагаемые показатели расширяют известные показатели и используют дополнительную исходную

информацию, включающую данные о технологических возможностях оборудования, содержащуюся в информационном обеспечении системы планирования многономенклатурных технологических процессов (рис. 4.).

Другой отличительной особенностью оценки производственной технологичности с применением разработанных показателей является то, что определяется не абстрактная производственная технологичность деталей, а технологичность для конкретной производственной системы. Таким образом, не только более коррект-

но делается заключение об обеспечении заданных характеристик изготавливаемых деталей и уровне сложности подготовки производства, но и прогнозируется эффективность функционирования производственной системы при изготовлении деталей. Оценка производственной технологичности с применением разработанных дополнительных показателей ведется как для отдельных деталей, так и для всей номенклатуры деталей, запланированных для обработки в заданный период времени на конкретной производственной системе.

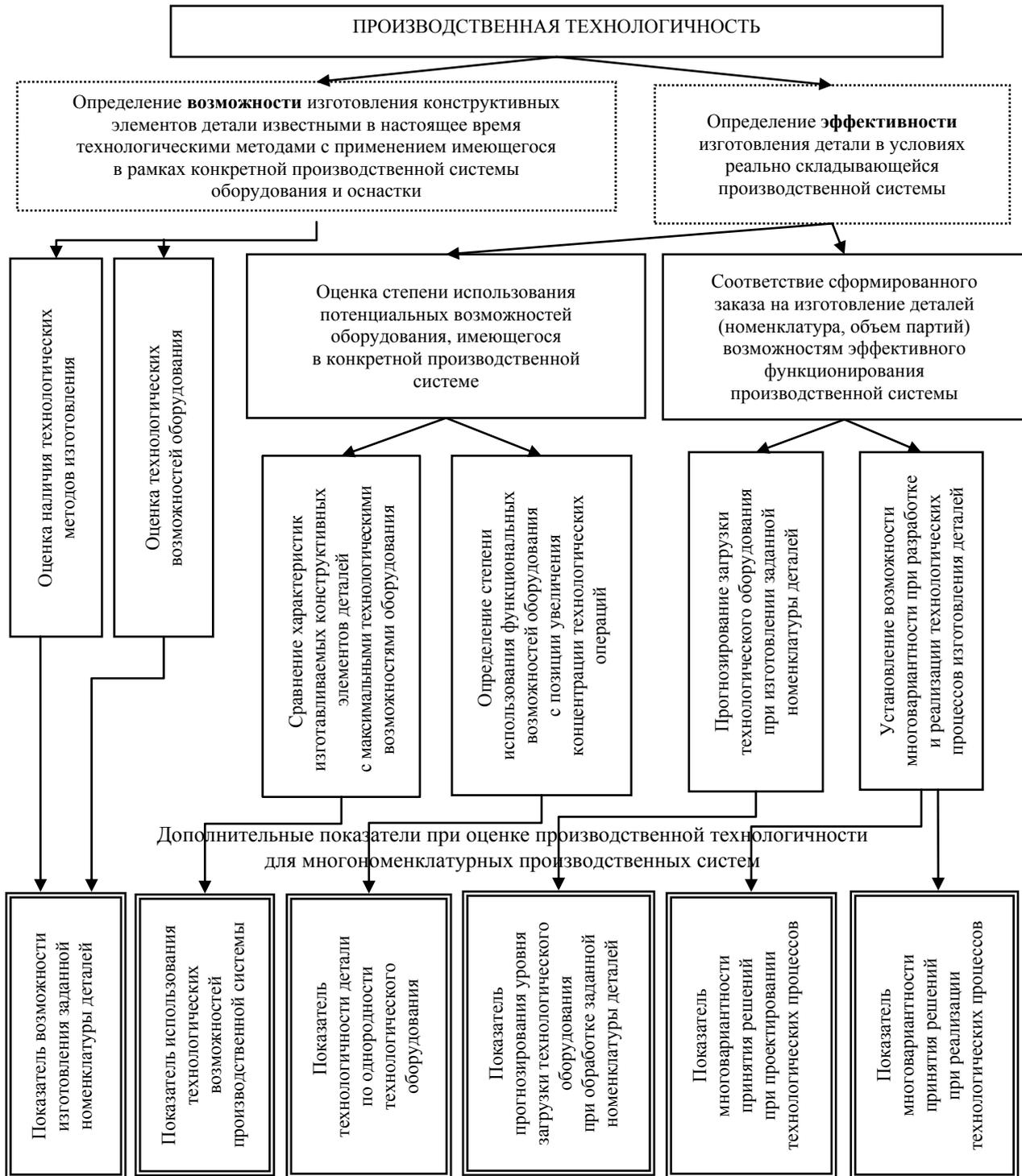


Рис. 4. Дополнительные количественные показатели производственной технологичности

Учет взаимного влияния отдельных деталей и их технологий друг на друга в части рациональной технологической подготовки производства позволяет более точно предсказать, насколько правильно сформировано отдельное производственное задание.

Таким образом, можно говорить о создании дополнительных показателей для оценки производственной технологичности механообрабатывающих производств, включающих учет специфики технологической подготовки единичного и серийного производства и предназначенных для использования в системе планирования многономенклатурных технологических процессов.

Методика, реализующая оценку дополнительных количественных показателей в системе планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки в виде самостоятельных проектных процедур, предусматривается в следующей последовательности:

1. Заключение о возможности изготовления конструктивных характеристик деталей в рамках конкретной производственной системы с учетом технологических возможностей механообрабатывающего оборудования.

2. Установление уровня использования технического потенциала оборудования при изготовлении отдельных деталей и всей запланированной номенклатуры деталей.

3. Исследование и оценка комплекта изготавливаемых деталей по показателю однородности по виду и конструктивным характеристикам поверхностей как составляющих элементов деталей и заключение о степени их унификации.

4. Прогнозирование технико-экономических показателей изготовления запланированной номенклатуры деталей с целью выработки предложений по формированию рационального комплекта деталей для конкретно сформировавшихся реальных производственных условий.

Проведенный анализ по представленным процедурам позволит уже на этапе формирования комплекта обрабатываемых деталей дать оценку их технологичности с точки зрения соответствия тем основным принципам, которые заложены при разработке системы планирования многономенклатурных технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверченков В.И., Казаков Ю.М. Автоматизация проектирования технологических процессов. Брянск: БГТУ, 2004. 228 с.
2. Амиров Ю.Д. Технологичность конструкций машин как фактор повышения эффективности общественного производства // Вестник машиностроения. 1982. № 3. С. 70–72.
3. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 736 с.
4. Балабанов А.Н. Технологичность конструкций деталей машин. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
5. Гамрат-Курек Л.И. Базовые показатели технологичности и их расчет // Теория и практика организации подготовки производства машиностроительной продукции: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВПИ, 1981. С. 43–48.
6. Леонтьев И.А. Обеспечение технологичности конструкций изделий. Л.: ЛДНТП, 1984. 28 с.

7. Михельсон-Ткач В.Л. Повышение технологичности конструкций. М.: Машиностроение, 1988. 104 с.
8. Обеспечение технологичности конструкций изделий: сб. статей. М.: Изд-во стандартов, 1976. 80 с.
9. Сагателян Г.Р., Руденко Н.Р., Назаров Н.Г. Анализ технологичности конструкций деталей приборов, изготавливаемых методами обработки материалов резанием. М.: МГТУ, 1995. 32 с.
10. Бочкарев П.Ю., Королев А.В. Принципы создания системы планирования гибких технологических процессов // Доклады Российской академии естественных наук. 1999. № 1. С. 172–184.
11. Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г., Шалунов В.В. Оценка технологичности деталей в системе планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ. 2007. С. 151–153.
12. Бочкарев П.Ю., Бокова Л.Г. Процедура оценки технологичности деталей в системе автоматизированного планирования технологических процессов механообработки // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 41. С. 30–33.
13. Ананьев С.А., Купрович В.И. Технологичность конструкций. М.: Машиностроение, 1969. 424 с.
14. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. Кн. 2. Основы технологии. М.: Машиностроение, 1982. 367 с.
15. Балашева Ю.В. Комплексная оценка технологичности деталей типа «вал» квалитетными методами : дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2007. 146 с.
16. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. СПб.: СПбГУИТМО, 2004. 95 с.
17. Яновский Г.А. Методика отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения. М.: Энергия, 1973. 390 с.
18. Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. СПб.: СПбГУИТМО, 2004. 95 с.
19. Бочкарев П.Ю., Митин С.Г., Бокова Л.Г. Оценка производственной технологичности изделий с учетом состояния многономенклатурного автоматизированного производства // Инновации. Технологии. Производство: сб. тез. междунар. технолог. форума. Рыбинск, 2014. С. 77–78.
20. Волошинов Д.В. Автоматизированное проектирование объектов и процессов с применением методов конструктивного геометрического моделирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. № 4-1. С. 284–292.

REFERENCES

1. Averchenkov V.I., Kazakov Yu.M. *Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov* [Technological processes design automation]. Bryansk, BGTU Publ., 2004, 228 p.
2. Amirov Yu.D. Machine structures production effectiveness as a factor of public production efficiency improvement. *Vestnik mashinostroeniya*, 1982, no. 3, pp. 70–72.

3. Bazrov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Basics of manufacturing engineering]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 736 p.
4. Balabanov A.N. *Tekhnologichnost konstruksiy detaley mashin* [Machine parts structures possibility]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 336 p.
5. Gamrat-Kurek L.I. Basic indicators of production effectiveness and their calculation. *Mezhvuz. sbornik nauchnikh trudov "Teoriya i praktika organizatsii podgotovki proizvodstva mashinostroitelnoy produktii"*. Voronezh, VPI Publ., 1981, pp. 43–48.
6. Leontyev I.A. *Obespechenie tekhnologichnosti konstruksionnykh izdeliy* [Provision of production effectiveness of the products structures]. Leningrad, LDNTP Publ., 1984, 28 p.
7. Mikhelson-Tkach V.L. *Povyshenie tekhnologichnosti konstruksiy* [Improvement of the structures production effectiveness]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 104 p.
8. *Obespechenie tekhnologichnosti konstruksiy izdeliy. Sbornik statey* [Provision of production effectiveness of the products structures]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1976, 80 p.
9. Sagatelyan G.R., Rudenko N.P., Nazarov N.G. *Analiz tekhnologichnosti konstruksiy detaley priborov, izgotovlyaemykh metodami obrabotki materialov rezaniem* [Analysis of production effectiveness of devices parts structures produced by material cutting methods]. Moscow, MGTU Publ., 1995, 32 p.
10. Bochkarev P.Yu., Korolev A.V. Principles of creation of flexible technological processes system. *Doklady Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk*, 1999, no. 1, pp. 172–184.
11. Bochkarev P.Yu., Bokova L.G., Shalunov V.V. Assessment of parts production effectiveness in the system of planning of multiproduct engineering machine processing. *Mezhvuz. nauch. sbornik "Progressivnye napravleniya razvitiya tekhnologii mashinostroeniya"*. Saratov, SGTU Publ., 2007, pp. 151–153.
12. Bochkarev P.Yu., Bokova L.G. Procedure for assessment of parts production effectiveness in the system of automated planning of engineering machine processing. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 3, no. 2, pp. 30–33.
13. Ananyev S.A., Kuprovich V.I. *Tekhnologichnost konstruksiy* [Production effectiveness of the structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 424 p.
14. Balakshin B.S. *Teoriya i praktika tekhnologii mashinostroeniya. Kniga 2. Osnovy tekhnologii* [Theory and practice of engineering technology. Book 2. Basics of technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 367 p.
15. Balasheva Yu.V. *Kompleksnaya otsenka tekhnologichnosti detaley tipa "val" kvalimetricheskimi metodami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Complex assessment of production effectiveness of "shaft" type parts using the qualimetric methods]. Tula, 2007, 146 p.
16. Burbaev A.M. *Otrabotka tekhnologichnosti konstruksiy opticheskikh priborov* [Development of production effectiveness of optical devices structures]. S. Petersburg, SPbGUITMO Publ., 2004, 95 p.
17. Yanovsky G.A. *Metodika otrabotki konstruksiy na tekhnologichnost i otsenki urovnya tekhnologichnosti izdeliy mashinostroeniya i priborostroeniya* [Methodology of structures development for production effectiveness and assessment of production effectiveness level of machine and instrument engineering products]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 390 p.
18. Burbaev A.M. *Otrabotka tekhnologichnosti konstruksiy opticheskikh priborov* [Development of production effectiveness of optical devices structures]. S. Petersburg, SPbGUITMO Publ., 2004, 95 p.
19. Bochkarev P.Yu., Mitin S.G., Bokova L.G. Assessment of production effectiveness of products with the account of state of multiproduct automated manufacturing. *Sbornik tezisov mezhdunar. tekhnolog. foruma "Innovatsii. Tekhnologii. Proizvodstvo"*. Rybinsk, 2014, pp. 77–78.
20. Voloshinov D.V. Automated design of objects and processes using the methods of structural geometric modeling. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2008, no. 4-1, pp. 284–292.

DEVELOPMENT OF INDICATORS FOR ASSESSMENT OF PARTS OPERABILITY IN THE SYSTEM OF PLANNING OF ENGINEERING MECHANICAL PROCESSING

© 2015

L.G. Bokova, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Development of engineering and technological complexes”
P.Y. Bochkarev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Head of Chair “Development of engineering and technological complexes”
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov (Russia)

Keywords: production effectiveness; operability; engineering processes; quantitative indicators of production effectiveness assessment; machine processing systems; system of planning of multiproduct engineering processes.

Abstract: The decisions made at the stages of design-engineering preparation during the production effectiveness evaluation, which allows defining the compliance of planned for processing parts set with the possibilities of manufacturing system and providing achievement of the highest operability and efficiency of manufacturing processes, play the significant role in the product life cycle. The paper presents the methods of quantitative assessment of the products operability which take into account the feasibility of use of equipment for their production and allow creating the formalized procedures for the structure production effectiveness provision. Within the developed methodology for quantitative assessment of additional operability indicators which take into account the specificity of technological preparation of single-unit, small-series and medium-scale production, the authors revealed the interrelations between the operability and its impact on the technological components of the specified nomenclature processing within the specified manufacturing system, proved the structure of additional quantitative indicators of operability assessment within the system of planning of multiproduct engineering processes. The methodology of defining additional quantitative indicators is developed in the form of independent design procedures which include the examination of the parts design characteristics for the feasibility of their production within the specified manufacturing system with the account of processing machine’s capabilities, determination of the equipment capacity utilization, assessment of the manufactured parts set according to the form uniformity index and design characteristics of surfaces as the parts components, and the conclusion about the degree of their unification, predictive modeling of technical-and-economic indices of the planned parts nomenclature production. The additional quantitative indicators for operability assessment offered in the paper increase knowledge being obtained on the basis of analysis of the parts design elements and manufacturing system capabilities for their production on the stage of production effectiveness assessment during the technological preparation of production in order to improve the efficiency of multiproduct manufacturing systems functioning.

РАСЧЕТ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ШЛИФОВАННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2015

Н.И. Веткасов, доктор технических наук, заведующий кафедрой,
профессор кафедры «Технология машиностроения»

А.В. Степанов, инженер-программист кафедры «Технология машиностроения»
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: шероховатость; шлифование; абразивный инструмент; твердый смазочный материал; карандаш твердой смазки; качество шлифованной поверхности; наполнитель смазочного материала; наноматериал.

Аннотация: Показано, что одним из эффективных средств повышения качества поверхностного слоя деталей машин на операциях шлифования, выполняемых без применения смазочно-охлаждающих жидкостей (шлифование деталей электротехнического назначения, заточка лезвийного режущего инструмента и др.), является применение твердых смазочных материалов (ТСМ) в виде карандашей твердой смазки (КТС). Установлено, что шероховатость поверхностей деталей при шлифовании с применением ТСМ может быть снижена за счет введения в их состав наполнителей из высокодисперсных природных материалов и наноматериалов. Показано, что для прогнозирования параметров шероховатости деталей на операции шлифования с применением ТСМ важно наличие методики расчета этих параметров, учитывающей влияние режима обработки, материала обрабатываемой заготовки, характеристики шлифовального круга (ШК), состава и расхода ТСМ. Представлена методика расчета высотных параметров шероховатости деталей, шлифованных с применением ТСМ с наполнителями из наноматериалов и высокодисперсных природных материалов на операции плоского шлифования периферией круга. Для доказательства адекватности разработанной методики приведены результаты экспериментальных исследований, которые проводили на плоскошлифовальном станке мод. 3Е711ВФ2 при варьировании составом и расходом ТСМ, временем и режимом шлифования, характеристикой абразивного инструмента. В ходе исследований контролировали амплитуду статических и динамических колебаний, шероховатость шлифованных поверхностей, которую оценивали (по ГОСТ 25142) тремя высотными параметрами: средним арифметическим отклонением профиля Ra , высотой неровностей профиля по десяти точкам Rz , наибольшей высотой неровностей профиля $Rmax$. По результатам сравнения расчетных (Ra_p) и экспериментальных ($Ra_э$) значений среднего арифметического отклонения профиля Ra шлифованных поверхностей сделан вывод о достаточно высокой точности расчета. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышало 10...18 %.

Повышение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения при снижении затрат на их изготовление является приоритетной задачей при разработке современных технологий механической обработки. Один из наиболее важных параметров изделий, влияющих на их качество, – шероховатость шлифованных поверхностей деталей, входящих в изделия.

В настоящий момент, как правило, заданные микрогеометрические параметры поверхностей деталей формируют на операциях финишной обработки, значительное место среди которых занимают операции шлифования, выполнение которых в большинстве случаев предполагает использование смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), значительное место среди которых занимают смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ).

Однако в ряде случаев использование СОЖ на операциях шлифования ограничено, например, при шлифовании деталей электротехнического назначения, таких как роторы электродвигателей, магнитные головки и другие электротехнические изделия в сборе. СОЖ, как правило, сравнительно редко применяют при заточке режущего инструмента (РИ) в силу наличия вероятности возникновения микротрещин и прижогов, ухудшения контроля процесса заточки и экологической ситуации в зоне шлифования. В этом случае для повышения производительности обработки и качества обработанных поверхностей РИ используют твердые смазочные материалы (ТСМ), например, в виде карандашей твердой смазки (КТС). В качестве ТСМ чаще всего

применяют твердые органические продукты (парафины, стеарины, воски, полимеры, различные смолы), модифицированные твердыми смазочными наполнителями (графит, дисульфиды металлов, нитрид бора и др.). Наполнители существенно влияют на структурно-механические свойства ТСМ, взаимодействуя друг с другом и со связующим [1].

В последнее время определенное внимание уделяют исследованию эффективности применения ТСМ, наполнителями которых являются порошки высокодисперсных природных материалов и наноматериалов. Использование природных наполнителей, например, высокодисперсных порошков голубой глины и диатомита, имеющих ламеллярную структуру и содержащих по массе до 50 % наноструктурированного материала – монтмореллонита, способствует снижению контактного взаимодействия материалов обрабатываемой заготовки и абразивного инструмента. Введение в состав ТСМ наноматериалов оказывает благоприятное воздействие на обстановку в зоне контакта взаимодействующих тел, о чем свидетельствуют результаты исследований Н.Я. Яхьяева, А.П. Перекрестова, А.П. Ильина и др. [2–14].

На выбор конкретного состава ТСМ при проектировании операций шлифования оказывает его способность влиять на формирование шероховатости шлифованной поверхности. Эффективные составы ТСМ снижают шероховатость шлифованной поверхности через изменение смазочного, демпфирующего и диспергирующего действий.

Для прогнозирования высотных параметров шероховатости на операции шлифования с применением ТСМ важно наличие методики расчета этих параметров, учитывающей влияние режима обработки, материала обрабатываемой заготовки, характеристики шлифовального круга (ШК), состава и расхода ТСМ. В известных зависимостях для расчета высотных параметров шероховатости шлифованных поверхностей [15; 16] не учтено влияние состава и расхода ТСМ, нанесенного на рабочую поверхность шлифовального круга.

При разработке математической модели исходили из того, что шероховатость поверхности при шлифовании формируется режущим контуром круга при активном влиянии на этот процесс ТСМ, изменяющего в зоне обработки свое агрегатное состояние. При этом за основную характеристику рельефа круга, от которой непосредственно зависят высота и шаг микронеровностей шлифованной поверхности, принимали динамическую разновысотность активных (режущих и давящих) абразивных зерен H_{0d} , зависящую от динамической характеристики процесса шлифования, а также от статической разновысотности активных зерен H_{0cm} , соответствующей глубине залегания половины из всех выступающих над связкой зерен, измеренной от вершины наиболее выступающего абразивного зерна [15; 16].

Динамическая разновысотность активных абразивных зерен равна согласно [3]:

$$H_{0L}(\tau) = e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0cm}}{\sigma_{cm}} \sqrt{(1 + \beta)\sigma_{cm}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot A\delta(\tau)^2}, \quad (1)$$

где σ_{cm}^2 – дисперсия статического распределения статической разновысотности активных зерен, мм², определяется по формуле [16]:

$$\sigma_{cm}^2 = 0,2 \cdot h_a^2;$$

h_a – толщина слоя абразива, снимаемого вершиной правящего инструмента при правке, мм;

H_{0cm} – статическая разновысотность зерен рабочей поверхности шлифовального круга, равна [15]:

$$H_{0cm} = h_0 / \sqrt[k]{F(h_{ck})};$$

h_0 – расстояние уровня скалывания активных зерен от наиболее выступающих вершин зерен, соответствующее заданной вероятности, мм;

k – показатель степени;

$F(h_{ck})$ – функция распределения вершин зерен после правки круга;

$A\delta(\tau)$ – амплитуда динамических колебаний ШК, мм:

$$A\delta(\tau) = \frac{j_c \cdot A_{cm} \cdot (\mu_0 / \mu)^p \cdot e^{K_{cotc} m_0 \tau}}{j_c + j_p}, \quad (2)$$

где A_{cm} – амплитуда статических колебаний ШК, мкм;
 K_{cotc} – коэффициент, учитывающий влияние состава КТС на изменение амплитуды динамических колебаний;

j_c, j_p – жесткость системы и жесткость резания, Н/мм, определяются по [1];

μ_0, μ – вязкость эталонного и проверяемого СОТС, соответственно, Па·с;

P – показатель степени, определяемый теоретически или экспериментально [1];

τ – время шлифования, с;

m_0 – показатель степени, характеризующий интенсивность роста амплитуды при шлифовании с эталонным СОТС.

Однако в формуле (2) не учитывается расход ТСМ, находящегося в зоне шлифования.

Как показали исследования Е.С. Киселева [17], изменение расхода СОТС квазилинейно приводит к изменению шероховатости шлифованной поверхности. Поэтому в расчете динамической разновысотности шлифовальных кругов следует учитывать не только изменение амплитуды во времени и влияние на нее ТСМ, но и его расход Q . В связи с этим зависимость для расчета амплитуды динамических колебаний $A\delta$ будет иметь вид:

$$A\delta(\tau, Q) = A_{cm} \cdot K_{mcm} \cdot \frac{j_c}{j_c + j_p} \cdot Q^\alpha \cdot \tau^\beta, \quad (3)$$

где K_{mcm} – коэффициент, учитывающий влияние состава ТСМ на изменение амплитуды динамических колебаний; α – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды динамических колебаний в зависимости от расхода ТСМ; β – коэффициент, учитывающий изменение амплитуды динамических колебаний в зависимости от времени шлифования.

С учетом выражения (1) математическую модель расчета среднего арифметического отклонения профиля Ra запишем в виде:

$$Ra(\tau) = K_{31} \cdot R[H_{0L}(\tau)]^{f_1}, \quad (4)$$

где K_{31} – коэффициент, учитывающий влияние засаливания рабочей поверхности круга и связанных с этим явлений схватывания металла заготовки с налипшими на круг частицами стружки; методика определения K_{31} дана в работе [18]; можно принять $K_{31} = 1,0$ при шлифовании заготовок из углеродистых и низколегированных сталей; при шлифовании заготовок из химически и адгезионноактивных материалов $K_{31} = 1,0$ в случае работы «острым» кругом (в других случаях – $K_{31} = 1,1 \div 1,6$ (меньшие значения для чистовых режимов и при использовании высокоэффективных ТСМ));

R – коэффициент, зависящий от характеристики, размеров и условий правки круга, от размеров заготовки, схемы и режима шлифования;

f_1 – показатель степени [16].

Окончательно математическая модель для расчета среднего арифметического отклонения профиля Ra может быть записана в виде:

$$Ra(\tau) = K_{31} \cdot R[e^{q\tau} \cdot \frac{H_{0cm}}{\sigma_{cm}} \sqrt{(1 + \beta)\sigma_{cm}^2 + \frac{2}{\pi} \cdot A\delta(\tau, Q)^2}]^{f_1}. \quad (5)$$

Таким образом, получена математическая модель формирования среднего арифметического отклонения профиля Ra шлифованной поверхности с учетом свойств и расхода ТСМ.

Для автоматизации расчета шероховатости поверхностей, шлифованных с применением ТСМ, по предложенной методике написана программа на языке C++. Для проверки адекватности предложенной математической модели проведены экспериментальные исследования.

На плоскошлифовальном станке мод. ЗЕ711ВФ2 выполняли всухую плоское шлифование периферией круга 1 300'40'76'25А F60 М 5 V А образцов из стали Р6М5, HRC 63...65, высотой 20 мм и диаметром 150 мм. Перед началом каждой серии опытов партию заготовок вышлифовывали в один размер с допуском по 7 качеству и шероховатостью по параметру $Ra \leq 1,6$ мкм. Отклонение шероховатости в партии заготовок не превышало 8...10 %.

Параметры шероховатости шлифованной поверхности измеряли на профилографе мод. 170622.

По результатам предварительных исследований качества обработанных поверхностей деталей плоское шлифование периферией круга заготовок из стали Р6М5 осуществляли со скоростью стола (заготовки) $V_{ст}=15$ м/мин, поперечной подачей $S_n=1$ мм/ход и с подачей на врезание $S_{np}=0,01$ мм/ход.

Режимы шлифования выбирали в соответствии с рекомендациями, изложенными в [19; 20], с учетом материала шлифуемых заготовок, прогнозируемой шероховатости шлифуемой поверхности, срока службы станка, жесткости технологической системы.

Варьировали составом ТСМ (табл. 1) и временем его нанесения на рабочую поверхность ШК (15 и 30 с). В ходе исследований также применяли ТСМ производства НПО «Алтай», обозначенный как состав А.

Расход ТСМ измеряли с помощью цифровых весов ВК-3000. Амплитуду колебаний шлифовального круга фиксировали пьезоэлектрическими вибропреобразователями ДН-3 и аналого-цифровым преобразователем LA20-USB.

Круги правили методом обтачивания, используя в качестве правящего инструмента алмазный карандаш 3908-0083 С2 (ГОСТ 607), с непрерывной подачей СОЖ поливом свободно падающей струей с расходом 5...8 dm^3/min по режиму: 3 рабочих хода с подачей $S_n=0,03$ мм/дв.ход; 3 прохода без подачи алмазного карандаша; скорость продольной подачи алмазного карандаша $S_{np}=0,2 - 0,05$ м/мин.

Шероховатость шлифованной поверхности оценивали (по ГОСТ 25142) тремя высотными параметрами: средним арифметическим отклонением профиля Ra , мкм; высотой неровностей профиля по десяти точкам Rz , мкм; наибольшей высотой неровностей профиля $Rmax$, мкм. Параметры шероховатости шлифованной поверхности Ra , Rz , $Rmax$ измеряли через 0,1 и 4 мин. По результатам исследований были получены зависимости амплитуды динамических колебаний A_0 и среднего арифметического отклонения профиля Ra от времени шлифования, состава и количества смазочного материала (табл. 2), нанесенного на рабочую поверхность шлифовального круга.

Таблица 1. Составы материала ТСМ

Обозначение состава	Компоненты, % масс				
	Серая глина	Парафин	Графит	Диатомит	Дисульфид молибдена
М	-	60	10	-	30
Г2	40	60	0	-	-
Д1	-	60	0	40	-

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные значения высотных параметров шероховатости поверхностей, шлифованных с применением ТСМ

Состав ТСМ	Время нанесения, с	Время шлифования, мин	Расход Q , г	A_0 , мкм	Ra_p , мкм	Ra_3 , мкм	Rz_3 , мкм	$Rmax_3$, мкм
Г2	15	0,1	1,8	3,318	0,308	0,326	2,150	2,420
Г2	15	4,5	1,8	4,306	0,390	0,373	2,340	2,960
Г2	30	0,1	2,0	2,76	0,251	0,270	2,080	2,330
Г2	30	4,5	2,0	2,786	0,322	0,313	2,246	2,810
Д1	15	0,1	3,0	3,698	0,427	0,483	2,910	3,743
Д1	15	4,5	3,0	3,926	0,656	0,636	3,210	5,073
Д1	30	0,1	5,2	2,381	0,220	0,223	1,130	1,583
Д1	30	4,5	5,2	3,14	0,329	0,326	1,826	2,470
М	15	0,1	2,3	3,14	0,585	0,623	2,870	4,656
М	15	4,5	2,3	3,875	0,767	0,690	3,950	6,166
М	30	0,1	3,7	2,305	0,337	0,356	1,846	2,426
М	30	4,5	3,7	3,546	0,431	0,413	2,830	3,126
А	15	0,1	0,8	2,76	0,281	0,270	1,770	2,435
А	15	4,5	0,8	2,786	0,368	0,313	2,833	4,063
А	30	0,1	1,2	1,697	0,211	0,206	1,490	2,026
А	30	4,5	1,2	3,546	0,360	0,350	2,980	3,656

Сравнение расчетных (R_{ap}) и экспериментальных (R_{a3}) значений среднего арифметического отклонения профиля Ra шлифованных поверхностей позволяет сделать вывод о достаточно высокой точности расчета. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышало 10...18 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Худобин Л.В., Бабичев А.П., Булыжев Е.М., Боровский Г.В., Веткасов Н.И., Гисметулин А.Р. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
- Ильин А.П., Назаренко О.Б., Рихерт С.В. Влияние суспензии «моторное масло + смесь нанопорошков меди и никеля» на трибологические свойства пары трения «углеродистая сталь – низколегирующая сталь» // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 3. С. 77–79.
- Яхьяев Н.Я., Бегов Ж.Б., Батырмурзаев Ш.Д. Новая смазочная композиция для модификации поверхностей трибосопряжений судового малоразмерного дизеля // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2009. № 1. С. 251–255.
- Перекрестов А.П., Непомнящий В.А. Механизм действия противоизносной присадки на магниевой основе // Вестник АГТУ. 2008. № 2. С. 46–50.
- Стариков С.В., Прушак В.Я., Богданович П.Н. Твердая смазка для абразивной обработки сталей и твердых сплавов (ее варианты) и антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов: патент РФ № 96120057, заявл. 03.10.1996, опубл. 27.06.1997.
- Симашко В.В., Федоренко И.Н., Лендель И.В., Ищук Ю.Л., Ваврик В.И., Стахурский А.Д., Тамбовцева Н.Н. Твердая технологическая смазка для механической обработки металлов: патент РФ № 94039509, заявл. 20.10.1994, опубл. 10.08.1996.
- Стариков С.В., Прушак В.Я., Богданович П.Н. Антиприжоговая добавка к смазкам для абразивной обработки сталей и твердых сплавов и твердые смазки, содержащие ее (варианты): патент РФ № 2118651, заявл. 08.10.1996, опубл. 10.09.1998.
- Булатов М.А., Кононенко В.И., Лундина В.Г., Курникова Л.И., Алехина В.Д., Шевченко В.Г., Швейкин Г.П., Нохрин А.С. Твердая смазка для абразивной обработки металлов: патент РФ № 2114903, заявл. 04.09.1996, опубл. 10.07.1998.
- Кононенко В.И., Алехина В.Д., Байдалин Ю.А., Рябина А.В., Торокин В.В., Шевченко В.Г. Твердая смазка для абразивной обработки материалов: патент РФ № 2005134068, заявл. 03.11.2005, опубл. 10.05.2007.
- Ашихмин И.В. Исследование влияния твердых смазок на процессы трения и износа круга при абразивной разрезке нержавеющей сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 1981. 21 с.
- Gleiter H. Nanocrystalline materials // Progress in Materials Science. 1989. Vol. 33. № 4. P. 223–315.
- Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured Materials // Handbook of Nanoscience, Engineering and Technology. USA: CRC Press, 2002. P. 22–41.
- Кремнев Г.П. Новые составы твердых смазок для лезвийной и абразивной обработки труднообрабатываемых материалов // Вестник инженерной академии Украины. 2001. Вып. 3. С. 351–354.
- Булатов М.А., Кононенко В.И., Лундина В.Г., Курникова Л.И., Алехина В.Д., Шевченко В.Г., Швейкин Г.П., Нохрин А.С. Твердая смазка для абразивной обработки металлов: патент РФ № 96117774, заявл. 04.09.1996, опубл. 20.11.1998.
- Белов М.А. Повышение качества шлифованных деталей из коррозионно-стойких сталей путем рационального применения технологических жидкостей : дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 1986. 366 с.
- Королев А.В. Исследование процессов образования поверхности инструмента и деталей при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.
- Киселев Е.С. Исследование возможности повышения эффективности круглого наружного скоростного шлифования путем рационального использования смазочно-охлаждающих жидкостей : дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 1977. 292 с.
- Правиков Ю.М. Повышение эффективности операций шлифования путем снижения засаливания рабочей поверхности шлифовального круга (на примере шлифования заготовок из алюминиевых сплавов) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 1983. 16 с.
- Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
- Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах : справочник. Челябинск: АТОКСО, 2007. 384 с.

REFERENCES

- Khudobin L.V., Babichev A.P., Bulyzhev E.M., Borovskiy G.V., Vetkasov N.I., Gismetulin A.R. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating-cooling process means and their application during cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 544 p.
- Piyin A.P., Nazarenko O.B., Richert S.V. Influence of «oil + mixture of copper and nickel nanopowders» suspension on a tribological behavior of «carbon steel – low-alloy steel» pair friction. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2004, vol. 307, no. 3, pp. 77–79.
- Yahyaev N.Y., Begov Zh.B., Batirmurzaev Sh.D. New lubricant composition for updating surfaces of friction units of marine small-sized diesel engine. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 1, pp. 251–255.
- Perekrestov A.P., Nepomnyashchy V.A. The mechanism of the antiwear additive on the magnetic basis. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 2, pp. 46–50.
- Starikov S.V., Prushak V.Y., Bogdanovich P.N. *Tverdaya smazka dlya abrazivnoy obrabotki staley i tverdikh splavov (ee varianty) i antiprizhogovaya dobavka k smazkam dlya abrazivnoy obrabotki staley i tverdikh splavov* [Solid lubricant for abrasive processing of steels and hard alloys (its variants) and anti-burning

- additive to lubricant for abrasive processing of steels and hard alloys]. Patent RF no. 96120057, 1996.
6. Simashko V.V., Fedorenko I.N., Lendyel I.V., Ishchuk Yu.L., Vavrik V.I., Stakhurskiy A.D., Tambovtseva N.N. *Tverdaya tekhnologicheskaya smazka dlya mekhanicheskoy obrabotki metallov* [Solid process lubricant for mechanical treatment of metals]. Patent RF no. 94039509, 1994.
 7. Starikov S.V., Prushak V.Ya., Bogdanovich P.N. *Antiprizhogovaya dobavka k smazkam dlya abrazivnoy obrabotki staley i tverdikh splavov i tverdie smazki, sodержashchie ee (varianty)* [Anti-burning additive to lubricants for abrasive processing of steels and hard alloys and solid lubricants containing it (variants)]. Patent RF no. 2118651, 1996.
 8. Bulatov M.A., Kononenko V.I., Lundina V.G., Kurnikova L.I., Alekhina V.D., Shevchenko V.G., Shveykin G.P., Nokhrin A.S. *Tverdaya smazka dlya abrazivnoy obrabotki metallov* [Solid lubricant for abrasive processing of metals]. Patent RF no. 2114903, 1996.
 9. Kononenko V.I., Alekhina V.D., Baydalín Yu.A., Ryabina A.V., Torokin V.V., Shevchenko V.G. *Tverdaya smazka dlya abrazivnoy obrabotki materialov* [Solid lubricant for abrasive processing of materials]. Patent RF no. 2005134068, 2005.
 10. Ashikhmin I.V. *Issledovanie vliyaniya tverdikh smazok na protsessy treniya i iznosa kruga pri abrazivnoy razrezke nerzhavayushchikh staley*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of solid lubricants influence on the processes of wheel dragging and wear during abrasive cutting of stainless steels]. Novocheerkassk, 1981, 21 p.
 11. Gleiter H. Nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 1989, vol. 33, no. 4, pp. 223–315.
 12. Nazarov A.A., Mulyukov R.R. Nanostructured Materials. *Handbook of Nanoscience, Engineering and Technology*. CRC Press, 2002, pp. 22–41.
 13. Kremnev G.P. New compounds of solid lubricants for edge and abrasive processing of hard-to-machine materials. *Vestnik inzhenernoy akademii Ukrainy*, 2001, no. 3, pp. 351–354.
 14. Bulatov M.A., Kononenko V.I., Lundina V.G., Kurnikova L.I., Alekhina V.D., Shevchenko V.G., Shveykin G.P., Nokhrin A.S. *Tverdaya smazka dlya abrazivnoy obrabotki metallov* [Solid lubricants for abrasive processing of metals]. Patent RF no. 96117774, 1996.
 15. Belov M.A. *Povishenie kachestva shlifovannikh detaley iz korroziyno-stoykikh staley putem ratsionalnogo primeneniya tekhnologicheskikh zhidkostey*. Diss. kand. tekhn. nauk [Quality improvement of ground parts made of corrosion-resistant steels by means of competent use of process fluids]. Ulyanovsk, 1986, 366 p.
 16. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnosti instrumenta i detaley pri abrazivnoy obrabotke* [Study of the processes of surface formation of tools and parts during abrasive processing]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1975, 191 p.
 17. Kiselev E.S. *Issledovanie vozmozhnosti povisheniya effektivnosti kruglogo naruzhnogo skorostnogo shlifovaniya putem ratsionalnogo ispolzovaniya smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostey*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of possibility of improvement of efficiency of round external high-speed grinding by means of competent use of lubricating-cooling fluids]. Ulyanovsk, 1977, 292 p.
 18. Pravikov Yu.M. *Povishenie effektivnosti operatsiy shlifovaniya putem snizheniya zasalivaniya rabochey poverkhnosti shlifovalnogo kruga (na primere shlifovaniya zagotovok iz alyuminievikh splavov)*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Grinding operations efficiency improvement by means of glazing reducing of grinding wheel functional surface (the case of aluminum alloys blank parts grinding)]. Saratov, 1983, 16 p.
 19. Filimonov L.N. *Vysokoskorostnoe shlifovanie* [High-speed grinding]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979, 248 p.
 20. *Rezhimy rezaniya na raboty, vypolnyaemie na shlifovalnikh i dovodochnikh stankakh s ruchnim upravleniem i poluavtomatakh*. Spravochnik [Cutting modes for operations performed on manually-operated and semi-automated grinding and lapping machines]. Chelyabinsk, ATOKSO Publ., 2007, 384 p.

CALCULATION OF ROUGHNESS OF SURFACES GROUND USING SOLID LUBRICANTS

© 2015

N.I. Vetkasov, Doctor of Engineering, Head of the Department,
Professor of the Department “Technology of machine building”
A.V. Stepanov, programmer engineer of the Department “Technology of machine building”
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: roughness; grinding; abrasive tool; solid lubricant; solid lubricant stick; ground surface quality; lubricant filler; nanomaterial.

Abstract: The study showed that the applying of solid lubricants (SL) in the form of solid lubricant sticks (SLS) is one of the effective means for quality improvement of the surface layer of machine parts used during the grinding operations performed without lubricating-cooling fluids (grinding of parts of electro-technical devices, sharpening of edge cutting tools and so on). The authors defined that the roughness of the parts surfaces during the grinding using SLs can be reduced by introduction of finely dispersed natural and nanomaterial fillers to their compound. The study showed that to predict the parts roughness parameters during the grinding operations using SLs it is very important to have a calculation procedure for these parameters which takes into account the influence of the processing mode, processed blank part material, grinding wheel (GW) characteristics, SL compound and consumption. The authors presented the procedure for calculation of height roughness parameters of parts ground using SLs with the fillers of nanomaterials and finely dispersed natural materials during the operation of surface grinding with the periphery of a straight wheel. To prove the adequacy of the procedure, the authors give the results of experimental study which were carried out on the 3E711VF2 surface-grinding machine varying the SL compound and consumption, time and grinding modes, and the abrasive tool characteristics. During the study, the authors monitored the static and dynamic vibrations amplitude, and the roughness of the ground surfaces, which was assessed according to three height parameters (as per GOST standard 25142): arithmetic average roughness height Ra , ten-point height of irregularities Rz , and maximum height of profile $Rmax$. According to the results of comparing calculated (Ra_c) and experimental (Ra_e) values of arithmetic average roughness height Ra of the ground surfaces the authors concluded sufficiently high accuracy of calculation. The discrepancy between the calculated and experimental values did not exceed 10 ... 18 %.

ЛИНЕЙНАЯ И РАЗВЕТВЛЕННАЯ СХЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

© 2015

А.В. Гордеев, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: выявление противоречий; идеальное решение; линейная схема; противоречие; разветвленная схема; техническое противоречие; техническое решение; физическое противоречие; циклическая схема.

Аннотация: Цель работы – повышение эффективности решения технических задач путем применения оптимальной схемы решения. В статье рассмотрены различные схемы выявления технических и физических противоречий в технических системах при решении технической задачи – линейная и разветвленная, последовательная и циклическая.

Показано, что при использовании последовательной линейной схемы обеспечивается получение технического решения с наименьшими затратами, однако уменьшается вероятность получения оптимального решения. При использовании последовательной разветвленной или циклической линейной схемы затрачивается больше времени на получение технического решения, но при этом возрастает вероятность получения оптимального решения. Максимальная вероятность получения оптимального решения достигается при применении циклической разветвленной схемы, хотя затраты времени в этом случае также будут максимальными.

В статье приведен пример получения решений задачи о снижении температуры при обработке детали шлифованием с помощью методов технического творчества при применении различных схем поиска решений. Схема в примере реализует получение удвоения числа решений на этапах 2 (решение задачи напрямую, без применения методов технического творчества), 3 (определение полезного свойства системы, которое следует сохранить), 6 (выявление физического противоречия) и 7 (получение технического решения). В результате получаем два прямых решения, определяем четыре полезных свойства, соответственно, формулируем четыре технических противоречия и четыре идеальных решения, формулируем 8 физических противоречий, устраняя которые получаем 16 технических решений, после чего, анализируя преимущества и недостатки каждого из решений, выбираем оптимальное решение.

Изучение методов решения технических задач с помощью технического творчества в рамках учебного процесса показало, что в процессе обучения целесообразно рассмотреть как линейную, так и разветвленную схемы получения решений, чтобы студенты могли сравнить их преимущества и недостатки. Опыт показывает, что наиболее интересные технические решения студенты получают при применении разветвленной схемы.

Совершенствование любой технической системы, как и всякой системы, требует системного анализа, согласно которому этот процесс должен осуществляться системно, упорядоченно, путем последовательного выполнения определенных шагов [1–6]. Теоретики изобретательства конкретизируют положения системного анализа применительно к решению изобретательских задач [7–13], предлагая варианты содержания и последовательности его шагов. Наибольшее распространение получил подход Г.С. Альтшуллера, предложившего так называемый алгоритм решения изобретательских задач (АРИЗ) [14–16]. С целью возможности применения системного анализа при решении технических задач профилирующих дисциплин в вузе был предложен упрощенный вариант АРИЗ – так называемый алгоритм выявления противоречий АВП [17–20].

При выявлении технических (ТП) и физических (ФП) противоречий в процессе решения технических задач с помощью АВП как в учебном процессе, так и в реальных производственных условиях можно использовать различные схемы его применения, определяющие содержание и порядок действий как на каждом этапе решения, так и между этапами. Эти схемы могут различаться по разным параметрам конфигурации – разветвленности (линейная и разветвленная), цикличности (последовательная и циклическая) и др.

Линейная схема предполагает получение на каждом этапе одного решения, которое является базой для вы-

полнения следующего этапа. Разветвленная схема предполагает на отдельных этапах получение нескольких вариантов решения с оценкой их по определенным критериям и выбором оптимального варианта, который принимают за базу для выполнения следующих этапов. А можно не определять пока оптимальные варианты, а каждый из них принять за базу для следующих этапов, которые выполнять далее параллельно. В результате будет получено множество решений, из которых уже будет выбрано оптимальное.

Последовательная схема предполагает, что решение, полученное на каждом этапе, является окончательным. Причем последовательная схема может быть как линейной, так и разветвленной. Циклическая схема предполагает, что решения, полученные на каждом этапе, не являются окончательными. Если на каком-то этапе возникнет ситуация, что мы не можем получить удовлетворяющего нас решения, следует вернуться к какому-то из предыдущих этапов и найти другие варианты решений. Циклическая схема также может быть как линейной, так и разветвленной.

Наиболее простой вариант – линейная последовательная схема. Наиболее сложный – разветвленная циклическая. Преимущество первой – наиболее быстрый путь получения решения. Но при этом вероятность получения оптимального решения невелика. Преимущество второй – получение решения, близкого к оптимальному. Однако такая схема наиболее трудоемкая.

На рис. 1 приведены примеры схем получения решения: а – линейная, последовательная; б – разветвленная, последовательная; в – линейная, циклическая. Более сложный вариант разветвленной схемы приведен на рис. 2.

Схема, рис. 1 а, не требует пояснений.

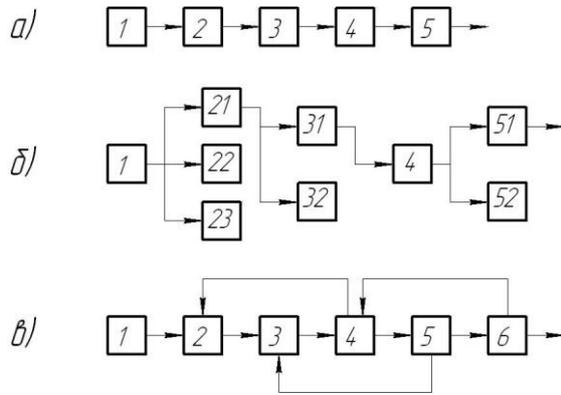


Рис. 1. Пример схем получения решения:
а – линейная, последовательная; б – разветвленная, последовательная; в – линейная, циклическая

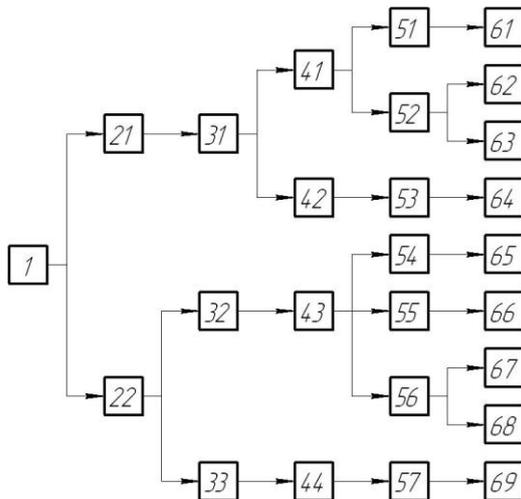


Рис. 2. Вариант разветвленной схемы получения решения

Схема, приведенная на рис. 1 б, предусматривает на 1-м этапе получение одного варианта решения, на 2-м этапе – трех вариантов и выбор оптимального из них – решения 21, которое является базой для 3-го этапа. На 3-м этапе получено два варианта решения, из которых оптимальным является решение 31. На 4-м этапе одно решение, на 5-м этапе – снова два, из которых решение 51 оптимальное, и т. д.

Согласно схеме, приведенной на рис. 1 в, три первых этапа выполняются по последовательной схеме. После выполнения 4-го этапа необходимо вернуться ко 2-му этапу и скорректировать полученное на нем решение, а далее вновь выполнить этапы 3, 4 и т. д. После выполнения 5-го этапа необходимо вернуться к этапу 3, после выполнения 6-го этапа – к этапу 4.

Схема, рис. 2, является более сложным вариантом разветвленной схемы. На этапе 2 мы получили два варианта решения – 21 и 22. Далее на 3-м этапе получаем решение 31 на базе решения 21 и решения 32 и 33 на базе решения 22. На 4-м этапе на базе решения 31 получаем два варианта решения – 41 и 42, а на базе решений 32 и 33 по одному варианту – 43 и 44. На 5-м этапе на базе решения 41 получаем два решения – 51 и 52, на базе решения 42 – одно решение 53, на базе решения 43 – три варианта – 54, 55 и 56, на базе решения 44 – один вариант 57. Наконец, на 6-м этапе получаем на базе решений 51, 53, 54, 55, 57 по одному решению соответственно 61, 64, 65, 66, 69, а на базе решений 52 и 56 – по два решения соответственно 62 и 63, 67 и 68.

Следует отметить, что независимо от типа схемы (линейная, разветвленная, последовательная, циклическая, комбинированная) она может быть жесткой, когда схема определена заранее, либо адаптивной (гибкой), когда ее тип как в целом, так и на определенных этапах определяется в процессе решения задачи.

На рис. 3 приведен условный вариант сложной разветвленной схемы применительно к совершенствованию технической системы (ТС) при условии получения удвоения числа решений на этапах 2 (решение задачи напрямую ПР, без применения методов технического творчества), 3 (определение полезного свойства (ПС) системы, которое следует сохранить), 6 (выявление физического противоречия (ФП)) и 7 (получение технического решения (ТР), на схеме не показано). Таким образом, при поиске решений по устранению какого-то недостатка (вредного свойства (ВС)) системы получаем два прямых решения ПР1 и ПР2; определяем четыре полезных свойства ПС11, ПС12, ПС21 и ПС22, соответственно, формулируем четыре технических противоречия ТП11, ТП12, ТП21 и ТП22 и четыре идеальных решения ИР11, ИР12, ИР21 и ИР22; формулируем 8 физических противоречий ФП111, ФП112, ФП121, ФП122, ФП211, ФП212, ФП221, ФП222; устраняем каждое из этих противоречий и получаем 16 технических решений ТР1111...ТР2222. Естественно, что при решении реальных ТЗ количество решений на каждом этапе изменится, здесь мы только иллюстрируем сущность получения ТР по сложной разветвленной схеме.

Рассмотрим пример из области технологии машиностроения. Один из главных ограничивающих факторов при обработке деталей шлифованием – опасность возникновения прижогов – структурно-фазовых превращений в поверхностном слое детали вследствие высокой температуры шлифования (ВС).

Сначала воспользуемся линейной последовательной схемой (рис. 1 а).

Решение задачи напрямую широко известно: применить смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ). Температура шлифования снижается, но возрастают расходы на дорогостоящую СОЖ. Следовательно, полезное свойство ПС – малые расходы на СОЖ. Возникает техническое противоречие ТП: ТС обеспечивает малые расходы на СОЖ, но при этом возрастает температура шлифования. Идеальное решение, при котором устраняется ВС (высокая температура), но сохраняется ПС, ИР: ТС обеспечивает снижение температуры шлифования, сохраняя малые расходы на СОЖ. Физическое противоречие (ФП) будет иметь вид: для снижения

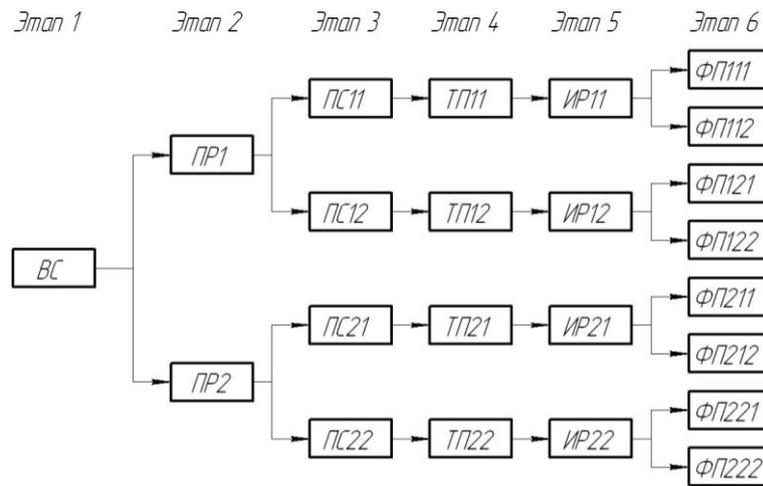


Рис. 3. Вариант разветвленной схемы совершенствования технической системы при условии удвоения числа решений на этапах

температуры шлифования давление СОЖ должно быть высоким, для уменьшения расходов на СОЖ давление должно быть низким; давление должно быть и не должно быть. Предлагается следующее ТР: подавать СОЖ пульсирующей струей. СОЖ будет поступать непосредственно в зону шлифования, что позволит при малом ее расходе повысить интенсивность охлаждения.

Мы получили техническое решение, устраняющее выявленный недостаток. Но мы не можем сказать, является ли оно оптимальным, так как нам практически не с чем его сравнивать.

Рассмотрим теперь ход решения той же задачи по разветвленной схеме согласно рис. 3.

Можно предложить следующие два варианта решения задачи напрямую:

ПР1: применить СОЖ; ПР2: уменьшить скорость шлифования v .

При этом ухудшаются следующие свойства системы. При применении СОЖ усложняется конструкция станка за счет введения системы смазки и охлаждения, возникает потребность в дорогостоящей СОЖ. При снижении v снижается производительность обработки и увеличивается шероховатость Ra обработанной поверхности. Следовательно, полезными свойствами ТС являются: ПС11: простота конструкции станка; ПС12: отсутствие потребности в дорогостоящей СОЖ; ПС21: высокая производительность обработки; ПС22: малая шероховатость поверхности.

Это позволяет нам сформулировать технические противоречия для каждого варианта: ТП11: ТС проста по конструкции, но не обеспечивает снижения температуры шлифования; ТП12: ТС не требует дорогостоящей СОЖ, но не обеспечивает снижения температуры шлифования; ТП21: ТС обеспечивает высокую производительность обработки, но не обеспечивает снижения температуры шлифования; ТП22: ТС обеспечивает малую шероховатость обработанной поверхности, но не обеспечивает снижения температуры шлифования.

На основании этих ТП мы можем сформулировать идеальные решения для каждого варианта: ИР11: ТС обеспечивает снижение температуры шлифования, со-

храня простоту конструкции станка; ИР12: ТС обеспечивает снижение температуры шлифования, не требуя при этом дорогостоящей СОЖ; ИР21: ТС обеспечивает снижение температуры шлифования, сохраняя высокую производительность; ИР22: ТС обеспечивает снижение температуры шлифования, сохраняя малую шероховатость обработанной поверхности.

Для указанных выше ТП выявляем физические противоречия: ФП111: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, давление СОЖ в системе должно быть высоким; чтобы сохранить простоту конструкции станка, давление СОЖ в системе должно быть низким (давление СОЖ должно быть высоким и низким; давление СОЖ должно быть и не должно быть); ФП112: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, СОЖ должна подаваться непосредственно в контакт шлифовального круга с деталью; чтобы сохранить простоту конструкции станка, СОЖ не должна подаваться в контакт (СОЖ должна подаваться в контакт и не должна подаваться в контакт); ФП121: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, расход СОЖ должен быть большим; чтобы снизить потребность в дорогостоящей СОЖ, расход СОЖ должен быть малым (расход СОЖ должен быть большим и малым; расход СОЖ должен быть и не должен быть); ФП122: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, СОЖ должна содержать поверхностно-активные присадки; чтобы снизить расходы на СОЖ, она не должна содержать присадок (СОЖ должна содержать присадки и не должна содержать присадки); ФП211: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, v должна быть низкой; чтобы сохранить высокую производительность, v должна быть высокой (v должна быть высокой и низкой; v должна быть и не должна быть); ФП212: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, v должна быть прерывистой; чтобы сохранить высокую производительность, v должна быть непрерывной (v должна быть прерывистой и непрерывной); ФП221: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, контакт шлифовального круга с деталью должен быть длительным; чтобы сохранить малую

шероховатость обработанной поверхности, контакт шлифовального круга с деталью должен быть кратковременным (контакт должен быть длительным и кратковременным; контакт должен быть и не должен быть); ФП222: чтобы обеспечить снижение температуры шлифования, зернистость круга должна быть большой; чтобы сохранить малую шероховатость обработанной поверхности, зернистость круга должна быть малой (зернистость круга должна быть большой и малой; зернистость должна быть и не должна быть).

Разрешая указанные противоречия с помощью известных методов [1; 2], получаем следующие технические решения: ТР1111: разделить струю СОЖ на две: одну подавать через узкое сопло под большим давлением, этот «водяной нож» будет рассекал воздушную подушку вокруг шлифовального круга, другую подавать поливом без давления в образовавшееся разреженное пространство; ТР1112: обеспечить пульсирующую подачу СОЖ под большим давлением; ТР 1121: применить высокопористый шлифовальный круг и подавать СОЖ через поры круга; ТР1122: выполнить в шлифовальном круге радиальные каналы и подавать СОЖ через них; ТР1211: применить адаптивную систему подачи СОЖ: с повышением температуры расход СОЖ увеличивается, со снижением температуры уменьшается; ТР1212: подавать СОЖ только непосредственно в контакт шлифовального круга с деталью с помощью специальной насадки; ТР1221: ввести в эмульсол поверхностно-активную добавку, например триэтаноламин, в объеме 0,5 %, а при приготовлении эмульсии разбавить ее до концентрации эмульсола 3–5 %, тогда получим СОЖ, содержащую 0,015–0,025 % присадок, что не повлияет на стоимость СОЖ, но уменьшит интенсивность теплообразования за счет снижения сил резания; ТР1222: применить регенерацию СОЖ в замкнутом цикле; ТР2111: снизить окружную скорость круга с одновременным повышением величины продольной подачи на оборот; ТР2112: при повышении скорости круга пропорционально повышать скорость вращения детали; ТР2121: применить шлифовальный круг с пазами на рабочей поверхности; ТР2122: применить наклонный шлифовальный круг; ТР2211: пазы на рабочей поверхности круга выполнить спиральными; ТР2212: выполнить шлифовальный круг из двух одинаковых частей с пазами, сместив их при сборке на величину ширины паза; ТР2221: применить шлифовальный круг из смеси разной зернистости: крупные зерна снимают основной припуск с малыми удельными нагрузками и, следовательно, при низкой температуре, а находящиеся между ними мелкие зерна производят зачистку поверхности при значительно меньшей напряженности; ТР2222: выполнить шлифовальный круг сегментным из участков разной зернистости.

Видим, что благодаря применению системного анализа получено 16 технических решений по решению только одной проблемы – предотвращению прижогов при шлифовании. С помощью сопоставительного анализа преимуществ и затрат мы можем выбрать оптимальное для данных производственных условий ТР. Учитывая, что затраты на выявление противоречий и получение вариантов ТР малы по сравнению с возможными преимуществами в производственных условиях, можно сделать вывод об эффективности

разветвленной схемы решения творческих технических задач.

В процессе изучения методов разрешения противоречий в рамках учебной дисциплины «Основы технического творчества» целесообразно рассмотреть как линейную, так и разветвленную схемы получения решений, чтобы студенты могли сравнить их хотя бы в первом приближении. Опыт защиты дипломных проектов по специальности «Технология машиностроения» показывает, что наиболее интересные технические решения студенты получают при применении разветвленной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. М.: КНОРУС, 2010. 224 с.
2. Вдовин В.М., Суркова В.А., Валентинов В.А. Теория систем и системный анализ. М.: Дашков и К, 2013. 644 с.
3. Волкова В.Н., Денисов А.А. Теория систем и системный анализ. М.: Юрайт, 2013. 616 с.
4. Качала В.В. Теория систем и системный анализ. М.: ИЦ Академия, 2013. 272 с.
5. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике. М.: ЛИБРОКОМ, 2013. 248 с.
6. Антонов А.В. Системный анализ. М.: Высшая школа, 2008. 454 с.
7. Альтшуллер Г.С. Алгоритм изобретения. М.: Моск. рабочий, 1973. 296 с.
8. Новоселов С.А. Технология развития изобретательства учащихся. Екатеринбург: УрГПУ, 1995. 168 с.
9. Амиров Ю.Д. Основы конструирования: творчество, стандартизация, экономика. М.: Изд-во стандартов, 1991. 392 с.
10. Клег Б., Бич П. Интенсивный курс по развитию творческого мышления. М.: АСТ, 2004. 392 с.
11. Казаков Ю.В. Методы решения изобретательских задач. Тольятти: ТГУ, 2010. 161 с.
12. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1998. 368 с.
13. Методы поиска новых технических решений / под ред. А.И. Половинкина. Йошкар-Ола: Марийское кн. изд-во, 1976. 192 с.
14. Альтшуллер Г.С. Творчество как точная наука. М.: Советское радио, 1979. 176 с.
15. Альтшуллер Г.С., Селюцкий А.Б. Крылья для Икара. Петрозаводск: Карелия, 1980. 224 с.
16. Альтшуллер Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Новосибирск: Наука, 1986. 209 с.
17. Гордеев А.В. Основы технического творчества. Тольятти: ТГУ, 2008. 216 с.
18. Гордеев А.В. Усиление творческой составляющей – основной путь повышения уровня подготовки инженеров // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2009. № 6. С. 71–80.
19. Гордеев А.В. Выявление противоречий в технических задачах при курсовом и дипломном проектировании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2. С. 383–388.
20. Гордеев А.В. Структурирование методов технического творчества в учебном процессе // Вектор науки

Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 333–336.

REFERENCES

1. Tarasenko F.P. *Prikladnoy sistemnyy analiz* [Applied Systems Analysis]. Moscow, KNORUS Publ., 2010, 224 p.
2. Vdovin V.M., Surkova V.A., Valentinov V.A. *Teoriya system i sistemnyy analiz* [Systems Theory and Systems Analysis]. Moscow, Dashkov & K Publ., 2013, 644 p.
3. Volkova V.N., Denisov A.A. *Teoriya system i sistemnyy analiz* [Systems Theory and Systems Analysis]. Moscow, Yurayt Publ., 2013, 616 p.
4. Kachala V.V. *Teoriya system i sistemnyy analiz* [Systems Theory and Systems Analysis]. Moscow, Akademiya Publ., 2013, 272 p.
5. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Sistemnyy analiz i sintez strategicheskikh resheniy v innovatike* [System analysis and strategic decisions synthesis in innovation theory]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2013, 248 p.
6. Antonov A.V. *Sistemnyy analiz* [Systems Analysis]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008, 454 p.
7. Altshuller G.S. *Algoritm izobreteniya* [Invention algorithm]. Moscow, Moskovskiy rabochiy Publ., 1973, 296 p.
8. Novoselov S.A. *Tekhnologiya razvitiya izobretatelstva uchashchikhsya* [Technology of development of the students' invention activities]. Ekaterinburg, UrGPU Publ., 1995, 168 p.
9. Amirov Yu.D. *Osnovy konstruirovaniya: tvorchestvo, standartizatsiya, ekonomika* [Basics of design engineering: creativity, standardization, economics]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1991, 392 p.
10. Kleg B., Bich P. *Intensivniy kurs po razvitiyu tvorcheskogo myshleniya* [Crash course on creativity]. Moscow, AST Publ., 2004, 392 p.
11. Kazakov Yu.V. *Metody resheniya izobretatel'skikh zadach* [Methods of inventive problems solving]. Togliatti, TGU Publ., 2010, 161 p.
12. Polovinkin A.I. *Osnovy inzhenernogo tvorchestva* [Basics of engineering creativity]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998, 368 p.
13. Polovinkin A.I., ed. *Metody poiska novikh tekhnicheskikh resheniy* [Methods of search of new engineering solutions]. Yoshkar-Ola, Mariyskoe knizhnoe izdatelstvo Publ., 1976, 192 p.
14. Altshuller G.S. *Tvorchestvo kak tochnaya nauka* [Creative work as the exact science]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979, 176 p.
15. Altshuller G.S., Selyutskiy A.B. *Krylya dlya Ikara* [Wings for Icarus]. Petrozavodsk, Kareliya Publ., 1980, 224 p.
16. Altshuller G.S. *Nayti ideyu. Vvedenie v teoriyu resheniya izobretatel'skikh zadach* [To find an idea. Introduction to theory of inventive problems solving]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 209 p.
17. Gordeev A.V. *Osnovi tehnicyeskogo tvorchestva* [Basics of technical creative work]. Togliatti, TGU publ., 2008, 216 p.
18. Gordeev A.V. Creative study – general direction of improvement study of engineer. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, no. 6, pp. 71–80.
19. Gordeev A.V. Revealing of contradictions in technical problems at course and degree designing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 383–388.
20. Gordeev A.V. Structuring of methods engineering creative at studying process. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 333–336.

LINEAR AND SUBDIVIDED SCHEMES OF GETTING ENGINEERING SOLUTIONS

© 2015

A.V. Gordeev, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Mechanical engineering equipment and technologies”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: identification of contradictions; perfect solution; linear scheme; contradiction; subdivided scheme; engineering contradiction; engineering solution; physical contradiction; cyclic scheme.

Abstract: The purpose of this paper is to improve the efficiency of engineering challenges solving through the application of optimal solution scheme. The paper describes various schemes of identification of engineering and physical contradictions in engineering systems when solving engineering challenges: linear and subdivided, sequential and cyclic.

The research showed that the application of a sequential linear scheme provides getting of the most cost-effective engineering solution, but decreases the feasibility of obtaining optimal solution. The application of sequential subdivided or cyclic linear scheme spends more time for engineering solution obtaining, but increases the feasibility of obtaining optimal solution. Maximum feasibility of obtaining optimal solution is achieved when using cyclic subdivided scheme, although the time expenditure in this case will also be maximum.

The paper gives an example of obtaining solutions of the problem of temperature decrease when processing part by grinding using the methods of technical creativity when applying various schemes of finding solutions. The scheme used in the example doubles the number of solutions on stage 2 (direct problem solution, without application of technical creativity methods), stage 3 (determination of system utility which should be stored), stage 6 (detection of physical contradiction), and stage 7 (engineering solutions getting). As a result, we get two direct solutions, define four utilities, respectively formulate four engineering contradictions and four ideal solutions, formulate eight physical contradictions, and when eliminating these contradictions we get 16 engineering solutions, and then, analyzing the advantages and disadvantages of each solution, choose the optimal one.

The study of methods for solving engineering problems using the methods of technical creativity within the framework of the educational process proved that it is appropriate to consider both linear and subdivided schemes of obtaining solutions in order to allow students to compare their advantages and disadvantages. The experience shows that the students get the most interesting engineering solutions when using subdivided scheme.

ВИБРАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ МАСЛОУДЕРЖИВАЮЩИХ ЛУНОК НА ШЕЙКАХ ВАЛОВ

© 2015

А.А. Гордеев, инженер научно-исследовательского сектора
А.К. Кармалита, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Машины и аппараты»
А.И. Гордеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Хмельницкий национальный университет, Хмельницкий (Украина)

Ключевые слова: вибрационное оборудование; работоспособность узлов трения; нанесение лунок.

Аннотация: Одной из важнейших проблем современного машиностроения является разработка мероприятий и создание оборудования для повышения долговечности машин в условиях скоростных и жестко нагрузочных режимов эксплуатации. На сегодняшнее время задача обеспечения объемной прочности деталей при нормальных условиях работы считается практически решенной, поэтому на первое место выходит состояние поверхностного слоя, его износостойкость и условия смазки. Задача повышения маслоудерживающей способности трущихся поверхностей актуальна для машин различного назначения.

В статье приведены результаты анализа существующего оборудования для нанесения маслоудерживающих профилей и выявлены его недостатки. Предложена новая конструкция вибрационного оборудования, которое относится к технологии нанесения маслоудерживающих лунок на поверхностях скольжения с целью уменьшения сил трения и уменьшения износа внутренней поверхности втулки подшипника скольжения и может быть использовано в различных отраслях машиностроительного комплекса. Разработано экспериментальное оборудование, измерительная аппаратура и методика проведения исследований. Изготовлены образцы пар трения для проведения сравнительных исследований. Проведены исследования работоспособности узлов трения без лунок и с лунками на шейках валов методом оценки величины пятна изнашивания внутренней поверхности втулки. Предложенная конструкция вибрационного оборудования для нанесения маслоудерживающих лунок на шейках валов за счет использования возвратного клапана дает возможность повысить скорость струи и, соответственно, силу удара металлических шариков. Увеличение частоты колебаний позволит повысить производительность операции нанесения маслоудерживающего профиля. Проведенные исследования показали работоспособность предложенного оборудования и снижение износа пары трения.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть затрат на обслуживание и ремонт оснащения легкой промышленности, а именно разнообразных скоростных швейных машин, связана с изнашиванием узлов трения. Например, главный вал машины 51 кл. ОЗЛМ установлен в подшипниках скольжения. Во время пусков и остановок имеет место наибольший износ. Одной из главных причин непропорционально большого износа во время пуска есть то, что режим смазки узлов трения при этом принципиально отличается от режима смазки узлов при нормальных оборотах двигателя. Это приводит к недостаточной смазке, а в некоторых случаях – к задирам поверхности [1–3]. Главный вывод в анализе причин высокого пускового износа состоит в несовершенстве смазывания поверхностей, которое, как правило, предельное, полусухое или смешанное. Уменьшения пускового износа возможно, главным образом, за счет улучшения условий смазки в пусковой период [4–6]. Одним из высокоэффективных и технологически несложных способов решения задачи повышения маслоудерживающей способности поверхностей является формирование системы смазочных канавок с использованием специального оборудования [7–9].

Для улучшения условий смазки одним из направленных было создание определенного микрорельефа на поверхностях скольжения, а именно на внутренней поверхности подшипника [10–12]. Для повышения долговечности деталей машин при трении и изнашивании на их поверхность дополнительно наносят разные маслоудерживающие микро- и макрорельефы [13–15]. Чем

надежнее содержится смазочный материал между контактирующими деталями, тем меньше они изнашиваются. Профиль поверхности играет здесь главную роль. Созданные при обработке канавки на поверхности выполняют функцию резервуаров для удержания и распределения масла. Вопрос, связанный с созданием регулярного рельефа, детально изучен в работах [16; 17] и других авторов. Полученные при этом канавки выполняют функцию смазочных карманов, которые оказывают содействие удержанию и распределению масла в зоне трения и, таким образом, повышению износостойкости соединения в целом. Маслоудерживающие канавки, как правило, изменяют геометрию поверхности материалов и, соответственно, несущую площадь контакта при взаимодействии с другими поверхностями. Форма и размеры канавок определяются технологией их получения [11; 12]. Обобщая результаты многих исследований износостойкости поверхностей с регулярным рельефом, можно наметить определенные рекомендации относительно приведенных выше параметров. Лучшие результаты дают поперечные канавки относительно направления перемещения, поскольку в этом случае обеспечиваются более благоприятные условия для смазывания, и в целом поверхность имеет большую несущую способность в сравнении с продольными канавками [11]. Для надежного удержания масла, обеспечения протекания его из канавки в зону контакта поверхностей, удаления загрязнений наилучшие результаты дают канавки круглой формы. Одним из высокоэффективных и технологически несложных способов решения задачи повышения маслоудерживающей

способности поверхностей является формирование системы смазочных канавок с использованием специального оборудования. Известна установка [18], которая содержит ванну, сопло, распределительную сетку, вибрационный привод имеет возможность подавать порциями жидкость и металлические шарики к поверхности, которая обрабатывается.

Недостаток такого оборудования есть невысокая сила удара шариков, а повышение силы удара, соответственно, ведет к увеличению глубины лунки, которая является актуальной для твердых материалов. А также увеличение производительности процесса зависит от повышения скорости струи, которая, соответственно, зависит от частоты пульсации жидкости сквозь насадку. Экспериментально подтверждено, что увеличение частоты колебаний ведет к повышению скорости жидкости в насадке. Однако при втягивании жидкости сквозь насадку в камеру пульсации с большой скоростью происходит возникновение кавитационных газовых пузырьков, которые, в свою очередь, уменьшают объем жидкости, которая втягивается в камеру пульсации, и соответственно, при сжатии такой смеси выталкивается ее меньший объем и с меньшей скоростью.

Целью работы является подтверждение работоспособности предложенного вибрационного оборудования для нанесения лунок круглой формы сравнительными экспериментальными исследованиями по времени изнашивания подшипниковой пары скольжения без лунок и с маслостойкими лунками.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложена конструкция вибрационного оборудования [19] для нанесения маслостойких лунок на шейках валов, которая состоит из ванны, установленной на камеру пульсаций, мембраны, которая соединена с вибрационным приводом. В ванне размещена насадка с соплом, разделительная сетка. На корпусе оборудования с целью вращения изделия установлены опорные и вращающий ролик с приводом. Особенность конструкции вибрационного оборудования – использование обратного клапана, который каналами соединяет ванну с камерой пульсации и с каналом насадка, а его проходной диаметр выполнен согласно зависимости:

$$D_k = (0,5 - 0,8)d_n,$$

где D_k – проходной диаметр обратного клапана;

d_n – внутренний диаметр насадка на выходе.

Таким образом, за период движения мембраны вниз открывается клапан, и необходимая порция жидкости втягивается сквозь насадку и клапан с меньшей скоростью без возникновения кавитационных газовых пузырьков. Благодаря их отсутствию не возникает демпфирующий эффект.

При движении мембраны вверх клапан закрывается, и жидкость выбрасывается сквозь насадку, увлекая рабочие тела – шарики с большей скоростью жидкости, чем при всасывании. Применение обратного клапана также позволяет повысить частоту колебаний мембраны. Конструкция вибрационного оборудования для на-

несения маслостойких лунок на шейках валов показана на рис. 1.

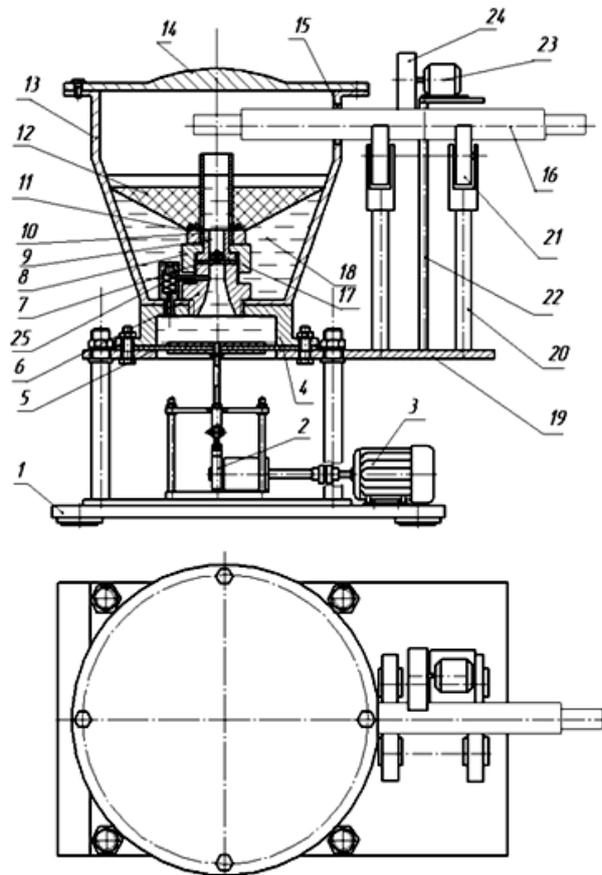


Рис. 1. Общий вид вибрационного оборудования для нанесения маслостойких лунок

Вибрационное оборудование работает следующим образом: на распределительную сетку 12 засыпаются металлические шарики 17. В ванну 13 заливается рабочая жидкость. В отверстие с резиновым кольцом 15 устанавливается обрабатываемое изделие 16. Включение привода 3 приводит вибратор 2 в действие и создается возвратно-поступательное движение мембраны 5. При ходе мембраны 5 вниз жидкость засасывается в камеру пульсации 4 через сетку 7, канал 6 и отверстие клапана 25. Металлические шарики 17 падают в сопло 9 сквозь отверстия в трубке 10. При ходе мембраны вверх возникает избыточное давление жидкости, которое образует струю, благодаря которой металлические шарики 17 выбрасываются сквозь трубку 10 на изделие 16. При дальнейшей работе вибратора 2 цикл повторяется и таким образом осуществляется обработка изделия 16. Мотор-редуктор вращает изделие в опорных 21 и приводных роликах 24 для образования маслостойких лунок по всей поверхности шейки изделия. Частота вращения изделия зависит от частоты колебания привода, определяется из условия расстояния между лунками до 1 мм и находится по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D},$$

где V – линейная скорость поверхности изделия, м/мин (от 1,2 м/мин до 2 м/мин.);

D – диаметр шейки изделия, мм.

Предложенная конструкция вибрационного оборудования для нанесения маслоудерживающих лунок на шейках валов дает возможность повысить силу удара металлических шариков (за счет использования обратного клапана) и поднять производительность операции нанесения маслоудерживающего профиля за счет увеличения частоты колебаний [19; 20].

Для подтверждения работоспособности оборудования для нанесения смазочных лунок были проведены сравнительные испытания маслоудерживающей способности разных поверхностей. Для испытаний использовалась специальная установка трения, созданная на базе станка ТП401, представленная на рис. 2.



Рис. 2. Фотография станка ТП40-1 с узлом трения

Предварительно были проведены исследования по определению оптимальных режимов работы привода установки и даны рекомендации по выбору конструктивных параметров насадка [21].

Для проведения экспериментальных исследований работоспособности узлов трения без лунок и с лунками были изготовлены образцы для исследований: втулка подшипника скольжения из бронзы ОЦС 4-4-17, втулка и контртело из стали Ст. 40. Втулка и оправка с контртелом и нанесенными лунками показаны на рис. 3. Смазочный материал (ЦИАТИМ) наносился на поверхность образца однократным смазыванием. Испытания проводились до полного изнашивания смазывающего слоя. Маслоудерживающие лунки наносились по следующей методике. Контртело устанавливалось на оправку и закреплялось гайкой. Потом оправка устанавливалась в отверстие в корпусе ванны, чтобы контртело находилось напротив среза трубки 10.

После включения установки и вывода ее на рабочие параметры проводилась обработка стальными закаленными шариками 2 мм. Включался привод вращения оправки. Время обработки составляло две минуты.

Далее были проведены серии экспериментов по исследованию величины изнашивания поверхности втулки подшипника (для пар трения без лунок и с лунками)

с целью оценки величины изнашивания поверхности втулки.

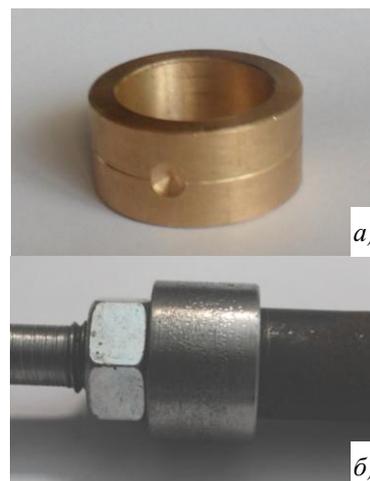


Рис. 3. Образцы исследуемых пар трения: а) бронзовая втулка; б) оправка сборная с контртелом

Контртело устанавливалось на шпиндель станка ТП40-1, а втулка – в специальную обойму на рычаге, который прижимает втулку с помощью пружины к контртелу (рис. 2).

Исследования проводились при следующих условиях: частота вращения шпинделя $n=1720$ об/мин. Время проведения опыта 15 минут, усилие прижима пружины $F=500$ Н.

На рис. 4 а показана фотография контртела без маслоудерживающих лунок и втулки после их изнашивания в паре трения. Следующая серия экспериментов проведена с втулкой подшипника и контртелом, на котором нанесены маслоудерживающие лунки. На рис. 4 б показана фотография втулки после их изнашивания в паре трения.

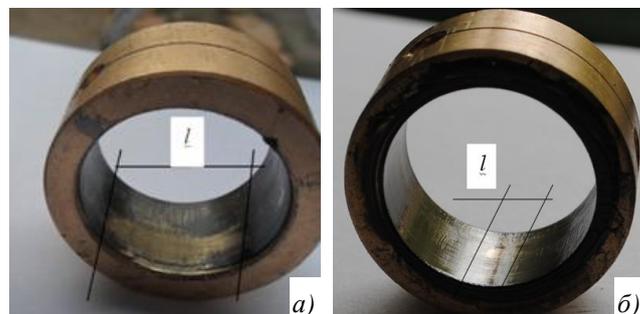


Рис. 4. Фотография втулки подшипника с указанием длины l пятна изнашивания пар трения : а – без лунок; б – с лунками

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В результате испытаний, проведенных на износ, из визуального анализа (рис. 4) установлено, что длина и величина пятна изнашивания втулки подшипника в случае с контртелом, на котором нанесены

маслоудерживающие лунки, значительно меньше, чем без лунок. Это говорит о повышении работоспособности такой пары трения, то есть условия смазки более благоприятны и периодичность смазывания таких узлов будет намного больше, чем для узлов без маслоудерживающих лунок.

Это поясняется как большей маслоскостью представленного профиля, так и уменьшением истечения масла через боковые грани образца из маслоудерживающих лунок, так как боковые скосы сферического профиля лунки оказывают содействие образованию и сохранению гидродинамического смазывающего клина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкцию вибрационной установки можно использовать для технологии нанесения маслоудерживающих лунок на шейках валов малых диаметров (до 10 мм), используемых в легкой промышленности, приборостроении и других отраслях машиностроения.

Проведенные исследования показали работоспособность предложенного оборудования, и дальнейшие исследования могут быть направлены на создание методики проектирования и конструирования предложенного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диха О.В., Баннов Г.М., Диха М.О. Анализ умов роботи та покращення працездатності роторного вузла турбокомпресора ТКР-11Н // Проблеми трибології. 2007. № 2. С. 114–121.
2. Елизаветин М.А. Повышение надежности машин. М.: Машиностроение, 1968. 271 с.
3. Сулов А.Г., Браун З.Д., Виткевич Н.А. Качество машин. В 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
4. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.
5. Шнейдер Ю.Г., Кравцов А.А. Влияние микрорельефа поверхностей на силы трения // Вестник машиностроения. 1968. № 9. С. 48–54.
6. Харламов Ю.А. Инженерия поверхности и развитие современного машиностроения // Тяжелое машиностроение. 2001. № 2. С. 2–7.
7. Антонюк В.С., Вовк В.Д., Возненко В.В. Спосіб виготовлення поверхонь тертя : патент України № 77321, опубл. 15.11.2006.
8. Антонюк В.С., Вовк В.Д., Возненко В.В. Пристрій для обробки поверхонь тертя деталей : патент України № 79026, заявл. 10.06.2005, опубл. 10.05.2007.
9. Диха О.В., Чумаков О.П., Диха М.О. Спосіб формування зносостійкої циліндричної металевої поверхні : патент України № 63800, заявл. 28.02.2011, опубл. 25.10.2011.
10. Сорокатый Р.В., Писаренко В.Г., Дыха М.А. Анализ особенностей формообразования поверхности износа подшипников скольжения при перекосе осей вала и втулки // Трение и износ. 2013. Том 34. № 4. С. 362–370.
11. Бабак О.П., Кузьменко А.Г., Пасечник А.А. Повышение износостойкости трибосопряжений путем формирования маслоудерживающего профиля // Ві-

12. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Киев: Наук. думка, 1984. 271 с.
13. Возненко В.В. Підвищення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь пари тертя // Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування. 2003. Вип. 26. С. 73–81.
14. Возненко В.В. Обґрунтування параметрів дискретно-орієнтованих поверхонь деталей пар тертя // Високі технології в машинобудуванні. 2005. № 2. С. 74–83.
15. Афтаназів І.С., Гаврик А.П., Киричок П.О., Мельничук П.П., Третько В.В. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. Житомир: ЖІТІ, 2001. 516 с.
16. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.
17. Дыха А.В., Бабак О.П. Повышение несущей способности подшипника скольжения с маслоудерживающими канавками // Проблеми трибології. 1997. № 1. С. 25–27.
18. Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Лаврентьєв О.Б. Пристрій для гідродробоструменевого зміцнення виробів : патент України на корисну модель № 38450, заяв. 18.11.2000, опубл. 15.04.2001.
19. Скиба М.Є., Кармаліта А.К., Гордєєв О.А. Вібраційний пристрій для нанесення маслоутримуючих лунок на шийках валів : патент України на корисну модель № 81625, заяв. 13.12.2012, опубл. 10.07.2013.
20. Гордєєв О.А., Кармаліта А.К. Технологія та вібраційне обладнання для нанесення маслоутримуючих лунок на поверхні ковзання // Materiali VIII miedzynarodowej naucowi-practicznej konferencji «NAUKA I INOWACJA – 2012». Vol. 21. Techniczne nauki. Przemysl: Nauka I studia, 2012. С. 9–11.
21. Гордєєв О.А., Кармаліта А.К., Гордєєв А.І. Особливості проектування конструкцій деталей вібраційного обладнання для нанесення маслоутримуючих лунок на вузлах тертя // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2013. № 3. С. 47–52.

REFERENCES

1. Dykha O.V., Bannov G.M., Dykha M.O. Analysis of working conditions and improvement of working capacity of ТКР-11Н turbo-compressor rotor unit. *Problemy tribologii*, 2007, no. 2, pp. 114–121.
2. Elizavetin M.A. *Povyshenie nadezhnosti mashin* [Improvement of machines durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968, 271 p.
3. Suslov A.G., Braun Z.D., Vitkevich N.A. *Kachestvo mashin* [Quality of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995, vol. 1, 256 p.
4. Shneyder Yu.G. *Ekspluatatsionnie svoystva detaley s regulyarnim mikroeffektom* [Operational properties of parts with regular microrelief]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 248 p.
5. Shneyder Yu.G., Kravtsov A.A. Influence of surface microrelief on the friction forces. *Vestnik mashinostroeniya*, 1968, no. 9, pp. 48–54.

6. Kharlamov Yu.A. Surface engineering and development of modern machine-building. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2001, no. 2, pp. 2–7.
7. Antonyuk V.S., Vovk V.D., Voznenko V.V. *Sposib vivotovlennya poverkhon' tertya* [Method of production of friction surfaces]. Patent Ukraine no. 77321, 2006. (In Ukrainian).
8. Antonyuk V.S., Vovk V.D., Voznenko V.V. *Pristriy dlya obrobki poverkhon' tertya detaley* [Device for treatment of the parts friction surfaces]. Patent Ukraine no. 79026, 2005. (In Ukrainian).
9. Dykha O.V., Chumakov O.P., Dykha M.O. *Sposib formuvannya znosostiykoy tsilindrichnoy metalevoy poverkhni* [Method of forming of wear-resistant cylindrical metal surface]. Patent Ukraine no. 63800, 2011. (In Ukrainian).
10. Sorokaty R.V., Pisarenko V.G., Dykha M.A. The analysis of features of the wear form of the surface of sliding bearings at the distortion of axes of the shaft and bushing. *Trenie i iznos*, 2013, vol. 34, no. 4, pp. 362–370.
11. Babak O.P., Kuzmenko A.G., Pasechnik A.A. Increase of wear resistance of tribocouplings by using formation of oil-retaining profile. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta Podolya*, 2002, no. 4, part 1, pp. 7–12.
12. Ryzhov E.V. *Tekhnologicheskie metody povysheniya iznosostoykosti detaley mashin* [Technology methods of increase of machine parts wear resistance]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1984, 271 p.
13. Voznenko V.V. Increase of operational properties of working surfaces of friction couples. *Visnik NTUU "KPI". Priladobuduvannya*, 2003, no. 26, pp. 73–81.
14. Voznenko V.V. Objectives of parameters of discrete-oriented surfaces of the friction couples parts. *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni*, 2005, no. 2, pp. 74–83.
15. Aftanaziv I.S., Gavrik A.P., Kirichok P.O., Melnichuk P.P., Tret'ko V.V. *Pidvishchennya nadiynosti detaley mashin poverkhnevym plastichnim deformuvanniam* [Reliability improvement of machine parts with surface plastic deformation]. Zhitomir, ZhITI Publ., 2001, 516 p.
16. Odintsov L.G. *Finishnaya obrabotka detaley almaznym vyglazhivaniem i vibrovyglazhivaniem* [Mechanical polishing of parts with diamond and vibration smoothing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 160 p.
17. Dykha A.V., Babak O.P. Improvement of carrying capacity of friction bearing with oil-retaining grooves. *Problemy tribologii*, 1997, no. 1, pp. 25–27.
18. Silin P.I., Gordeev A.I., Lavrentyev O.B. *Pristriy dlya gidrodobrostrumenevogo zmitsnennya virobiv* [Device for hydroblast strengthening of products]. Patent Ukraine no. 38450, 2000. (In Ukrainian).
19. Skiba M.E., Karmalita A.K., Gordeev O.A. *Vibratsiyniy pristriy dlya nanesennya masloutrimuyuchikh lunok na shiykakh valiv* [Vibration device for applying of oil-retaining holes on the spindle wheels]. Patent Ukraine no. 81625, 13.12.2012. (In Ukrainian).
20. Gordeev O.A., Karmalita A.K. Technology and vibration equipment for applying of oil-retaining holes on the sliding surface. *Materiali VIII miedzynarodowej naucowi-practicznej konferencji "NAUKA I INOWACJA – 2012". Vol. 21. Techniczne nauki*. Przemysl, Nauka I studia, 2012, pp. 9–11.
21. Gordeev O.A., Karmalita A.K., Gordeev A.I. Design features of equipment construction of vibration units for applying of oil-keeping holes in friction. *Vestnik Khmelnytskogo natsionalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 3, pp. 47–52.

VIBRATION EQUIPMENT FOR APPLYING OF OIL-RETAINING HOLES ON THE STUB SHAFTS

© 2015

A.A. Gordeev, engineer of scientific research department

A.K. Karmalita, PhD (Engineering), Professor, Professor of Chair “Machines and apparatus”

A.I. Gordeev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of Chair “Engineering technology”

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi (Ukraine)

Keywords: vibration equipment; working capacity of friction units; applying of holes.

Abstract: One of the main issues of modern manufacturing engineering is the development of actions and creation of equipment for machine durability improvement within the speed range and hard loading operational modes. For today, the task of provision of the parts bulk strength under the ordinary working conditions is considered to be nearly resolved. That is why the surface layer state, its wear resistance and lubricating conditions are of great importance now. The task of improvement of oil-retaining property of sliding surfaces is essential for machines of various purposes.

The paper presents the results of analysis of existing equipment for oil-retaining profiles applying and determines its weak points. The authors offered new design of vibration equipment referred to the technology of applying of oil-retaining holes on the sliding surfaces in order to decrease the friction forces and the wear of inner surface of friction bearing bush, and can be used in various branches of machine-building complex. The authors developed experimental equipment, measuring equipment and the research technique. To carry out comparative study the samples of friction couples were created. The authors carried out the study of working capacity of friction units without holes and with holes on the stub shafts using the method of assessment of size of inner bush surface wear scar. Proposed design of vibration equipment for applying of oil-retaining holes on the stub shafts allows increasing flow rate and, consequently, the metal balls impact force due to the use of inverted valve. The increase of vibration frequency will make it possible to increase the efficiency of the process of oil-retaining profile applying. The study proved the working capacity of suggested equipment and showed the decrease of friction couple wear.

О СВЯЗИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗАНИИ

© 2015

А.В. Гусев, инженер кафедры «Технологии машиностроения»

В.В. Закураев, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения»

Новоуральский технологический институт,

филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Новоуральск (Россия)

А.Г. Ничков, доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»

Уральский Федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург (Россия)

Ключевые слова: токарная обработка; процесс стружкообразования; режимы резания; деформационные параметры процесса резания; спектральные характеристики; амплитудно-частотные характеристики вибросигналов.

Аннотация: Задача выбора оптимального режима резания является одной из обязательных при создании технологии механической обработки. При оптимальных режимах механической обработки должны существовать определенные физические условия (или совокупность условий) в технологической системе резания, обеспечивающие эту оптимальность. Под физическими условиями в данном случае понимается: деформационные процессы стружкообразования и их связь с физико-механическими характеристиками материалов при высокоскоростном пластическом деформировании; уровни и динамические характеристики самой технологической системы; результаты вибрационного взаимодействия элементов системы с деформационными процессами.

При установлении определенных соответствий между перечисленными факторами возникает возможность создания системы контроля процесса механической обработки. Определяющим фактором в разработке системы контроля являются результаты изучения процесса стружкообразования.

Данная работа посвящена исследованию деформационных процессов стружкообразования для последующего создания системы автоматизированного выбора эффективных режимов резания. В данной работе изучаются микрофотографии шлифов корней стружек, а также шлифы самих стружек. Результаты изучения этих фотографий позволяют построить схему формирования отдельных фрагментов локальных объемов стружки. Представлена модель стружкообразования с параллельными границами. В работе также изучались фотографии стружек и их деформационные характеристики, полученные при обработке различных материалов в достаточно широком диапазоне режимов резания. Представлена схема к модели деформационного цикла при стружкообразовании. Установлена корреляционная связь размеров пластически деформируемой зоны и времени деформационного цикла. Проведен численный эксперимент по изучению влияния скорости резания и рабочей подачи на изменение частоты стружкообразования. Данные исследования являются основой для создания системы автоматизированного определения оптимальных режимов токарной обработки.

ВВЕДЕНИЕ

Недостатком существующей нормативной базы по режимам резания является эмпирический характер данных, на основе которых принимаются параметры режима резания. Это существенно затрудняет возможности создания надежных алгоритмов работы систем контроля процесса резания и управления режимами работы металлорежущих станков [1].

Цель данной работы – выявление связи деформационных параметров процесса стружкообразования с характеристиками вибросигналов при резании материалов.

Известно, что при стружкообразовании формируется характерная структура стружек (морфология), анализ которых должен дать некий ответ на образование условий возникновения рациональных режимов механической обработки [2–7]. Для решения задачи построения модели процесса стружкообразования и выбора возможного варианта физического критерия, ответственного (или более информативного) за обрабатываемость материала, необходимо понимание особенностей направленной деформации и разрушения, которое является основой процесса резания.

Прежде всего для условий резания характерно: малый, неточно ограниченный объем материала, подвергающийся внешнему воздействию; высокие относи-

тельные деформации и скорости деформации; высокие градиенты температур и напряжений; непостоянство условий внешних воздействий и, как правило, очень малые отрезки времени для осуществления термомеханического разупрочнения (динамического возврата, «отдыха» материала).

Сложность процессов деформации при резании с учетом многоуровневого характера структурных преобразований на микро-, мезо-, макроуровне, высоких удельных энергетических затрат и потоков энергии в различных структурных элементах материала и самой технологической системе резания предполагает использование для описания и анализа указанных процессов обобщенных физических характеристик [8; 9].

Анализ известных работ по вопросам стружкообразования, как отечественных ученых: М.И. Клушина [10], В.А. Кудинова [11], В.С. Кушнера [12], Кабалдина [13] и др. [14–17], так и зарубежных авторов: Блэка [18], а также фирмы – производителя инструмента SECO [19] и др., указывает на два важных аспекта проблемы стружкообразования. Первый аспект заключается в необходимости учета термомеханических условий напряженно-деформационного состояния зоны резания. Эти условия характеризуются температурами, напряжениями сдвига локальных объемов материала, а также контактными напряжениями и температурами на передней

поверхности лезвия. Второй – это цикличность процесса стружкообразования (периодически повторяющийся деформационный цикл).

Исходя из целей данной работы, выполнены исследования процесса, раскрывающие некоторые положения физической модели стружкообразования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ

Для исследования процесса стружкообразования принята известная модель стружкообразования с параллельными границами (рис. 1). Особенностью данной модели является образование дискретных элементов стружек толщиной Δx , соответствующих периодам сдвиговых деформаций. Величина Δx зависит от свойств обрабатываемого материала, режимов резания (прежде всего от толщины срезаемого слоя и скорости резания), геометрических параметров лезвий. Элемент Δx является макроэлементом диссипативной структуры (текстуры образующейся стружки) и может быть измерен.

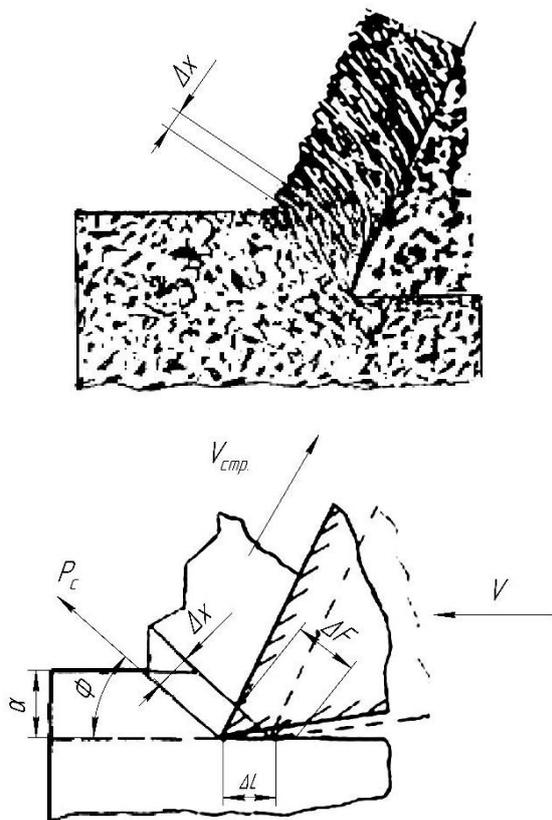
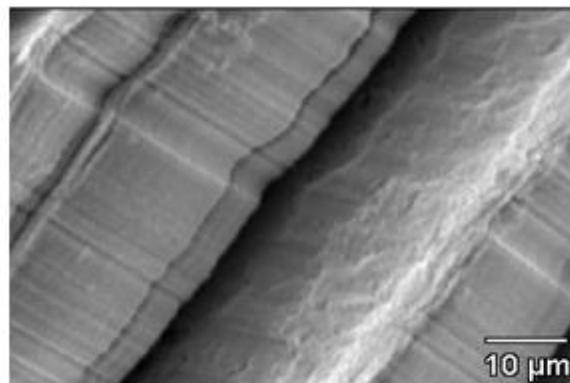


Рис. 1. Корень стружки и геометрическая модель стружкообразования при резании пластичных материалов;

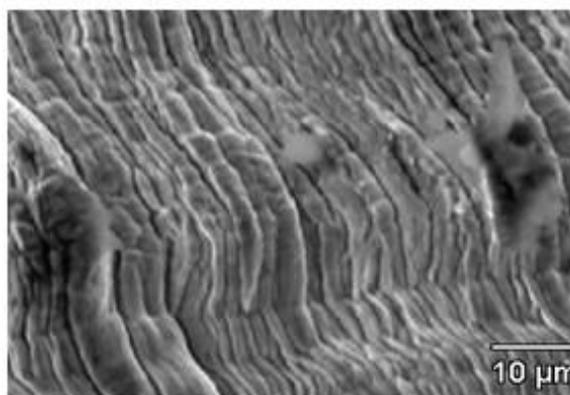
V – скорость резания, $V_{стр.}$ – скорость схода стружки, P_c – сила сдвига, a – толщина срезаемого слоя; Φ – угол схода стружки; ΔL – перемещение лезвия в направлении скорости резания; ΔF – абсолютный сдвиг; Δx – толщина элемента стружки

Изучение процесса стружкообразования производилось различными методами [20]. Традиционно при этом используются микрофотографии шлифов корней стружек, а также шлифы самих стружек. Данные этих фото-

графий позволяют построить схему формирования отдельных фрагментов локальных объемов стружки. В данной работе изучены фотографии стружек, полученные при резании различных материалов в достаточно широком диапазоне режимов резания. На рис. 2 показаны фотографии стружек, полученных на электронном микроскопе.



а)



б)

Рис. 2. Фотографии стружек, полученных на электронном микроскопе при 2000-кратном увеличении:
а) стружка, полученная при резании при скорости $V=0,47$ м/с и подаче $S=0,21$;
б) стружка, полученная при резании при подаче $S=0,11$ и скорости $V=2,97$ м/с

На фотографиях поверхностей стружек, противоположных прирезцовою стороне, отчетливо наблюдается характер сдвиговых деформаций в виде чередующихся выступов и впадин. Следует отметить различный шаг пилообразных выступов при изменении скорости резания и подачи. На крупных пилообразных выступах просматриваются выступы с более мелким шагом. Величина шага мелких выступов практически остается постоянной при изменении скорости резания или подачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные данные микроанализа позволяют представить процесс циклического деформирования локальных объемов стружки. Предлагаемая схема деформационного цикла к модели стружкообразования

пластичных материалов в процессе лезвийной обработки представлена на рис. 3.

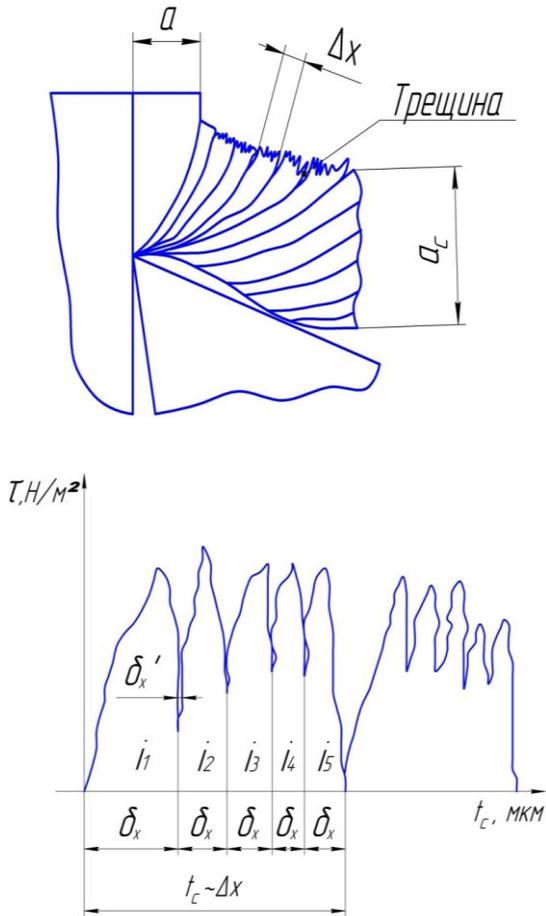


Рис. 3. Схема к модели деформационного цикла при стружкообразовании: δx – элементы стружки, соответствующие циклу образования условной плоскости сдвига; $\delta x'$ – размеры условной плоскости сдвига; Δx – элементы стружки, соответствующие неустойчивости сдвиговых деформаций; a – толщина

По оси абсцисс – время t_c деформационного цикла, по оси ординат напряжение – τ_c . Поскольку время сдвига $t_c = \Delta F / V_c = \epsilon \Delta x / V_c$ и допуская, что скорость сдвига локального объема материала (V_c) постоянна, как и относительная деформация (ϵ), можно полагать, что время последовательного прохождения сдвигов пропорционально величине пластически деформируемой зоны – Δx , т. е. $t_c = f(\Delta x)$.

Величина Δx соответствует расстоянию между крупными выступами, просматриваемыми на фотографиях (рис. 2). Величины δx (самые мелкие ступеньки) соответствуют времени образования условной плоскости сдвига. Величина $\delta x'$ соответствует размерам условной плоскости сдвига (по Блэку [18]). Это поверхности, в пределах которых происходит пластический сдвиг материала. На основании этих представлений деформационный цикл представляется как процесс образования квазидискретного элемента стружки в несколько шагов. На каждом шаге формируется условная

плоскость сдвига δx , через некоторое количество – i таких шагов возникает элемент Δx , образование которого заканчивается потерей устойчивости деформационного процесса. На каждом шаге:

$$\Delta x = (\delta x + \delta' x) i.$$

В следующий момент времени описанный деформационный цикл повторяется. По оси ординат показано изменение напряжения сдвига (напряжение динамического сдвига по Блэку) в соответствии с характером изменения текстуры стружек. Напряжение сдвига τ_c является суммой напряжений сдвига, обусловленного тепловым механизмом катастрофического разупрочнения (плоскость сдвига) и напряжением сдвига нетеплового происхождения, связанного с упруго-пластическим деформированием материала.

Таким образом, размер Δx будет определяться величиной δx и числом i , образующихся δx в пределах Δx . Учитывая, что величина δx соответствует циклу образования условной плоскости сдвига, остается практически неизменной для данного материала ($\delta x = 2,0 \div 3,5$ мкм), величина Δx в большей степени должна зависеть от количества образующихся плоскостей сдвига – i . Надо полагать, что в соответствии с принципами термомеханики величина δx и количество плоскостей (поверхностей) сдвига – i в пределах Δx будут зависеть от физико-механических свойств обрабатываемого материала, а именно: значений теплоемкости, теплопроводности, предела текучести, а также упругих модулей материала.

Отмеченное ранее постоянство размеров мелких ступенек (δx) на крупных выступах (Δx) можно рассматривать как условие стабилизации деформационного процесса при сливном стружкообразовании. Однако этот период заканчивается нарушением стабильного пластического сдвига и образованием фрагмента Δx . По нашему мнению, цикличность этого явления заложена в самой кинетической природе процесса стружкообразования. Для анализа указанного явления рассмотрим графики зависимости числа образующихся мелких ступенек $i = \Delta x / \delta x$ от изменения режимов резания. На рис. 4 показаны эти зависимости.

Приведенные данные свидетельствуют, что с ростом скорости резания (читай скорости деформации) количество мелких ступенек во фрагментах Δx снижаются в среднем от 100 до 50, то есть в два раза.

При изменении рабочей подачи количество мелких ступенек увеличивается от 20 до 180, то есть в шесть раз (стали 40ХН и 12Х18Н10Т). Таким образом, на различных режимах резания количество локальных сдвиговых деформаций в каждом пилообразном выступе различно.

Уменьшение числа ступенек или их увеличение обусловлено тем, что в результате рассеивания энергии деформации локальные объемы толщиной δx на разных режимах получают различную долю этой энергии в единицу времени.

Так, с ростом скорости резания удельная мощность деформации увеличивается, что приводит и к росту температуры в локальных объемах формирующихся крупных ступенек размерами Δx . Это обеспечивает снижение времени сдвига материала.

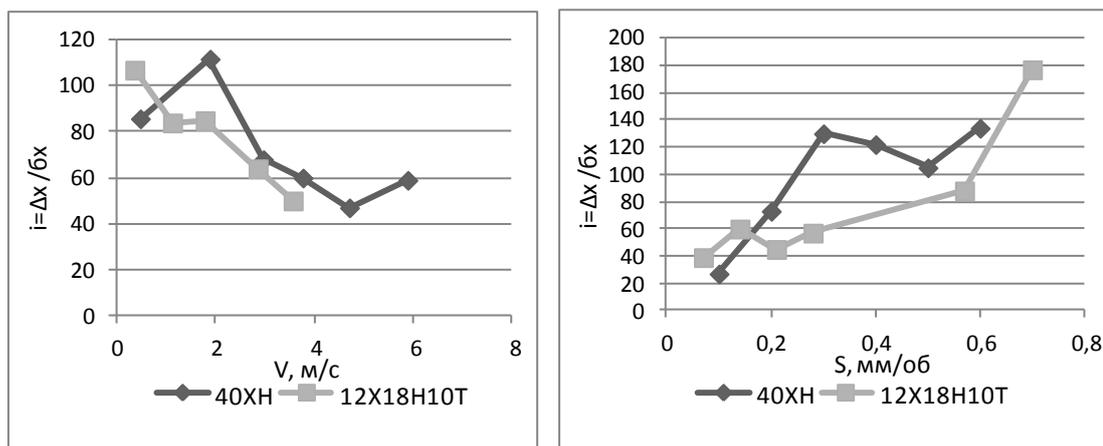


Рис. 4. Графики зависимостей числа образующихся мелких ступенек $i = \Delta x / \delta x$ от изменения скорости резания (а) и рабочей подачи (б)

С ростом толщины срезаемого слоя (a) увеличиваются объемы материала, подвергаемые деформации. При одних и тех же размерах δx удельная мощность деформации будет меньше, так как объем материала в зоне первичной деформации больше. Это является причиной того, что размеры Δx увеличиваются.

Ранее показано, что в соответствии с механикой процесса стружкообразования время сдвига $t_c = f(\Delta x)$, а частота сдвиговых деформаций $f_c = 1/t_c$, эта частота также является функцией размера Δx , т. е. $f_c = f'(\Delta x)$.

Описываемые выше условия протекания процесса стружкообразования должны отражаться на изменении «мгновенных» сил резания – P_b , порождаемых изменением деформационных характеристик стружкообразования. При этом амплитудные значения «мгновенных» сил резания также должны быть связаны с величинами Δx и δx . Это обстоятельство позволяет вести косвенное измерение параметров циклического процесса: амплитудно-частотных или спектральных характеристик колебательного процесса. С другой стороны, возможно установление корреляционной связи между термомеханическими условиями стружкообразования и измеряемыми параметрами колебательных процессов при резании. Нам представляется, что это одна из главных задач для создания методики контроля процесса стружкообразования.

Хорошо известно соотношение, связывающее частоту стружкообразования (частоту сдвиговых деформаций) с величиной Δx :

$$f_c = \frac{10^3 \cdot V}{K_a \cdot \Delta x}.$$

Во-первых, это соотношение напрямую устанавливает связь f_c с величиной Δx . Во-вторых, частота сдвиговых деформаций пропорциональна скорости резания и обратно пропорциональна коэффициенту утолщения стружки (усадки) – K_a . Следует заметить, что и параметр Δx , и усадка стружки – K_a характеризуют всего лишь геометрические показатели параметров стружки. В то же время известно, что коэффициент усадки стружки характеризует степень деформации срезаемого

слоя, а значит, косвенно связан с термомеханическими условиями процесса стружкообразования.

На рис. 5 приведены зависимости изменения скорости деформации ($\dot{\epsilon}$) и частоты образования сдвигов элементов стружки (f_c) от скорости резания.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные говорят о следующем: 1) увеличение частоты (f_c) сдвиговых деформаций соответствует увеличению скорости деформации ($\dot{\epsilon}$); 2) диапазоны изменения частоты сдвиговых деформаций существенно зависят от свойств обрабатываемых материалов; 3) частоты f_c , как и скорость деформации ($\dot{\epsilon}$), нелинейно зависят от изменения скорости резания; 4) исходя из целей данной работы, следует отметить, что частота сдвиговых деформаций в установленном диапазоне их измерения от 1000 до 80000 Гц может быть измерена современными техническими средствами.

Таким образом, стружкообразование при резании пластичных материалов – процесс дискретного сдвига локальных объемов материала (рис. 1). Сдвиг при стружкообразовании (момент устойчивого нарушения сплошности материала) осуществляют в результате образования критической фрагментированной неоднородной структуры материала [21]. Неоднородность процесса фрагментации материала обусловлена неоднородностью рассеивания подводимой механической энергии. Как правило, при стружкообразовании преобладают механизмы ротационной пластичности, и формирующаяся текстура стружки возникает путем поворотов (разворотов) локальных макрообъемов материала. Наши исследования показывают, что сдвиг и поворот локальных макрообъемов (элементов) энергетически «выгоднее» осуществляется при одинаковых размерах сторон этих элементов [22]. В соответствии с механикой процесса стружкообразования сдвиги образующихся дискретных элементов стружки размером Δx порождают частоту процесса изменения «мгновенных» сил резания. При этом амплитудные значения «мгновенных» сил резания должны быть связаны с размерами Δx . На рис. 6 приведены такие данные, указывающие на корреляционную связь размеров Δx и времени t_c – времени деформационного цикла.

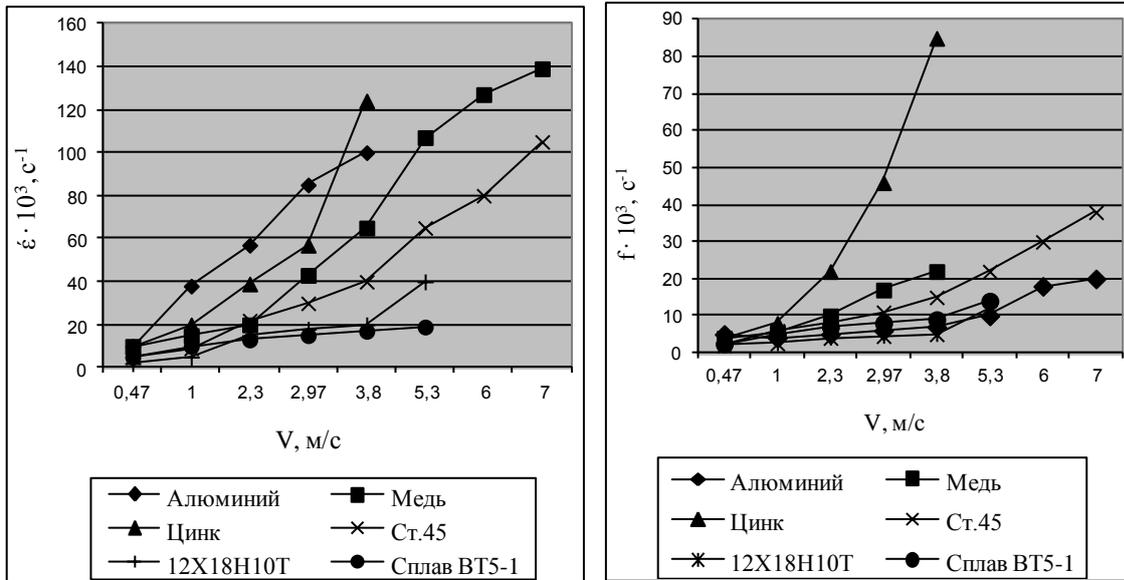


Рис. 5. Зависимости изменения скорости деформации ($\dot{\epsilon}$) и частоты образования сдвигов элементов стружки (f_c) от скорости резания

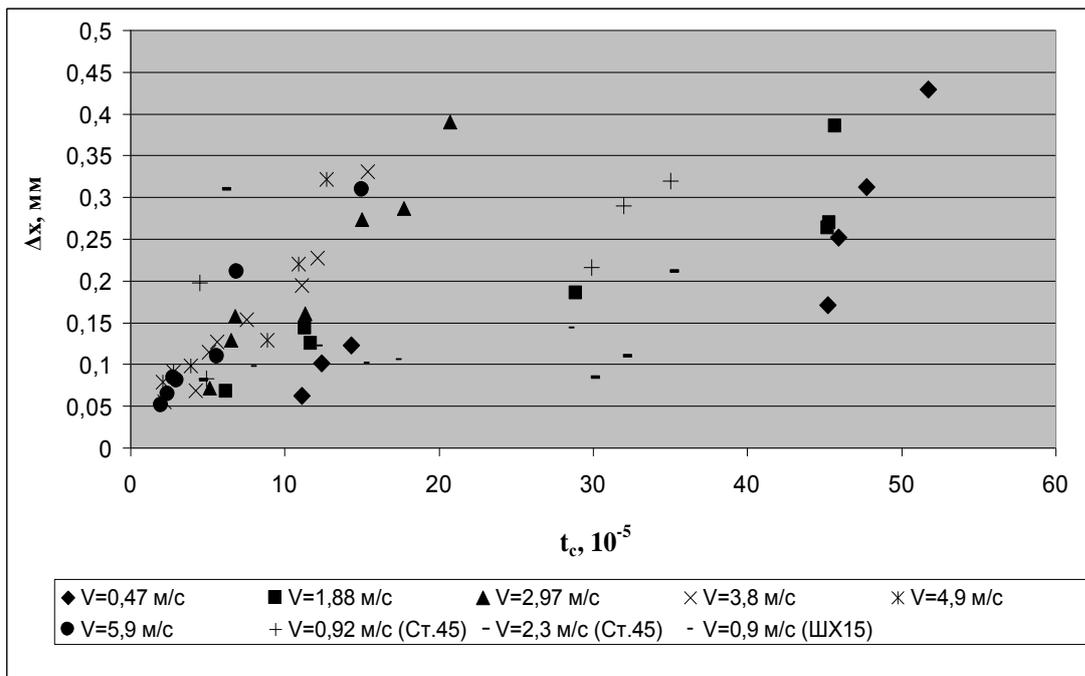


Рис. 6. Изменение толщины элементов стружек Δx от времени прохождения сдвиговых деформаций (времени деформационного цикла)

Цикличность деформационного процесса дает основания к описанию этого процесса методами вероятностного анализа случайных процессов и поведения динамических систем при случайных воздействиях [23; 24]. Исходными данными для определения спектральных характеристик процесса стружкообразования являются результаты измерений параметров стружек.

На рис. 7 представлены гистограммы распределения значений Δx .

Из вышеизложенного следует, что при перемещении режущего лезвия величина и продолжительность дей-

ствия импульсов сил, являющихся результатом деформации локальных объемов материала, будут событиями случайными, следовательно, и функция воздействия на элементы динамической системы (ДС) носит случайный характер, а амплитуды вибросигналов будут случайными величинами [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате изучения микрошлифов, фотографий шлифов стружек, а также самих стружек, с учетом имеющихся в литературе данных по проблемам

стружкообразования, предложена схема деформационного цикла к модели стружкообразования при лезвийной обработке.

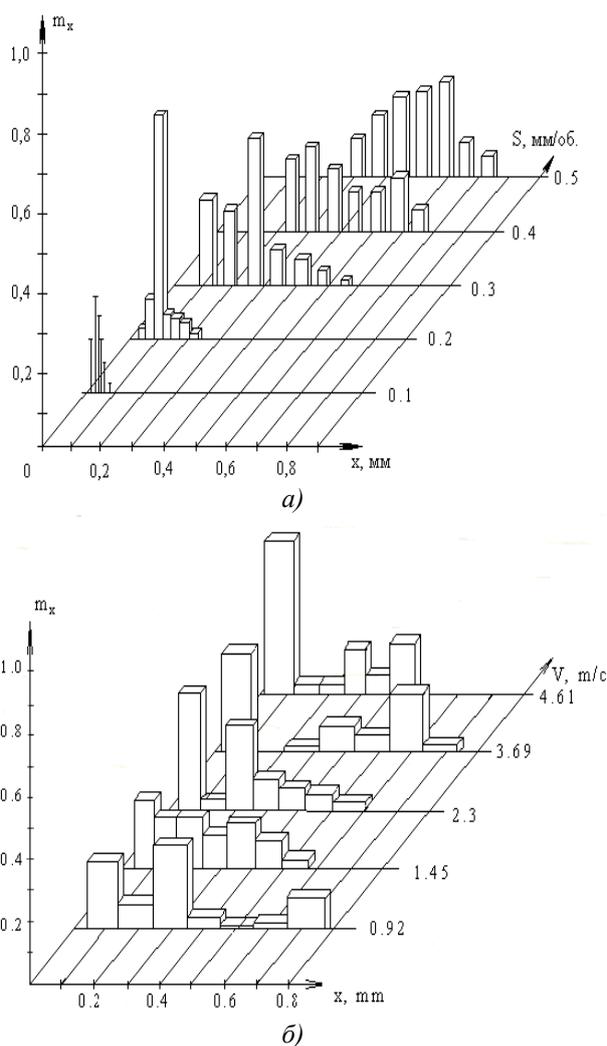


Рис. 7. Распределение величины Δx от изменения рабочей подачи (а) и от изменения скорости резания (б)

2. Установлено, что формирующиеся дискретные сдвиги материала стружки следует считать элементами пространственно-временной структуры. Это процесс, развивающийся во времени в результате деформации и отрыва материала припуска. Показано, что чередование теплового механизма сдвиговых деформаций (катастрофического разупрочнения) и деформаций нетеплового происхождения (по Блэку) является результатом неоднородного рассеяния подводимой к материалу энергии, обусловленного образованием тепловых волн в деформируемых объемах материала, их распространением и затуханием.

3. Обнаружено, что количество мелких ступенек (Δx), образующихся в пределах крупных выступов – Δx при изменении скорости резания и толщины срезаемого слоя, обусловлено различной величиной энергии, «заканчиваемой» в материал в единицу времени.

4. Указанные выше условия создают циклический характер деформационного процесса стружкообразования. Результатом этого является возникно-

вание колебательных явлений в технологической системе.

5. Установлено, что уровень и характер колебаний с достаточной степенью точности измеряется современными техническими средствами. Это обстоятельство позволяет вести косвенное измерение параметров циклического процесса (деформационного цикла), его амплитудно-частотные и спектральные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технологические проблемы в современном машиностроительном производстве: сб. науч. трудов. М.: МГТУ «Станкин», 1998. 240 с.
2. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.
3. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 368 с.
4. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов. М.: Машгиз, 1956. 319 с.
5. Закураев В.В. Термодинамические характеристики обрабатываемости и управление режимом резания // Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения: труды междунар. конф. Орел: ОГТУ, 2000. С. 147–150.
6. Петрушин С.И., Проскоков А.В. Теория несвободного резания материалов. Стружкообразование с развитой зоной пластических деформаций // Вестник машиностроения. 2010. № 1. С. 53–58.
7. Кабалдин Ю.Г., Муравьев С.Н. Информационные модели структурообразования и усталостного разрушения металлических материалов // Вестник машиностроения. 2007. № 8. С. 46–51.
8. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
9. Закураев В.В. Результаты исследования физических закономерностей процесса стружкообразования при резании материалов // Механика и процессы управления. Т. 3. Проблемы машиностроения: Труды XXXIV Уральского семинара по механике и процессам управления. Екатеринбург: УРО РАН, 2004. С. 95–108.
10. Клушин М.И. Резание металлов. М.: Машгиз, 1958. 454 с.
11. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 357 с.
12. Верещака А.С. Резание материалов. М.: Высш. шк., 2009. 535 с.
13. Кабалдин Ю.Г. Динамическая модель процесса резания // Вестник машиностроения. 2001. № 8. С. 33–38.
14. Розенберг Ю.А. Основные закономерности процесса образования элементной стружки // Вестник машиностроения. 2008. № 8. С. 53–55.
15. Воронцов А.Л., Султан-заде Н.М., Албагачиев А.Ю., Савкин А.Ю. Разработка новой теории тепловых процессов резания // Вестник машиностроения. 2010. № 1. С. 70–73.
16. Легаев В.П., Генералов Л.К. Повышение эффективности токарной обработки на основе автоматического контроля показателей процесса резания // Вестник машиностроения. 2011. № 1. С. 44–46.
17. Талантов Н.В. Температурно-деформационная неустойчивость процесса пластического деформирования

- ния при обработке металлов резанием // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 4. С. 31–36.
18. Black J.T. Flow stress model in metal cutting // *Journal of engineering for industry*. 1979. Vol. 101. № 4. P. 403–415.
 19. Stahl J.E. *Metal cutting – theories and models*. Sweden: Seco, 2012. 580 p.
 20. Гусев А.В. Обоснование возможности контроля процесса механической обработки // *Машиностроение – традиции и инновации: сб. трудов Всерос. молодежной конф. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2011. С. 195–198.*
 21. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
 22. Гусев А.В., Закураев В.В. Способ определения оптимальных режимов резания : патент РФ № 2514251, заяв. № 2012131289/02 от 20.07.2012, опуб. 27.04.2014.
 23. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
 24. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
 25. Гусев А.В. Диагностика процесса стружкообразования на основе спектрального анализа вибросигналов // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке: сб. материалов III Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. Ижевск: ИжГТУ, 2015. С. 872–876.*
- REFERENCES**
1. *Tekhnologicheskie problemy v sovremennom mashinostroitelnom proizvodstve. Sbornik nauchnikh trudov* [Technological problems in the modern machinery production]. Moscow, MGTU “Stankin” Publ., 1998, 240 p.
 2. Trent E.M. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 263 p.
 3. Zorev N.N. *Voprosy mekhaniki protsessa rezaniya metallov* [Issues of metal cutting process mechanics]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956, 368 p.
 4. Rozenberg A.M. *Elementy teorii protsessa rezaniya metallov* [Accidence of theory of metal cutting process]. Moscow, Mashgiz Publ., 1956, 319 p.
 5. Zakuraev V.V. Thermodynamic characteristics of machinability and cutting modes control. *Trudy mezhdunar. konf. “Fundamentalnie i prikladnie problemy tekhnologii mashinostroeniya”*. Orel, OGTU Publ., 2000, pp. 147–150.
 6. Petrushin S.I., Proskokov A.V. Theory of constrained cutting: Chip formation with a developed plastic-deformation zone. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 45–50.
 7. Kabaldin Yu.G., Muravyev S.N. Information models of structure formation and fatigue failure of metal materials. *Vestnik mashinostroeniya*, 2007, no. 8, pp. 46–51.
 8. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Foundations of theory of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 344 p.
 9. Zakuraev V.V. The results of study of physical regularities of chip formation process during cutting materials. *Trudy XXXIV Uralskogo seminar po mekhanike i protsessam upravleniya “Mekhanika i protsessy upravleniya. Tom 3. Problemy mashinostroeniya”*. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2004, pp. 95–108.
 10. Klushin M.I. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Mashgiz Publ., 1958, 454 p.
 11. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Machine-tools dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967, 357 p.
 12. Vereshchaka A.S. *Rezanie materialov* [Materials cutting]. М.: Высш. шк., 2009. 535 с.
 13. Kabaldin Yu.G. Dynamic model of cutting process. *Vestnik mashinostroeniya*, 2001, no. 8, pp. 33–38.
 14. Rozenberg Yu.A. Basic regularities of the elemental chip forming process. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 8, pp. 53–55.
 15. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Y., Savkin A.I. Development of a new theory of thermal cutting processes 1. Basic principles. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 64–66.
 16. Legaev V.P., Generalov L.K. More efficient lathe operation on the basis of automatic monitoring of the cutting parameters. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 1, pp. 31–33.
 17. Talantov N.V. Temperature-deformation instability of the process of plastic deformation when processing metals by cutting. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 1985, no. 4, pp. 31–36.
 18. Black J.T. Flow stress model in metal cutting. *Journal of engineering for industry*, 1979, vol. 101, no. 4, pp. 403–415.
 19. Stahl J.E. *Metal cutting – theories and models*. Sweden, Seco, 2012, 580 p.
 20. Gusev A.V. Substantiation of possibility of control of mechanical treatment process. *Sbornik trudov Vseros. molodezhnoy konf. “Mashinostroenie – traditsii i innovatsii”*. Tomsk, Tomsky politekhnicheskyy universitet Publ., 2011, pp. 195–198.
 21. Rybin V.V. *Bolshie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformations and failure of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 224 p.
 22. Gusev A.V., Zakuraev V.V. *Sposob opredeleniya optimalnikh rezhimov rezaniya* [Method of determination of optimal cutting modes]. Patent RF no. 2514251, 2012.
 23. Bendat J.S., Piersol A.G. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannykh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989, 540 p.
 24. Bendat J.S., Piersol A.G. *Primeneniya korrelyatsionnogo i spektralnogo analiza* [Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis]. Moscow, Mir Publ., 1983, 312 p.
 25. Gusev A.V. Diagnostics of chip formation process on the basis of spectral analysis of vibration signals. *Sbornik materialov III Vseros. nauch.-tekhn. konf. aspirantov, magistrantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem “Molodye uchenye – uskoreniyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke”*. Izhevsk, IzhGTU Publ., 2015, pp. 872–876.

**ABOUT ASSOCIATION OF DEFORMATION PARAMETERS OF CHIP FORMATION
AND CHARACTERISTICS OF FLUCTUATIONS DURING CUTTING**

© 2015

A. V. Gusev, engineer of Chair “Technologies of mechanical engineering”

V. V. Zakuraev, PhD (Engineering), Head of Chair “Technologies of mechanical engineering”

Novouralsk institute of technology, branch of National Research Nuclear University “MEPhI”, Novouralsk (Russia)

A. G. Nichkov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Metal cutting machines and tools”

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg (Russia)

Keywords: turning; chip formation process; cutting modes; deformation parameters of cutting process; spectral characteristics; amplitude-frequency characteristics of vibration signals.

Abstract: The issue of optimal cutting mode selection is one of the essential issues when creating mechanical technology. Certain physical conditions (or set of conditions) should exist within technological cutting system in case of the optimal machining modes and provide this optimality. In this case, the deformation processes of chip formation and their relation with materials physical and mechanical characteristics during high-speed plastic deformation; the levels and dynamic characteristics of the most technological system; and the results of vibration interaction of system elements with deformation processes are considered to be physical conditions.

The possibility of creation of machining process monitoring system occurs when determining certain correlations between the listed factors, there is a. The results of study of the chip formation process are the determining factor within the development of control system.

This paper covers the study of chip formation deformation processes for the subsequent creation of a system of automated selection of effective cutting modes. The present paper studies the micro-photos of chip roots specimens. The results of these photos study allow constructing the scheme of formation of separate fragments of local chip volumes. The paper presents the chip formation model with parallel borders. The authors also studied the photos of chips and their deformation characteristics received while processing various materials with a wide range of cutting modes. The paper gives the scheme for model of deformation cycle during chip formation. The authors determined the correlation relationship of plastic zone sizes and the time of deformation cycle. Numerical experiment was carried out to study the influence of cutting velocity and cutting feed on the change of chip formation frequency. This study is the basis for creation of a system of automated determination of the optimal turning modes.

СВАРКА ТРУБ С СИЛИКАТНО-ЭМАЛЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ

© 2015

А.И. Ковтунов, доктор технических наук,

профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

Н.С. Алексеев, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»*Д.И. Плехотный*, аспирант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»*О.В. Танасов*, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

Ключевые слова: дуговая сварка; силикатно-эмалевое покрытие; электродная проволока; цветные металлы; сварочная ванна; структура шва.

Аннотация: Трубы с силикатно-эмалевым покрытием широко применяются в теплоэнергетике, химическом и нефтехимическом машиностроении, в нефтедобыче и транспортировании нефти. Трубы с внутренним силикатно-эмалевым покрытием рекомендуются нормативной документацией для строительства систем пожаротушения резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Надежность эксплуатации трубопроводов определяется коррозионной стойкостью внутренней поверхности сварного соединения. При сварке трубопроводов с силикатно-эмалевым покрытием в зоне термического влияния в результате высокотемпературного воздействия происходит выгорание, испарение эмали, а также образования пор, пузырьков, макро-, микротрещин.

Для снижения теплового воздействия на силикатно-эмалевое покрытие предложено заменить стальную основу шва на сплавы цветных металлов с более низкой температурой плавления. В качестве таких металлов с учетом температуры плавления выбраны цинк, медь и сплавы на основе меди, никель и сплавы на основе никеля.

Проведенные испытания механических свойств сварных соединений показали целесообразность применения в качестве электродного материала при механизированной сварке труб с внутренним силикатно-эмалевым покрытием сплавов на основе меди и никеля. При применении указанных электродных материалов механические свойства сварных соединений находятся на уровне, который обеспечивается при сварке стальной электродной проволокой Св-08Г2С.

Анализ состояния и химического состава силикатно-эмалевого покрытия подтвердил эффективность применения электродных материалов на основе кремнистой бронзы CuSi3 . Механизированная сварка с использованием электродной проволоки CuSi3 обеспечила минимальное разрушение и изменение химического состава силикатно-эмалевого покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Высокие требования, предъявляемые к долговечности и надежности эксплуатируемых трубопроводных систем, определяют необходимость обеспечения высокоэффективной антикоррозионной защиты труб и их сварных соединений.

Одним из наиболее эффективных способов антикоррозионной защиты труб является заводское нанесение антикоррозионных покрытий. В качестве таких покрытий достаточно широко используются эмали. Применение эмалей для защиты внутренней поверхности труб в теплоэнергетике, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, а также изделий химического машиностроения продлевает срок их службы в 4...5 раз [1].

Трубы с внутренним силикатно-эмалевым покрытием рекомендуются нормативной документацией для строительства систем пожаротушения резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов.

Коррозионная надежность трубопроводов системы пожаротушения резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов из эмалированных труб определяется коррозионной стойкостью внутренней поверхности сварного соединения. При сварке трубопроводов обратный вал шва не имеет защитного покрытия, и кроме того, в зоне термического влияния в результате высокотемпературного воздействия происходит выгорание, испарение эмали, а также образование пор, пузырьков, макро-, микротрещин [2–4].

Для создания защитного покрытия на обратной стороне шва применяется сварка по слою фритты, которую предварительно наносят на торцы эмалированной трубы или сварку с применением эмалированной втулки (манжеты). С целью повышения коррозионной стойкости обратной стороны шва рекомендуется для сварки труб применять высоколегированные коррозионно-стойкие электроды [2].

Для уменьшения разрушения эмали рекомендуется процесс сварки проводить с минимальным тепловым воздействием на эмаль [5–9]. Это реализуется при сварке на минимальном токе, а также, по мнению ряда исследователей [5], обеспечить приемлемые тепловые условия в сварном соединении без ущерба для его качества можно путем использования пульсирующих термических циклов по типу приведенных в работе [6]. Такие условия нагрева и охлаждения могут обеспечить импульсно-дуговая сварка [6; 7] дугой постоянной мощности с колебаниями электрода [8] и сварка многослойными швами [9]. Несмотря на преимущества последнего варианта, высокотемпературное воздействие на эмаль не устраняется и остается необходимость защиты обратной стороны шва от коррозии.

Поэтому предлагается кардинально изменить тепловые условия сварки, а точнее уменьшить температуру сварки до температуры выгорания эмали. Для этого необходимо заменить стальную основу шва на сплавы цветных металлов с более низкой температурой плавления.

В качестве таких материалов можно использовать цинк, медь, никель и сплавы на их основе [10–13]. Кроме того, перечисленные металлы и сплавы на их основе отличаются высокой коррозионной стойкостью в щелочных средах, к которым относится пенообразователь, применяемый в системах пожаротушения вертикальных резервуаров.

Таким образом, целью работы является снижение степени разрушения эмалевого покрытия труб при сварке за счет применения электродных или присадочных материалов из цветных металлов или сплавов с более низкой температурой плавления, чем стали.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения возможности применения указанных материалов в качестве присадочных или электродных при сварке труб с внутренним эмалевым покрытием была проведена серия экспериментов. Сварку труб диаметром 159 мм и толщиной 5 мм с внутренним силикатно-эмалевым покрытием КФ-90 проводили с использованием электродной проволоки Св-08Г2С, Св-04Х19Н9, М1, CuSi3, НП-2, Х20Н80, Ц1 диаметром 1,2 мм. Сварку выполняли на постоянном токе обратной полярности. При использовании электродной проволоки из цветных металлов или сплавов на их основе в качестве защитного газа применяли аргон, а при сварке стальной проволокой – CO₂. Для сварки использовали источник питания с подающим механизмом Megatronic BDH – 550. Напряжение в зависимости от состава проволоки составляло при сварке 15–26 В, скорость сварки 0,2–0,4 м/мин, а скорость подачи электродной проволоки в пределах 1,5–3 м/мин. Подготовка и сборка трубных образцов проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 16037-80. Образцы собирались и сваривались с помощью горизонтального вращателя. Кроме того, для оценки особенностей физико-химического взаимодействия эмалевого покрытия с электродным материалом проводили наплавку на плоские образцы с эмалевым покрытием без удаления эмали.

Механические свойства сварных соединений определяли путем испытаний на статическое растяжение плоских образцов (ГОСТ 6996-66).

Структура, элементный состав металла шва и эмалевого покрытия контролировались на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCA Energy-300 и рентгеновского волнового спектрометра INCA Wave-500.

Результаты и обсуждение результатов исследования

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования процессов сварки сталей с эмалевым покрытием с применением присадочных материалов из цветных металлов показали, что прочность сварных соединений с применением медной проволоки находилась в пределах 250 МПа, а относительное удлинение на уровне 27 % (рисунок 1). Повышение прочности и снижение пластичности металла шва по сравнению с механическими свойствами меди связано с легированием железом меди в процессе сварки [14]. При этом прочность металла шва при использовании стальной проволоки Св-08Г2С составили 300-400 МПа, а при использовании проволоки Св-04Х19Н9 временное сопротивление при растяжении доходило до 600 МПа. Значение относительного удлинения металла шва при использовании проволоки Св-08Г2С не превышало 30 %, а проволоки Св-04Х19Н9 – на уровне 35 %. Использование проволоки из кремнистой бронзы повысило прочность при растяжении до 350 МПа при относительном удлинении не выше 23 %.

Применение никеля значительно не повысило прочностных свойств сварных соединений. Прочность находилась на уровне 250–270 МПа, а относительное удлинение на уровне 27 %. Сварка электродной проволокой Х20Н80 позволила повысить прочность сварных соединений практически до 500 МПа. Пластичность при этом была ниже, чем при использовании никеля. Применение цинковой электродной проволоки обеспечило прочность сварного соединения не более 150 МПа.

Металлографические исследования и исследования химического состава металла шва и эмалированного покрытия показали, что при использовании электродной проволоки Св-08Г2С формируется феррито-перлитная структура металла шва. Содержание железа в металле шва изменяется в пределах 97,25–97,64 %, кремния – 0,74–0,85 %, марганца – 1,43–1,73 %. На границе контакта эмалевого покрытия с металлом сварочной ванны покрытие оплавляется. В покрытии видны поры и трещины, появившиеся в результате теплового воздействия на эмалевое покрытие (рисунок 2, таблица 1). В составе покрытия повышенное содержание оксидов железа.

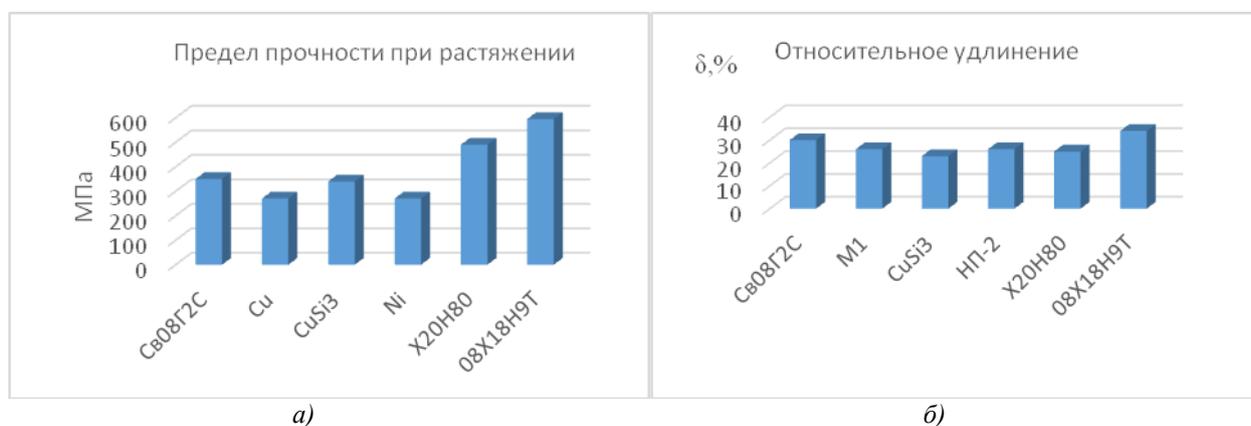


Рис. 1. Механические свойства сварных соединений труб с эмалевым покрытием: а) предел прочности при растяжении; б) относительное удлинение

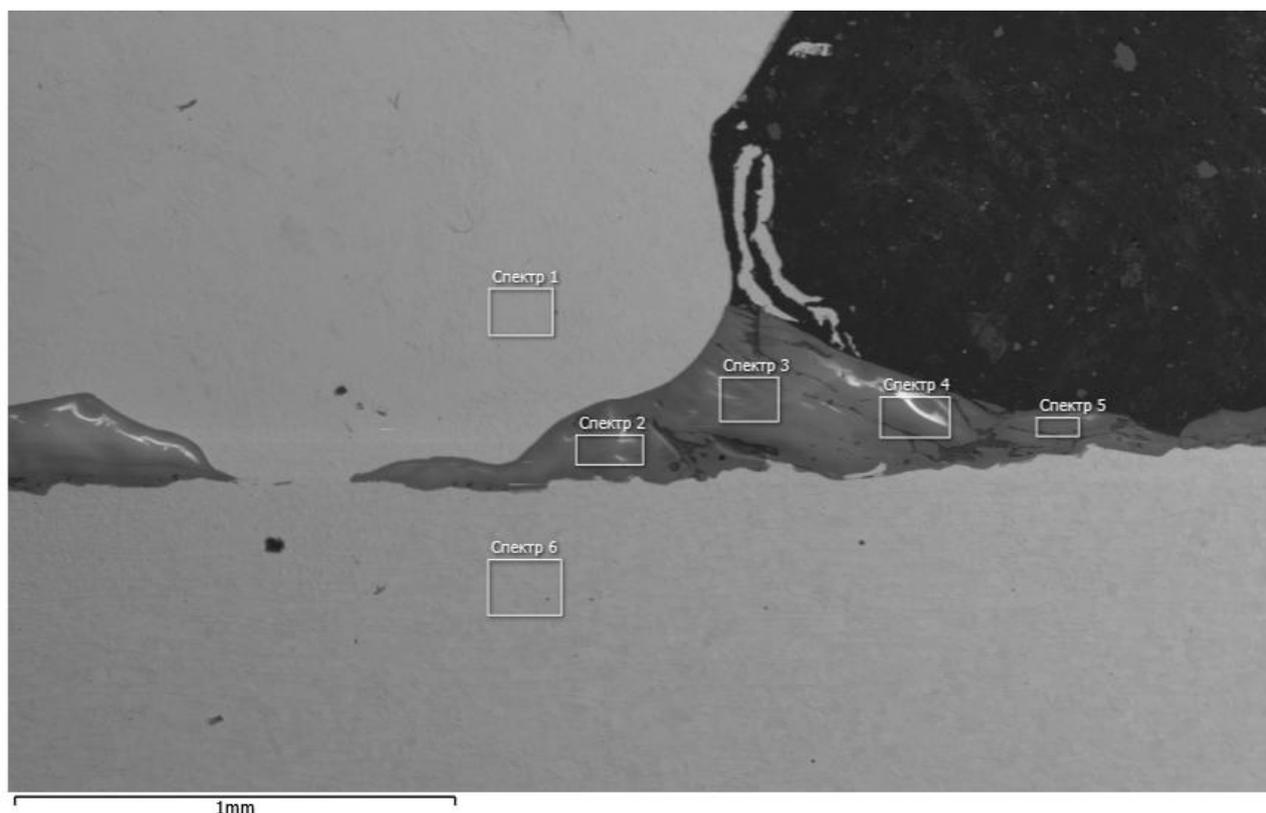


Рис. 2. Граница взаимодействия расплавленного металла и эмалевого покрытия при использовании электродной проволоки Св-08Г2С

Таблица 1. Химический состав металла и эмалевого покрытия

Название спектра	В	О	Na	Mg	Al	Si	К	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Сумма
Спектр 1						0,86				1,66	97,48		100,00
Спектр 2	13,63	51,86	6,89		0,72	18,83	0,90	2,28	1,48	2,13	1,28		100,00
Спектр 3		61,79	8,79		0,87	20,96	0,63	1,75	1,08	3,16	0,97		100,00
Спектр 4	20,42	50,72	6,99	0,20	0,94	15,68	0,87	1,80	1,24	0,56	0,37	0,21	100,00
Спектр 5		58,52	10,04	0,26	1,63	22,42	1,25	2,63	1,72	0,68	0,57	0,26	100,00
Спектр 6					0,14	0,70				1,52	97,64		100,00

Практически однофазная аустенитная структура формируется при сварке эмалированных труб с применением присадочной проволоки Св-04Х19Н9. При сварке проволокой Св-04Х19Н9 поведение эмалевого покрытия аналогично поведению при использовании проволоки Св-08Г2С. В зоне термического влияния вследствие высокотемпературного воздействия наблюдается разрушение эмалевого покрытия. В области, прилегающей к металлу шва, в покрытии присутствуют включения оксида железа и оксида хрома.

Применение никелевой электродной проволоки позволяет формировать металл шва на основе γ -фазы, представляющей твердый раствор железа в никеле [15]. Металл шва по сравнению с применением стальной проволоки содержит значительное количество пор размером до 0,2 мм. Повышенная пористость объясняется природной склонностью никелевых сплавов к газонасыщению [16].

Химический состав металла шва неоднороден. Содержание никеля уменьшается от центра к линии сплавления и от облицовочного слоя к корневому. Со-

держание железа по сечению металла шва изменяется противоположно. Содержание никеля находится в пределах 58,5–84,3 %, а железа – 15,7–40,5 %. В качестве технологических примесей наблюдается присутствие марганца, кремния. Содержание марганца составляет 0,3–0,6 %, кремния – 0,2–0,4 %.

Эмалевое покрытие при взаимодействии с расплавленным никелем частично оплавляется. Химический состав покрытия на линии сплавления изменяется, что можно видеть по карте распределения элементов. На границе сплавления в эмалевом покрытии пониженное соединение оксида кремния и титана. В составе покрытия появляются соединения железа и никеля, вероятно – оксиды (рисунок 3, таблица 2).

Применение электродной проволоки на основе сплава Х20Н80 объясняется стремлением к снижению температуры сварочной ванны и повышению механических свойств металла шва [17; 18]. Нихромы отличаются более низкой температурой плавления, чем никель [16; 19].

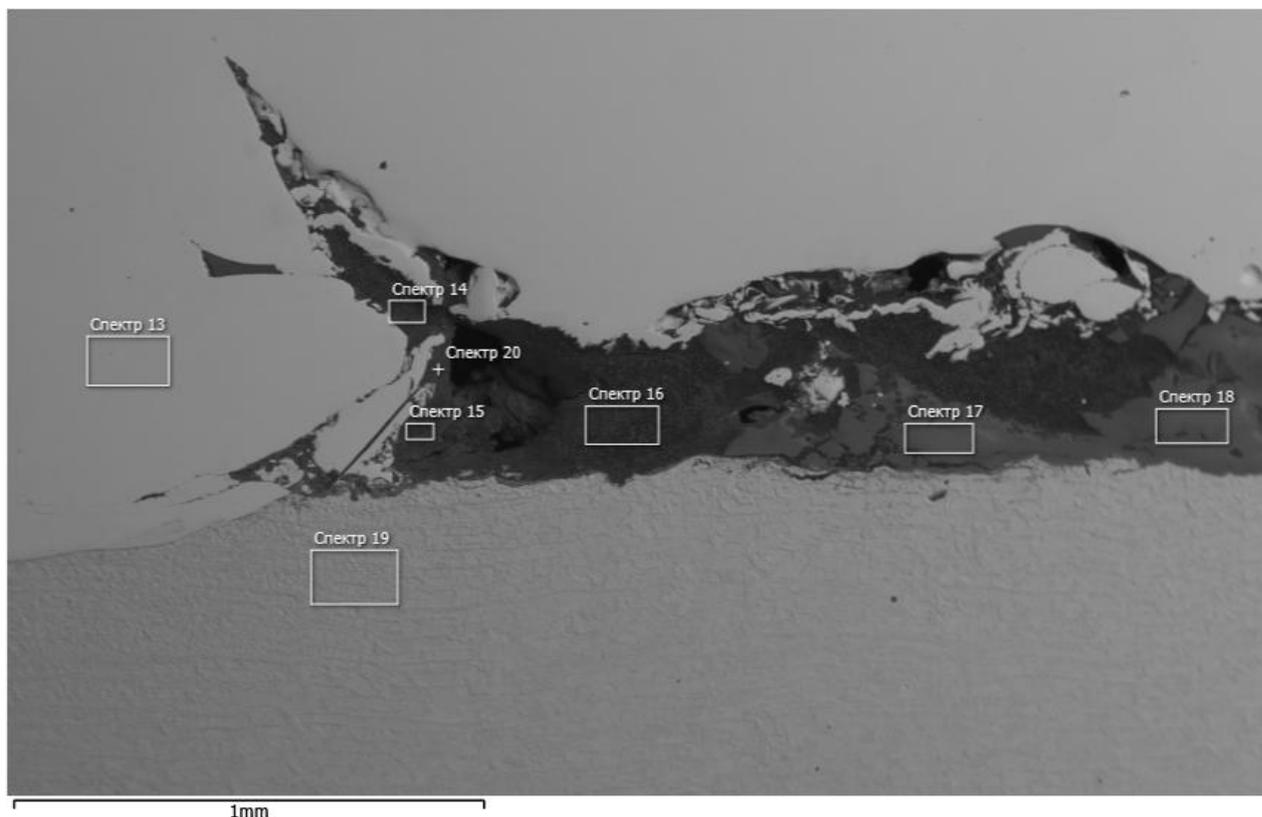


Рис. 3. Граница взаимодействия расплавленного металла и эмалевого покрытия при использовании электродной проволоки НП2

Таблица 2. Химический состав металла и эмалевого покрытия

Название спектра	B	C	O	Na	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe	Ni	Zn	W	Сумма
Спектр 13											99,61		0,39	100,00
Спектр 14		61,50	21,37		11,16	0,12				3,70	1,98	0,16		100,00
Спектр 15		63,62	23,82		0,31	0,30	0,35			8,78	2,37	0,45		100,00
Спектр 16		60,64	20,83		16,95					1,31	0,27			100,00
Спектр 17	8,24	15,18	50,99	6,54	1,28	14,25	1,53	1,06	0,46	0,24	0,24			100,00
Спектр 18	8,21	12,98	52,82	6,34	0,97	15,69	1,44	0,96	0,42		0,18			100,00
Спектр 19						0,68			1,52	97,80				100,00
Спектр 20		60,22	27,70		0,25	0,23	0,75			8,81	1,67	0,37		100,00

Структура металла шва при сварке проволокой Х20Н80 однофазная на никелевой основе. Содержание никеля от 40,8 % до 66,78 %, железа – 12,35–45 %, хрома – 19,73–12,2 %. Технологические примеси – кремний, марганец, а также встречается титан и алюминий, которые попадают в металл шва из нихромовой проволоки. Содержание кремния выше, чем в предыдущих случаях, что также является следствием применения нихрома.

Эмалевое покрытие при сварке с нихромом оплавляется. Покрытие, взаимодействующее с металлом, изменяет свой химический состав. Покрытие насыщается оксидами хрома, алюминия, титана, железа и никеля (рисунок 4, таблица 3).

Применение электродной проволоки на основе меди формирует двухфазную структуру металла шва. Матрица при этом представлена ε-фазой, являющейся твердым раствором железа в меди [15]. В матрице наблю-

даются включения α-фазы (твердого раствора меди в железе) [20]. Металл шва насыщен газовыми порами, что является следствием повышенной склонности меди к растворению водорода [16].

В облицовочном и заполняющих слоях содержание железа незначительное, не выше 3,56 %. В корне шва содержание железа повышается до 20 %. В качестве примесей в металле шва наблюдаются алюминий, марганец, кремний.

Эмалевое покрытие практически не разрушается. Отсутствует оплавление покрытия. Не наблюдается и химического взаимодействия эмалевого покрытия с металлом шва, так как химический состав эмалевого покрытия на основном металле и в зоне термического влияния практически не изменяется.

Применением электродной проволоки из кремниевой бронзы формируется шов с характерными 2 областями (рисунок 5). Облицовка и заполнение практически

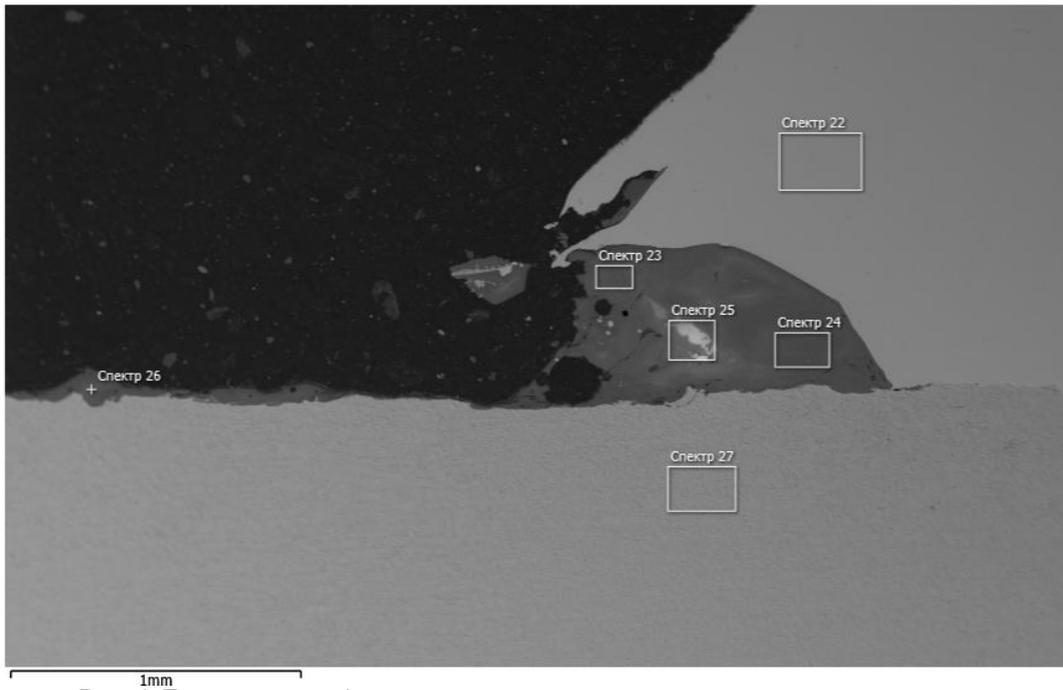


Рис. 4. Граница взаимодействия расплавленного металла и эмалевого покрытия при использовании электродной проволоки X20H80

Таблица 3. Химический состав металла и эмалевого покрытия

Название спектра	B	C	O	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Сумма
Спектр 22						1,23				19,65		10,93	68,18	100,00
Спектр 23		7,22	45,85	6,81	0,92	19,55	1,15	3,01	3,06	9,75	1,93	0,29	0,46	100,00
Спектр 24			46,65	7,23	1,09	22,59	1,15	3,61	3,64	13,43		0,34	0,27	100,00
Спектр 25			58,98	10,06	1,30	21,98		2,18	1,77	3,73				100,00
Спектр 26	17,3		50,92	7,44		18,35	1,17	2,31	1,70			0,81		100,00
Спектр 27						0,65					1,50	97,85		100,00

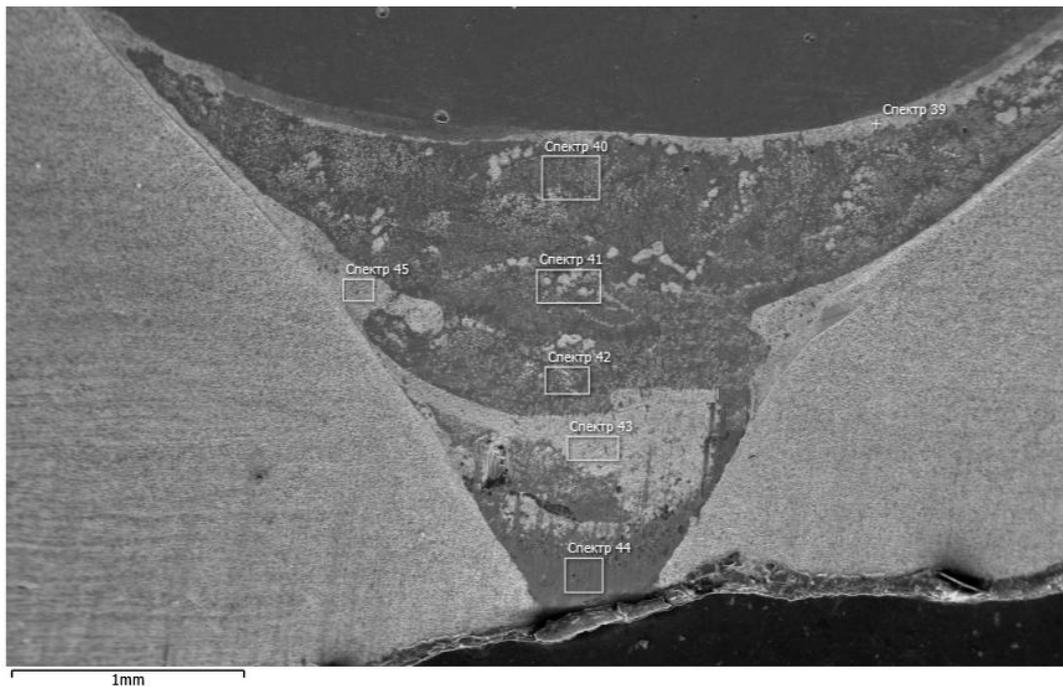


Рис. 5. Граница взаимодействия расплавленного металла и эмалевого покрытия при использовании электродной проволоки на основе меди

гомогенны по структуре (двухфазная). На основе медной матрицы наблюдаются включения твердого раствора на основе железа. Корень шва менее гомогенен. Из-за короткого времени существования жидкой фазы в медной матрице встречаются крупные включения железной фазы, не растворившейся в меди. Кремний не образует отдельную фазу, а растворяется в меди.

Содержание меди в металле шва при использовании проволоки из кремниевой бронзы находится в пределах 68,8–91,04 %, железа – 5,06–28,5 %. Распределение основных компонентов аналогично распределению при использовании медной электродной проволоки. В металле шва содержание кремния составляет 0,43–3,29 %. Эмалевое покрытие практически не разрушается. На карте распределения и в зоне термического влияния и на основном металле практически не изменяется цветовая гамма эмалевого покрытия (рисунок 5).

Радикальное снижение температуры сварочной ванны может быть достигнуто при применении в качестве электродной проволоки цинка. Однако низкая прочность сварных соединений ограничивает перспективу применения цинка. Химический и структурный анализ

металла шва показывает, что структура двухфазная. В цинковой матрице равномерно распределены включения равноосной или пластинчатой формы с максимальным размером не более 100 мкм. Исходя из диаграммы состояния, включения представлены фазой ζ [15; 20]. Содержание цинка по сечению шва изменяется в пределах 97,65–99,52 %.

Эмалевое покрытие практически не разрушается. Однако химический состав покрытия изменяется. В составе покрытия явно присутствуют оксиды цинка, что, вероятно, изменяет и свойства покрытий (рисунок 6, таблица 4).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали целесообразность применения для сварки труб с эмалевым покрытием электродной проволоки на основе кремниевой бронзы. Исследования коррозионной стойкости сварных соединений с применением кремниевой бронзы в растворе пенообразователя показали, что стойкость не ниже, чем при использовании образцов из аустенитной стали.

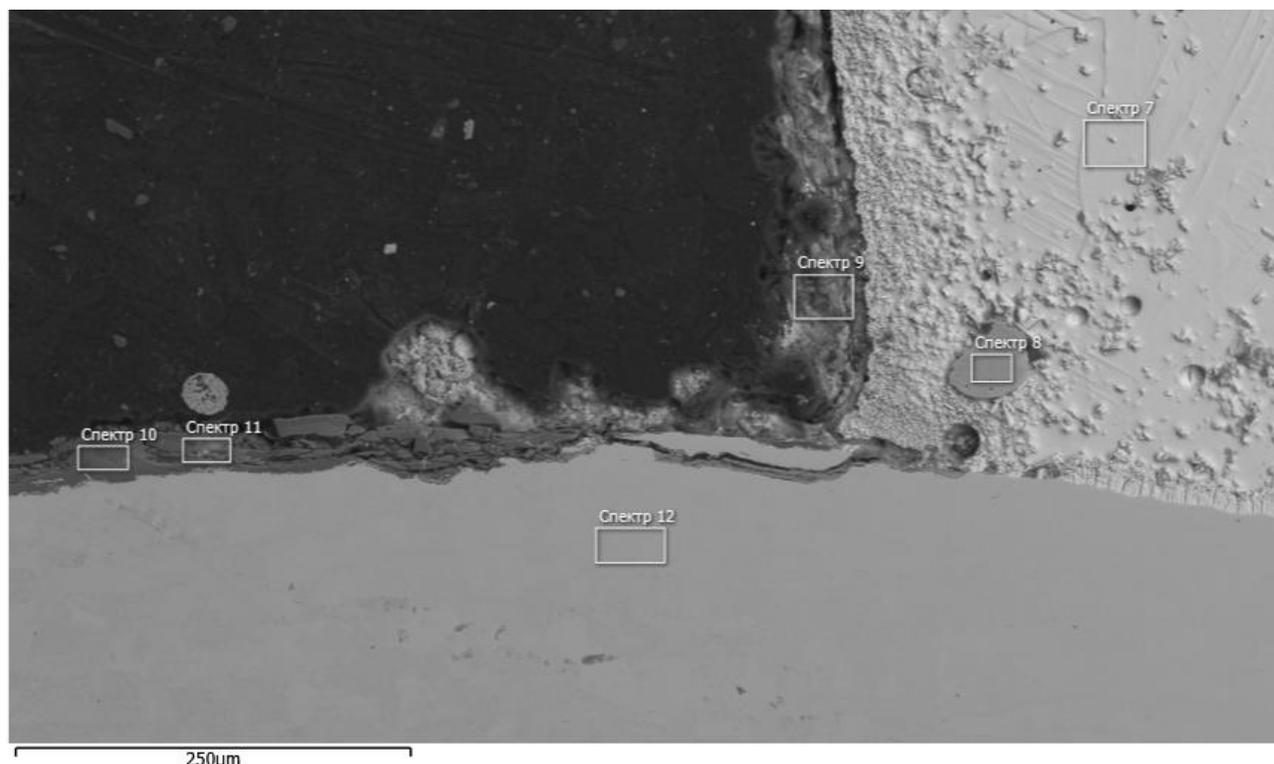


Рис. 6. Граница взаимодействия расплавленного металла и эмалевого покрытия при использовании электродной проволоки Ц1

Таблица 4. Химический состав металла и эмалевого покрытия

Название спектра	B	O	Na	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Сумма
Спектр 7										0,21			99,79	100,0
Спектр 8	7,89				17,77			11,67	5,73	45,56	3,20	3,41	2,53	100,0
Спектр 9		19,69	3,59		2,88					2,20			51,44	100,0
Спектр 10	12,23	49,05	6,00		23,58	1,15	1,91	1,46		4,62				100,0
Спектр 11		52,95	5,29	5,63	22,74	1,11	2,51	1,66	0,95	6,66			0,52	100,0
Спектр 12					0,65				1,44	97,91				100,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варгин В.В. Эмалирование металлических изделий. Л.: Машиностроение, 1972. 377 с.
- Стеклов О.И., Сюй Шиго, Ли Гаочаго, Лошаков А.М., Кармазинов Н.П., Петрусенко Е.В. Технология сварки трубопроводов с двухсторонним эмалевым покрытием // Сварочное производство. 1998. № 2. С. 29–34.
- Стеклов О.И. Свариваемость металлов и сплавов // Итоги науки и техники. Сварка. Т. 14. М.: ВИНТИ, 1982. 70 с.
- Технология эмали и эмалирования металлов / под ред. В.В. Варгина. М.: Машиностроение, 1958. 342 с.
- Савицкий А.М., Ващенко В.Н., Бобров И.В. Особенности сварки изделий с защитным эмалевым покрытием // Автоматическая сварка. 2006. № 3. С. 37–39.
- Дудко Д.А., Савицкий А.М., Савицкий М.М., Олейник Е.М. Особенности тепловых процессов при сварке с термоциклированием // Автоматическая сварка. 1998. № 4. С. 8–12.
- Вагнер Ф.А. Термоциклирование при сварке вольфрамовым электродом // Сварочное производство. 1980. № 2. С. 4–6.
- Макара А.М., Мосендз М.А. Сварка высокопрочных сталей. Киев: Техника, 1976. 140 с.
- Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. 2. М.: Металлургия, 1976. 600 с.
- Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Селянин П.Н., Хохлов Ю.Ю. Применение медной присадочной проволоки при сварке стали с алюмокремниевым покрытием // Сварочное производство. 2010. № 8. С. 37–39.
- Сидоров В.П., Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Селянин П.Н., Хохлов Ю.Ю. Исследование процессов аргонодуговой сварки никель-хромовой проволокой стали с двухсторонним алюмокремниевым покрытием // Сварка и диагностика. 2010. № 4. С. 19–21.
- Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Гладуняк В.В. Исследование процессов аргонодуговой сварки сталей, покрытых алюминием, с медной присадочной проволокой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 1. С. 39–43.
- Ковтунов А.И. Технология сварки сталей с алюминиевым покрытием с применением проволоки из алюминиевой бронзы // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства: сб. материалов Всерос. заоч. науч.-техн. конференции. Тольятти: ТГУ, 2011. С. 314–320.
- Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: МИСИС, 1999. 416 с.
- Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа / под ред. О.А. Банных, М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
- Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М., Бибииков Е.Л. Производство отливок из сплавов цветных металлов. М.: МИСИС, 1996. 504 с.
- Конструкционные материалы / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
- Справочник по конструкционным материалам / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 640 с.
- Цветное литье / под общ. ред. Н.М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.
- Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.

REFERENCES

- Vargin V.V. *Emalirovanie metallicheskih izdeliy* [Metal ware enamel coating]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972, 377 p.
- Steklov O.I., Syuy Sh., Li G., Loshakov A.M., Karmazinov N.P., Petrusenko E.V. Technology of welding of pipelines with double-sided enamel coating. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1998, no. 2, pp. 29–34.
- Steklov O.I. Metals and alloys weldability. *Itoги nauki i tekhniki. Svarka. Vol. 14*. Moscow, VINITI Publ., 1982, 70 p.
- Vargin V.V., ed. *Tekhnologiya emali i emalirovaniya metallov* [Enamel and metal enamel coating technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1958, 342 p.
- Savitskiy A.M., Vashchenko V.N., Bobrov I.V. Special aspects of welding of wares with protective enamel coating. *Avtomaticheskaya svarka*, 2006, no. 3, pp. 37–39.
- Dudko D.A., Savitskiy A.M., Savitskiy M.M., Oleynik E.M. Special characteristics of thermal processes when welding with thermal cycling. *Avtomaticheskaya svarka*, 1998, no. 4, pp. 8–12.
- Vagner F.A. Thermal cycling when welding with tungsten electrode. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1980, no.2, pp. 4–6.
- Makara A.M., Mosendz M.A. *Svarka vysokoprochnikh staley* [High-resistance steel welding]. Kiev, Tekhnika Publ., 1976, 140 p.
- Prokhorov N.N. *Fizicheskie protsessi v metallakh pri svarke* [Physical processes in metals during welding]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, vol. 2, 600 p.
- Kovtunov A.I., Chermashentseva T.V., Selyanin P.N., Khokhlov Yu.Yu. Application of copper additional wire while welding steel with aluminosilicic coating. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2010, no. 8, pp. 37–39.
- Sidorov V.P., Kovtunov A.I., Chermashentseva T.V., Selyanin P.N., Khokhlov Yu.Yu. Study of processes of argon-arc welding of steel with double-sided aluminosilicic coating using nickel-chrome wire. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 4, pp. 19–21.
- Kovtunov A.I., Chermashentseva T.V., Gladunyak V.V. The research of argon-arc welding of steels covered with aluminum by copper filler wire. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2011, no. 1, pp. 39–43.
- Kovtunov A.I. Welding technology of steel with aluminum coating using albronz wire. *Sbornik materialov Vseros. zaoch. nauchno-tekhn. konferentsii «Sovremennye problemi povisheniya effektivnosti svarochnogo proizvodstva»*. Togliatti, TGU Publ., 2011, pp. 314–320.
- Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka tsvetnikh metallov i splavov* [Metallurgy ant thermal processing

- of non-ferrous metals and alloys]. Moscow, MISIS Publ., 1999, 416 p.
15. Bannykh O.A., Dritsa M.E., eds. *Diagrammy sostoyaniya dvoynikh i mnogokomponentnikh sistem na osnove zheleza* [State diagrams of double and multi-component ferrum-based systems]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 440 p.
 16. Kurdyumov A.V., Pikunov M.V., Chursin V.M., Bibikov E.L. *Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnikh metallov* [Production of non-ferrous metal alloys castings]. Moscow, MISIS publ., 1996, 504 p.
 17. Arzamasov B.N., ed. *Konstruksionnie materialy* [Structural materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 688 p.
 18. Arzamasov B.N., Solovyeva T.V., eds. *Spravochnik po konstruksionnim materialam* [Structural materials reference book]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2006, 640 p.
 19. Galdin N.M., ed. *Tsvetnoe litye* [Nonferrous castings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 528 p.
 20. Lyakishev N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynikh metallicheskih sistem* [State diagrams of double metal systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, vol. 1, 992 p.

WELDING OF PIPES WITH SILICATE ENAMEL COATING

© 2015

A.I. Kovtunov, Doctor of Sciences (Engineering),

Professor of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”

N.S. Alekseev, graduate student of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”

D.I. Plakhotny, postgraduate student of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”

O.V. Tanasov, graduate student of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: arc welding; silicate enamel coating; electrode wire; non-ferrous metals; molten pool; weld composition.

Abstract: Pipes with silicate enamel coating are widely used in heat-and-power engineering, chemical and petrochemical manufacturing engineering, oil production and transportation. Pipes with internal silicate enamel coating are recommended by documentary standard for construction of fire-fighting systems for tanks for oil and oil products.

Serviceability of pipelines is determined by corrosion resistance of inside surface of welded joint. While welding pipelines with silicate enamel coating, as a result of high-temperature action, the enamel burning and vaporization, pore formation, bubbling, and macro- and micro crack formation take place in the heat-affected area.

To reduce thermal action on the silicate enamel coating the authors offered to substitute steel weld base with the non-ferrous metal alloys having lower melting point. Zinc, copper and copper-based alloys, nickel and nickel-based alloys were selected to be such metals with allowance for melting point.

Tests of welding joints mechanical properties showed the applicability of copper and nickel alloys as the electrode material for machine welding of pipes with internal silicate enamel coating. When applying these materials the mechanical properties of welding joints have the same level as the properties ensured by welding with Sv-08G2S steel electrode wire.

Surface and chemical analysis of silicate enamel coating proved the effective application of CuSi3 electrode wire. Machine welding using CuSi3 electrode wire provided minimum damage and changes in chemical composition of silicate enamel coating.

ВЛИЯНИЕ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ШЛИФОВАНИЯ

© 2015

Н.В. Лищенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и материаловедение»
Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса (Украина)

В.П. Ларшин, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Одесский национальный политехнический университет, Одесса (Украина)

Ключевые слова: математическая модель; температура шлифования; метод суперпозиции; смазочно-охлаждающая жидкость; принудительное охлаждение; граничные условия.

Аннотация: Получены одномерные по координате математические модели для определения температурного поля при шлифовании по глубине поверхностного слоя и во времени, которые учитывают охлаждение двух видов: за счет теплопроводности обрабатываемого материала при отсутствии нагрева и за счет охлаждающего воздействия смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) на обработанную поверхность. В первом случае – при граничных условиях второго рода на этапе нагрева и применении метода суперпозиции тепловых полей, во втором – при граничных условиях второго и третьего рода в зоне нагрева и охлаждения, соответственно. Для второго случая (принудительное охлаждение) это позволило устранить известное противоречие, характерное для двумерной модели температурного поля, когда на этапе нагрева одновременно действовали граничные условия второго и третьего рода. В данной модели охлаждение обусловлено не только отсутствием нагрева в зоне охлаждения, но также теплообменом между обработанной (нагретой) поверхностью и СОЖ, причем СОЖ в указанной модели температуры имеет учитываемую при охлаждении собственную температуру. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя в момент окончания этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля на этапе охлаждения в любой момент времени, отсчитываемого от окончания этапа нагрева. Установлено влияние охлаждающего воздействия СОЖ не только на температуру поверхности, но также на ее распределение по глубине поверхностного слоя в любой момент времени. Подтверждено, что на этапе охлаждения температура в глубинных слоях материала может превышать температуру вышележащих слоев, т. е. имеет место изменение направления теплового потока, которое оказывает влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

ВВЕДЕНИЕ

При шлифовании причиной появления структур вторичной закалки или отпуска в поверхностном слое обрабатываемой заготовки является высокая температура в зоне контакта. Для управления свойствами поверхностного слоя при шлифовании необходима математическая модель процесса, позволяющая установить влияние отдельных его параметров на температурное поле в зоне обработки и за ее пределами. Теплофизика технологических процессов развивается в двух направлениях: решение задач без учета теплообмена с окружающей средой (шлифование всухую) и с учетом теплообмена, когда обработанный участок поверхности охлаждается за счет смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). С единых позиций следует рассмотреть оба направления.

Особенностью первого является возможность использования принципа суперпозиции температурных полей от действия на обрабатываемую поверхность разных тепловых источников. При шлифовании с охлаждением этот принцип не действует, что осложняет решение задачи о температурном поле. Вопрос о влиянии охлаждения на температурное поле при шлифовании рассматривается, начиная с шестидесятых годов прошлого века. Актуальность его значительно возросла по мере появления современных смазочно-охлаждающих технологических средств [1] и новых способов их доставки в зону резания и для охлаждения заготовки. Сухое шлифование, шлифование с экономным расходом СОЖ (и других видов смазочных средств) или подача СОЖ под давлением – все эти вопросы требуют научного решения задачи об охлаждении, по-

скольку в зоне резания одновременно протекает несколько физических процессов [2], но тепловой процесс относится к доминирующим [3]. Основы теплофизики процессов механической обработки, рассмотренные в работах [4; 5], не в полной мере учитывают особенности процессов шлифования в связи со значительно меньшей толщиной снимаемого припуска.

Основные теоретические исследования в этой области приведены в работах научной школы профессора А.В. Якимова [6–9]. Итоги этих исследований по влиянию принудительного охлаждения приведены в работе [10]. Некоторое развитие вопроса имеется в работах Д.Г. Евсеева [11; 12], однако вопросу принудительного охлаждения не уделено должного внимания. В этой связи целью работы является получение математической модели для определения температуры шлифования с учетом охлаждающего воздействия СОЖ и ее температуры.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование температурного поля обычно производят на основе теплофизической схемы теплового процесса (рис. 1). Наиболее распространена теплофизическая схема – подвижный полосовой источник тепла (рис. 1 а).

В соответствии с этой схемой по адиабатической поверхности $x=0$ полуограниченного тела в направлении оси z движется со скоростью V бесконечно длинный (по оси y) полосовой источник тепла шириной $2h$ [10; 11]. Плотность теплового потока в пределах теплового источника принимают равной постоянной величине q . Теплообмен адиабатической поверхности

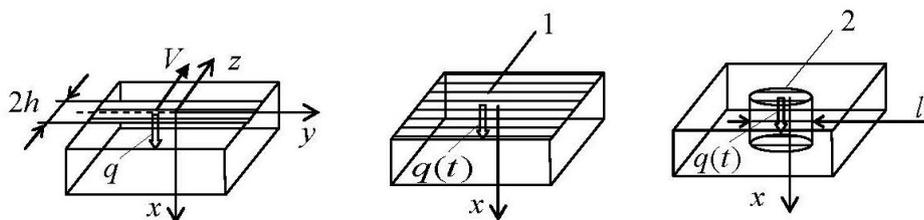


Рис. 1. Схема подвижного (а) и неподвижного (б, в) источника тепла (в заштрихованной зоне имеют место граничные условия второго рода): 1, 2 – плоские торцы полуограниченного в направлении оси x тела (б) и тонкого адиабатического стержня (в), соответственно

с окружающей средой отсутствует. Передача тепловой энергии в направлении координаты x (глубинные слои) и z (в направлении движения источника) осуществляется за счет теплопроводности, т.е. теплообмен с окружающей средой отсутствует. Решение тепловой задачи для данной теплофизической схемы (рис. 1 а) впервые получено применительно к так называемому скользящему контакту (термин Д. Егера в работе [13]), представляющему собой «полосовой источник тепла» (термин, принятый позднее в литературе). Применительно к шлифованию эта модель была усовершенствована [10; 14]. Результатом решения этой теплофизической задачи является уравнение, описывающее температурное поле от подвижного полосового источника [10]:

$$T(Z, X, H) = \frac{2qa}{\pi\lambda V} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0\left(\sqrt{X^2 + \xi^2}\right) d\xi, \quad (1)$$

$$\xi = \frac{V(z-z')}{2a}; \quad X = \frac{Vx}{2a}; \quad Z = \frac{Vz}{2a}; \quad H = \frac{Vh}{2a},$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 a – температуропроводность, м²/с;
 λ – теплопроводность, Вт/(м·°С);
 V – скорость движения источника тепла в направлении оси z (рис. 1 а), м/с;
 K_0 – модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка;
 H – безразмерная полуширина источника тепла;
 X – безразмерная координата;
 h – полуширина источника тепла, м;
 x – размерная координата, направленная по глубине поверхностного слоя, м;
 $z = z' - V\tau'$ – размерная координата в направлении вектора скорости источника тепла, причем в зоне контакта $0 \leq |z| \leq h$, м;
 z' – дополнительная переменная, м;
 τ' – время, определяющее координату z в квазиустановившемся температурном процессе, с.

Уравнение (1) не позволяет учитывать влияние принудительного охлаждения на температурное поле при шлифовании, оно достаточно сложное для использования в системах технологической диагностики. Попытка учесть влияние СОЖ [10; 15] позволила получить только приближенное решение. Сложность задачи обусловлена необходимостью учесть одновременно граничные

условия второго и третьего рода – условий теплообмена на поверхности тела. В зоне контакта действуют граничные условия второго рода, т. е. задается тепловой поток, а за пределами этой зоны, куда попадает СОЖ, действуют граничные условия третьего рода, т. е. задаются условия конвективного теплообмена. Как следствие, тепловая задача характеризуется разрывными (неоднородными) граничными условиями, для учета которых необходимо применять специальные математические приемы. Полученное в работе [10] решение имеет ряд недостатков: не оценена погрешность принятых допущений, не учитывается влияние температуры СОЖ на температуру шлифования. В этом решении охлаждающее действие СОЖ учитывается только через коэффициент теплообмена α , температура СОЖ принята равной нулю на этапе постановки задачи [10; 15].

Предлагается новый подход к определению температуры шлифования на поверхности и по глубине поверхностного слоя. Сущность этого подхода заключается в следующем. Температурный цикл шлифования разбивается на два последовательных этапа во времени, как это в действительности имеет место при шлифовании. На первом этапе происходит нагрев обрабатываемой поверхности в течение времени воздействия источника тепла с плотностью теплового потока q . На втором этапе, начальные условия для которого создаются на этапе нагрева, происходит охлаждение обработанной поверхности за счет теплопроводности или в условиях ее конвективного теплообмена с СОЖ. Для реализации подхода необходимо разработать единую математическую модель температурного цикла шлифования, включающего этапы нагрева и охлаждения поверхности, а также исследовать по этой модели влияние принудительного охлаждения (за счет воздействия СОЖ) на распределение температуры по глубине поверхностного слоя.

Ближайшим аналогом рассмотренной двумерной теплофизической модели, на основе которой получено уравнение (1), является одномерная теплофизическая модель процесса (рис. 1 б). В соответствии с этой моделью постоянный по величине тепловой поток $q(t)$ действует на плоской граничной поверхности полубесконечного тела в течение ограниченного времени нагрева $0 \leq t \leq t_H$, где $t_H = \frac{2h}{V}$. Это время точно равно времени прохождения «теплосоздающей» полосы шириной $2h$ со скоростью V над исследуемой точкой шлифуемой поверхности [16], т. е.

$$q(t) = \begin{cases} q, & \text{если } 0 \leq t \leq t_H; \\ 0, & \text{если } t_H \leq t \leq \infty. \end{cases} \quad (2)$$

Особенностью этой модели является возможность замены ограниченного по ширине плоского полосового источника тепла (рис. 1 а) плоским торцом полубесконечного твердого тела (рис. 1 б), на котором столько же времени ($0 \leq t \leq t_H$) действует неподвижный источник тепла [17–19]. Причем площадь плоского торца может быть либо не ограничена (заштрихованная зона 1 на рис. 1 б), либо ограничена площадью плоского торца вертикального стержня (заштрихованная зона 2 на рис. 1 в). Габаритный размер l этого стержня (рис. 1 в) при любой конфигурации его торца может быть уменьшен до величины, при которой в направлении оси x стержня направлен «линейный» тепловой поток $q(t)$ в интервале времени $0 \leq t \leq t_H$. Слово «линейный» (по терминологии работы [19]) означает, что вектор $q(t)$ теплового потока в любой точке стержня параллелен оси x . Предполагается, что площадь зоны 2 с габаритным размером l составляет меньшую часть площади зоны 1. Причем такую часть, при которой искажение «линейности» теплового потока по глубине рассматриваемого поверхностного слоя отсутствует (линии теплового потока перпендикулярны торцу и параллельны оси x).

Уравнение, описывающее одномерное температурное поле $T(x,t)$ на интервале времени нагрева $0 \leq t \leq t_H$, имеет вид [16; 19]:

$$T_{\text{НАГР}}(x,t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}, \quad (3)$$

где t – время действия неподвижного источника тепла (время нагрева обрабатываемой поверхности), причем $0 \leq t \leq t_H$, с;

$\operatorname{ierfc}(u)$ – обозначение специальной функции, причем [20]

$$\operatorname{ierfc}(u) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^2) - u \cdot \operatorname{erfc}(u),$$

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u) \text{ и } \operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) du.$$

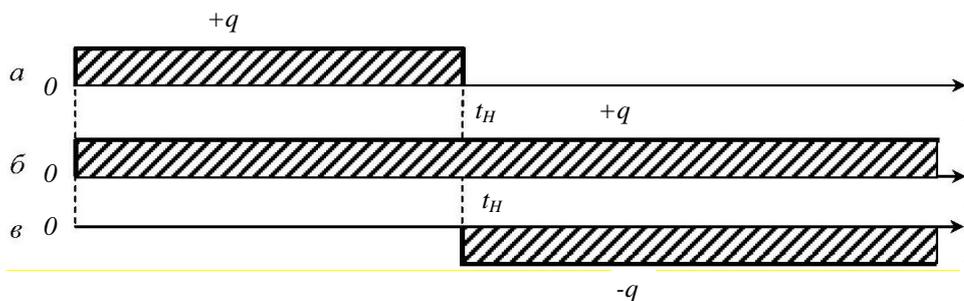


Рис. 2. Замена источника тепла с плотностью теплового потока $+q$ на интервале времени $0 \leq t \leq t_H$ (а) на два источника тепла с плотностями теплового потока $+q$ и $-q$ на интервалах $0 \leq t \leq \infty$ и $t_H \leq t < \infty$ (б, в), соответственно

Для описания температурного поля с помощью одномерного уравнения (3) на интервале времени охлаждения $t_H \leq t < \infty$, когда охлаждение поверхности производится только за счет теплопроводности обрабатываемого материала (без СОЖ), предлагается применить принцип суперпозиции (сложения) двух температурных полей от действия двух источников тепла (рис. 2).

Первый тепловой источник с положительной плотностью теплового потока $+q$ действует в интервале времени $0 \leq t \leq \infty$ (рис. 2 а), а второй – с отрицательной плотностью теплового потока $-q$ действует в интервале времени $t_H \leq t < \infty$ (рис. 2 б). Суперпозиция двух тепловых полей от действия указанных источников тепла равносильна действию одного ограниченного по времени источника тепла – теплового импульса – на интервале времени $0 \leq t \leq t_H$ (рис. 2 а).

Расчет температуры от действия указанных выше источников тепла на интервалах времени $0 \leq t < t_H$ (нагрев) и $t_H \leq t < \infty$ (охлаждение) производят, соответственно, по формулам:

$$T_{\text{НАГР}}(x,t) = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}}$$

$$T_{\text{ОХЛ}}(x,t) = \frac{2q}{\lambda} \left[(\sqrt{at}) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{at}} - (\sqrt{a(t-t_H)}) \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a(t-t_H)}} \right]. \quad (4)$$

Таким образом, одна двумерная математическая модель (1) идентична совокупности двух одномерных математических моделей (4). Отличие вызвано только количеством пространственных координат: x, z (две пространственные координаты) и x (одна пространственная координата). Установлено [16], что при шлифовании на этапе нагрева в интервале $4 \leq H \leq 20$ при расчете максимальных температур на поверхности и по глубине поверхностного слоя, ограниченного уровнем двукратного падения температуры, двумерная модель с уравнением (1) и одномерная модель с уравнением (4) дают результаты, отличающиеся не более чем на 5%. Однако обе эти модели (одномерная и двумерная) не учитывают охлаждающего влияния СОЖ на температуру

шлифования и на ее распределение по глубине поверхностного слоя, поскольку в обоих случаях охлаждение вызвано только отсутствием нагрева, т. е. явлением теплопроводности обрабатываемого материала при отсутствии теплового потока на поверхности.

Очевидно, что распределение температуры по глубине поверхностного слоя в конце этапа нагрева является начальным условием для определения температурного поля на этапе охлаждения. Для определения температуры шлифования $T_{Oxл}(x,t)$ на этапе охлаждения (с начальными условиями, полученными на этапе нагрева) можно использовать уравнение [19]:

$$T_{Oxл}(x,t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\pi at}} \left\{ \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) + \exp\left(-\frac{(x+x')^2}{4at}\right) \right\} - A \exp(atA^2 + A(x+x')) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x+x'}{2\sqrt{at}} + A\sqrt{at}\right) \Big] f(x') dx' + aA \int_0^t \left[\frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4a(t-\tau)}\right)}{\sqrt{\pi a(t-\tau)}} - A \exp(aA^2(t-\tau) + Ax) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a(t-\tau)}} + A\sqrt{a(t-\tau)}\right) \right] \varphi(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Здесь

$$f(x') = \left[\frac{2q\sqrt{at_H}}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x'^2}{4at_H}\right) - \frac{x'}{2\sqrt{at_H}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x'}{2\sqrt{at_H}}\right) \right] + T_0,$$

где t, τ – время охлаждения и переменная интегрирования, соответственно, с;

$A = \frac{\alpha}{a}$ – приведенный коэффициент теплообмена, Дж/(м⁴·°C);

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·°C);

T_0 – температура обрабатываемого материала до шлифования, °C;

$\varphi(\tau)$ – исходная температура СОЖ, которая может изменяться на интервале времени охлаждения $0 \leq \tau \leq t$, °C.

Совокупность уравнений (3) и (5) описывает температурное поле при шлифовании на этапах нагрева и охлаждения обрабатываемой поверхности, соответственно, причем уравнение (5), в отличие от уравнения (4), учитывает принудительное охлаждающее действие СОЖ. Единство задачи определения температурного цикла шлифования в составе «нагрев – охлаждение» обеспечивается тем, что температура любой точки поверхности и поверхностного слоя в конце временного этапа нагрева является температурой в начале временного этапа охлаждения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

До сих пор не исследовано температурное поле по уравнению (5), которое имеет ряд особенностей в условиях принудительного охлаждения. Это

уравнение позволяет учесть не только охлаждающие свойства СОЖ, но также ее температуру $\varphi(\tau)$, которая может быть постоянной или переменной во времени.

Исследование уравнения (5) проводили в среде MathCAD при следующих исходных данных, характеризующих процесс шлифования: $a=8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda=42$ Вт/(м·°C); $q=40 \cdot 10^6$ Вт/м²; $\alpha=10\,000$ Вт/(м²·°C); $\varphi(\tau)=20$ °C. Время нагрева (t_H) и охлаждения (t) в уравнениях (4) и (5), составляющие вместе единое время цикла шлифования t_{Σ} , на соответствующих этапах шлифования изменяли в одинаковых интервалах: $0 \leq t_H \leq 0,1$ с (нагрев) и $0 \leq t \leq 0,1$ с (охлаждение). В едином процессе нагрева и охлаждения (рис. 3) эти интервалы составляют: $0 \leq t_{\Sigma} \leq 0,1$ с (нагрев) и $0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2$ с (охлаждение).

Видно, что при $x=500$ мкм и 1000 мкм температура шлифования (T , °C) продолжает увеличиваться до максимального значения 560 °C и 370 °C даже на этапе охлаждения, а затем уменьшается.

Возрастание температуры в глубинных слоях материала на этапе охлаждения, т. е. на этапе времени $0,1 \leq t_{\Sigma} \leq 0,2$ с, установлено также В.А. Сипайловым при анализе двумерного уравнения, учитывающего теплообмен [10]. Сходство результатов расчета по уравнению (5) и по двумерному уравнению [10; 11] подтверждает правомерность уравнения (5) для описания температурного поля на этапе охлаждения при наличии теплообмена.

Полученная и исследованная математическая модель температурного поля в условиях принудительного охлаждения обрабатываемой поверхности может найти дальнейшее применение для условий нестационарной обработки металлов резанием [21], а также при разработке системы адаптивного управления процессом шлифования по температурному критерию в соответствии с алгоритмами оптимизации процессов механической обработки [22].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена новая методика определения температуры шлифования, в соответствии с которой температуру находят последовательно на этапе нагрева и охлаждения по уравнениям (4) при охлаждении за счет теплопроводности и по уравнениям (3) и (5) – при принудительном охлаждении.

2. Использовано уравнение (5) для определения температуры шлифования во времени и по глубине поверхностного слоя на этапе принудительного охлаждения за счет СОЖ, позволяющее установить влияние постоянной и переменной температуры СОЖ на температурное поле при шлифовании.

3. Разработана единая математическая модель температурного цикла шлифования, содержащего этапы нагрева и охлаждения при граничных условиях второго и третьего рода, соответственно. Это позволило устранить противоречие, характерное для двумерной модели температурного поля, когда на этапе нагрева одновременно действовали граничные условия второго и третьего рода.

4. Исследовано влияние СОЖ на температуру шлифования и ее распределение по глубине поверхностного слоя.

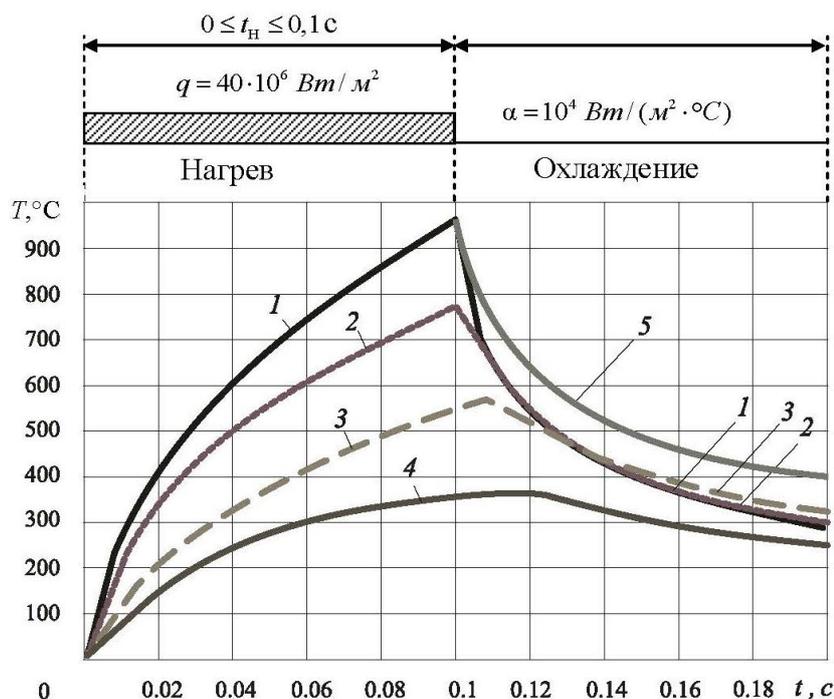


Рис. 3. Изменение температуры шлифования $T, ^\circ\text{C}$ во времени ($0 \leq t_\Sigma \leq 0,2$ с) на этапах нагрева ($0 \leq t_H \leq 0,1$ с) и охлаждения ($0,1 \leq t_\Sigma \leq 0,2$): 1, 2, 3, 4— $x=0, 200, 500, 1000$ мкм при $\alpha=10^4$ Вт/(м $^2 \cdot ^\circ\text{C}$); 5— $x=0$ при $\alpha=0$

5. Подтверждено, что на этапе охлаждения температура в глубинных слоях материала может превышать температуру вышележащих слоев, т. е. имеет место изменение направления теплового потока, которое оказывает влияние на характер структурно-фазовых превращений материала поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / под общ. ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
- Островский В.И., Савицкая В.Г. О взаимосвязи физических процессов при шлифовании // Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во ППИ, 1986. С. 3–9.
- Совкин В.Ф., Быков Е.В., Бударин А.М., Бударина Г.И. Шлифование легированных и жаропрочных сталей. Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1967. 160 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.
- Сипайлов В.А. Влияние теплообмена на температурное поле подвижного полосового источника // Физико-математические науки: сб. науч. трудов. № 21. Пермь: ППИ, 1966. С. 3–17.
- Сипайлов В.А., Якимов А.В. Влияние охлаждения на температурное поле при плоском шлифовании // Методы изготовления зубчатых колес: материалы науч.-техн. конф. Пермь: ППИ, 1967. С. 74–87.
- Сипайлов В.А. Рахматулин Г.Г., Якимов А.В., Ханжин Н.Н. Расчет температур при резбошлифовании // Повышение надежности и долговечности машин: сб. науч. трудов. № 40. Пермь: ППИ, 1969. С. 64–74.
- Напарьин Ю.А., Паньков Л.А., Ярмонов Н.А. К расчету температур при шлифовании // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ, 1972. С. 118–121.
- Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
- Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 128 с.
- Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Физические основы процесса шлифования. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. 128 с.
- Jaeger J.C. Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact // Proc. Roy. Soc. of New South Wales. 1942. Vol. 76. P. 203–224.
- Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.
- Паршаков А.Н., Напарьин Ю.А., Потемкин В.И., Ярмонов Н.А. Аналитические методы исследования тепловых явлений при шлифовании. Пермь: Изд-во ПГУ, 1977. 72 с.
- Ларшин В.П., Ковальчук Е.Н., Якимов А.В. Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании // Межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Изд-во ППИ, 1986. С. 9–16.
- Полетаев В.А., Волков Д.И. Глубинное шлифование лопаток турбин. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
- Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова. М.: Высш. шк., 1988. 559 с.

19. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
 20. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
 21. Постнов В.В., Юрьев В.Л. Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием. М.: Машиностроение, 2009. 269 с.
 22. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 407 с.
- REFERENCES**
1. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating-cooling processing agents and their application during cutting treatment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 544 p.
 2. Ostrovsky V.I., Savitskaya V.G. About the interrelationship of physical processes during grinding. *Mezhvuz. sbornik nauch. trudov*. Perm', PPI Publ., 1986, pp. 3–9.
 3. Sovkin V.F., Bykov E.V., Budarin A.M., Budarina G.I. *Shlifovanie legirovannykh i zharoprochnykh staley* [Grinding of high-hardness and heat-resistant steels]. Kuybyshev, Kuybyshevskoe knizhnoe izdatelstvo Publ., 1967, 160 p.
 4. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of processes of materials machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 279 p.
 5. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 288 p.
 6. Sipaylov V.A. Influence of heat transfer on the temperature field of movable bandpass source. *Sbornik nauch. trudov "Fiziko-matematicheskie nauki"*. Perm', PPI Publ., 1966, no. 21, pp. 3–17.
 7. Sipaylov V.A., Yakimov A.V. Influence of cooling-down on the temperature field during flat grinding. *Materialy nauch.-tekhn. konf. "Metody izgotovleniya zubchatykh koles"*. Perm', PPI Publ., 1967, pp. 74–87.
 8. Sipaylov V.A., Rakhmatulin G.G., Yakimov A.V., Khanzhin N.N. Calculation of temperatures during thread grinding. *Sbornik nauch. trudov "Povysheniye nadezhnosti i dolgovechnosti mashin"*. Perm', PPI Publ., 1969, no. 40, pp. 64–74.
 9. Naparyin Yu.A., Pan'kov L.A., Yarmonov N.A. On the calculation of temperatures during grinding. *Tezisy dokladov konf. "Povysheniye nadezhnosti i dolgovechnosti izdeliy mashinostroeniya"*. Perm', PPI Publ., 1972, pp. 118–121.
 10. Sipaylov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and the product quality management]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 167 p.
 11. Evseev D.G. *Formirovaniye svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke* [Formation of surface layers properties during abrasive treatment]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1975, 128 p.
 12. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Fizicheskie osnovy protsessy shlifovaniya* [Basic physics of grinding process]. Saratov, Saratovskiy universitet Publ., 1978, 128 p.
 13. Jaeger J.C. Moving Sources of Heat and Temperature at Sliding Contact. *Proc. Roy. Soc. of New South Wales*, 1942, vol. 76, pp. 203–224.
 14. Yakimov A.V. *Optimizatsiya protsessy shlifovaniya* [Grinding process optimization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 176 p.
 15. Parshakov A.N., Naparyin Yu.A., Potemkin V.I., Yarmonov N.A. *Analiticheskie metody issledovaniya teplovykh yavleniy pri shlifovanii* [Analytical methods of study of heat phenomena during grinding]. Perm', PGU Publ., 1977, 72 p.
 16. Larshin V.P., Kovalchuk E.N., Yakimov A.V. Applying of thermophysical problems solutions to the calculation of temperature and depth of defect layer during grinding. *Mezhvuz. sbornik nauch. trudov*. Perm', PPI Publ., 1986, pp. 9–16.
 17. Poletaev V.A., Volkov D.I. *Glubinnoye shlifovanie lopatok turbin* [Deep grinding of turbine blades]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 272 p.
 18. Frolov V.V., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 559 p.
 19. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Conduction of heat in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 487 p.
 20. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 599 p.
 21. Postnov V.V., Yuryev V.L. *Termodinamika i tekhnologiya nestatsionarnoy obrabotki metallov rezaniem* [Thermodynamics and technology of unsteady cutting treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 269 p.
 22. Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Avtomaticheskoe upravleniye protsessami rezaniya* [Automatic control of cutting processes]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011, 407 p.

THE INFLUENCE OF LUBRICATING FLUID COOLANT ACTION ON GRINDING TEMPERATURE

© 2015

N.V. Lishchenko, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physics and materials sciences”
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa (Ukraine)

V.P. Larshin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical engineering technology”
Odessa National Polytechnic University, Odessa (Ukraine)

Keywords: mathematical model; grinding temperature; method of superposition; lubricoolant; forced cooling; boundary conditions.

Abstract: The authors obtained the one-dimensional (in the coordinate) mathematical models to determine temperature field during grinding from the surface layer depth and in the course of time. These models take into account two types of cooling: cooling caused by the lack of heating, i.e. due to thermal conductivity of the processed material, and cooling due to the impact of lubricoolant on the processed surface. In the first case, the boundary conditions of the second kind at the stage of heating and application of method of thermal fields superposition were used; in the second one, the boundary conditions of the second and the third kinds were used in the heating and cooling area, respectively. In the second case (forced cooling), it became possible to eliminate a certain contradiction, which is the characteristic of two-dimensional temperature field model when the boundary conditions of the second and the third kinds acted simultaneously in the phase of heating. Within this model, the cooling is caused not only by the lack of heating in the cooling area, but also by heat exchange between the processed (heated) surface and the cutting lubricoolant, and the lubricoolant in this temperature model has its own temperature taken into account during the cooling process. Temperature distribution throughout the surface layer depth at the end of heating phase is the initial condition for determination of temperature field on the stage of cooling at any time measured from the end of heating phase. The authors determined the influence of lubricoolants cooling action not only on the surface temperature, but also on its distribution throughout the depth of the surface layer at any time. The study confirmed that the temperature of material deep layers may exceed the temperature of upper layers during the cooling phase, i.e. the change of heat flow direction takes place that influences the nature of structural and phase transitions of the material surface layer.

ТЕМПЕРАТУРА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПРЕРЫВИСТЫМИ И ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ

© 2015

Н.В. Лищенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и материаловедение»
Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса (Украина)

В.П. Ларшин, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Одесский национальный политехнический университет, Одесса (Украина)

Ключевые слова: прерывистые и высокопористые шлифовальные круги; макро- и микропрерывистость; число режущих выступов; коэффициент заполнения окружного шага; температура шлифования, зерна шлифовального круга.

Аннотация: Предложен единый подход и рабочая методика для определения температуры при шлифовании обычными, прерывистыми и высокопористыми шлифовальными кругами на основе представления теплового процесса при шлифовании в виде одного цикла нагрева и охлаждения (обычные круги) или в виде совокупности таких циклов (прерывистые и высокопористые круги). В соответствии с этим же представлением предложено различать макро- и микропрерывистое шлифование, соответственно, для шлифования прерывистыми (макропрерывистыми) и высокопористыми (микропрерывистыми) шлифовальными кругами. При этом для каждого элементарного цикла нагрева и охлаждения использован принцип суперпозиции тепловых полей от последовательного воздействия на обрабатываемую поверхность положительного и отрицательного источника тепла на макро- и микроуровне в зависимости от частоты этого воздействия. Показано, что увеличение числа режущих выступов на прерывистом круге при постоянном коэффициенте заполнения окружного шага этих выступов (величина, обратная скважности импульсов теплового потока) приводит к снижению температуры шлифования при прочих равных условиях. К числу таких условий относится одинаковая интенсивность шлифования кругами сравниваемых конструкций. Аналогичная тенденция по снижению температуры шлифования имеет место при увеличении коэффициента заполнения окружного шага при постоянном числе режущих выступов. Установлено, что с ростом числа режущих выступов на периферии круга влияние на температуру коэффициента заполнения окружного шага этих выступов уменьшается. Установленная закономерность уменьшения температуры прерывистого шлифования по мере увеличения числа режущих выступов и коэффициента заполнения окружного шага (при прочих равных условиях) подтверждает правомерность намечившейся тенденции замены обычных прерывистых кругов (макропрерывистых) соответствующими по габаритным размерам высокопористыми шлифовальными кругами (микропрерывистыми). Приведена методика определения температуры шлифования высокопористыми шлифовальными кругами, которая может быть использована при проектировании оптимальных рецептур этих кругов и при выборе их компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы тепловых явлений при шлифовании занимают значительное место в имеющихся публикациях по разработке эффективных технологий шлифования [1–6]. К числу способов понижения температуры при шлифовании часто относят метод прерывистого шлифования, получивший развитие в работах научной школы профессора А.В. Якимова [7–10]. Метод был всесторонне исследован, внедрен на многих предприятиях, однако технология изготовления макропрерывистых шлифовальных кругов путем прорезки соответствующих впадин на круге до сих пор является несовершенной. В то же время в производстве находят применение высокопористые шлифовальные круги, реализующие способ микропрерывистого шлифования [11–13], в соответствии с которым «режущими выступами» микропрерывистого шлифовального круга являются его зерна, расстояния между которыми эквивалентны «впадинам» микропрерывистого шлифовального круга. Переход от макро- к микропрерывистым шлифовальным кругам связан с изменением количества «режущих выступов» на круге, которое существенно возрастает, например, от 10...35 до 100...350 и более. При этом на тепловое поле влияет коэффициент заполнения окружного шага – отношение длины режущего выступа к величине окружного шага (сумма длины режущего выступа и длины впадины, которая следует за ним). В этой связи целью работы является разработка едино-

го подхода и соответствующей математической модели для определения температуры обычного, прерывистого (макропрерывистого) и высокопористого (микропрерывистого) шлифования.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При шлифовании, например плоском, зона контакта круга с заготовкой представляет собой прямоугольную полосу шириной $2h$ (мм), которая перемещается относительно заготовки со скоростью детали V (м/мин). Радиус кривизны этой полосы равен половине диаметра шлифовального круга, что намного превышает величину $2h$. Поэтому кривизной полосы контакта в расчетах температуры шлифования пренебрегают. Выделяющаяся в зоне контакта тепловая энергия приводит к возрастанию температуры обрабатываемой поверхности в каждой точке контакта по мере перемещения шлифовального круга в направлении вектора скорости детали. Время τ , в течение которого каждая точка обрабатываемой поверхности находится в зоне действия «теплосоздающей» подвижной полосы, назовем временем действия теплового источника, которое изменяется в интервале $0 \leq \tau \leq \tau_H$, где τ_H – время нагрева. Это время, например, для схемы плоского шлифования, определяют по формуле

$$\tau_H = \frac{2h}{V} = \frac{\sqrt{Dt}}{V}, \quad (1)$$

где D – диаметр шлифовального круга, мм;
 t – глубина резания при шлифовании, мм.

В теплофизических расчетах принимают во внимание либо две пространственные координаты (x, z), либо одну (x) координату теплофизической схемы. Первый случай (две координаты) и подвижный (со скоростью V) полосовой источник тепла без охлаждения и при наличии принудительного охлаждения рассмотрен в ряде работ, например, в работе [14]. Второй случай (одна координата) с учетом и без учета принудительного охлаждения рассмотрен в наших работах, например, в работе [15]. При одномерной и двумерной теплофизической схеме шлифования тепловое поле в рассматриваемой точке обрабатываемой поверхности создается, соответственно, неподвижным и подвижным плоским тепловым источником. Неподвижный источник шириной $2h$ воздействует на каждую точку в зоне контакта в течение времени нагрева (τ_H). При этом зона контакта рассматривается как поверхность полубесконечного тела. Подвижный тепловой источник имеет свою подвижную (по отношению к обрабатываемой поверхности) систему координат, с которой этот источник жестко связан. Подвижная система координат имеет ось z , в направлении которой этот источник имеет протяженность $2h$ и движется.

Показано, что различие в результатах определения температуры шлифования по одно- и двумерной теплофизическим схемам незначительно (до 10 %) при прочих одинаковых условиях, как при наличии принудительного охлаждения, так и без него [15]. Поэтому целесообразно при технологическом проектировании и технологической диагностике процесса шлифования пользоваться одномерной теплофизической схемой с линейным тепловым потоком. В соответствии с этой схемой тепловое поле создается вследствие движения по координате x теплового потока, векторы плотности которого являются параллельными между собой и перпендикулярными к обрабатываемой поверхности.

Температуру в зоне шлифования можно регулировать при прочих равных условиях, если шлифование производить с определенными многократными на временном интервале $0 \leq \tau \leq \tau_H$ перерывами во времени. Это позволяет изменить температурное поле и макси-

мальную величину температуры в зоне контакта, когда прерывистый периодический нагрев обрабатываемой поверхности чередуется с его отсутствием. Такой процесс можно осуществить при шлифовании специальными кругами, имеющими на рабочей поверхности ряд чередующихся выступов и впадин определенной протяженности, которые попарно образуют циклы нагрева (выступ) и охлаждения (впадина). Например, если длины режущего выступа шлифовального круга l_1 , а впадины l_2 , то период времени нагрева зоны контакта $T_1 = \frac{l_1}{V_{кр}}$, где $V_{кр}$ – линейная скорость вращения прерывистого круга, каждый раз чередуется с соответствующим периодом времени охлаждения $T - T_1 = \frac{l_2}{V_{кр}}$ (рис. 1).

Во время работы режущего выступа (нагрев) в зоне контакта действует тепловой поток $q(\tau) = q_{MAX}$, а во время отсутствия резания (охлаждение) – $q(\tau) = 0$ (рис. 1). Таким образом, тепловой поток, воздействующий на обрабатываемую поверхность, можно представить в виде следующей ступенчатой функции [16]

$$q(\tau) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ q_{MAX}, & nT < \tau < nT + T, & n = 0, 1, \dots \\ 0, & nT + T_1 < \tau < (n+1)T, & n = 0, 1, \dots \end{cases}$$

Непрерывная последовательность коротких циклов «нагрев-охлаждение» располагается на участке нагрева более протяжённого цикла «нагрев-охлаждение». Длительность этого участка нагрева, как для сплошного, так и для прерывистого круга, определяется временем нагрева τ_H от действия теплового источника – зоны контакта при шлифовании. По мере увеличения числа N режущих выступов на периферии круга увеличивается количество циклов «нагрев-охлаждение» при одновременном уменьшении периода T каждого из них (рис. 1). При выборе числа N из интервала $180 \leq N \leq 350$ длина режущего выступа шлифовального круга l_1 становится равной размеру

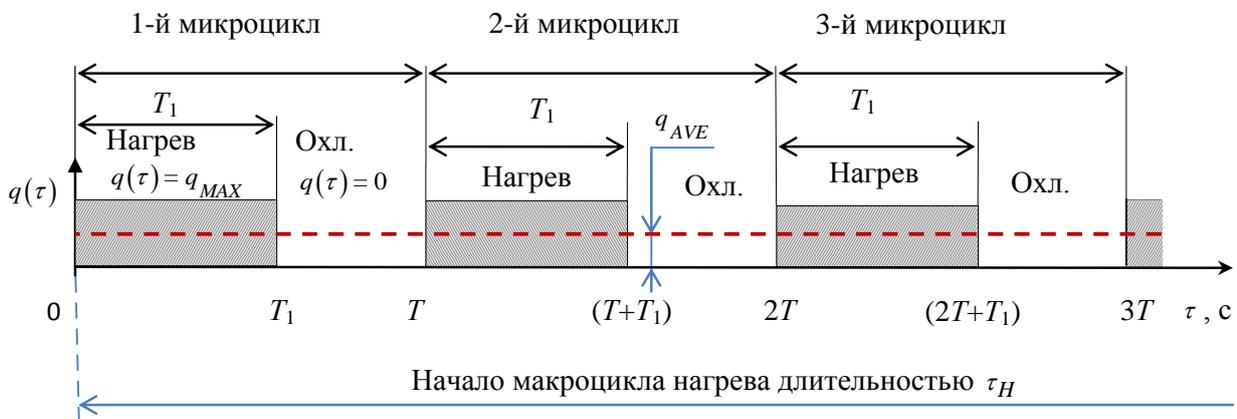


Рис. 1. Пульсирующий тепловой поток с плотностью $q(\tau)$: $0T_1$ и T_1T – интервалы времени нагрева и охлаждения (отсутствия нагрева), образующие цикл прерывистого шлифования с периодом цикла T

режущих зерен круга в интервале его зернистости 25...50, а длина впадины l_2 становится равной расстоянию между режущими зернами. Это подтверждается данными, приведенными в работе [17], в которой показано, что среднее расстояние между режущими зернами на рабочей поверхности круга составляет 3,3...6,1 мм в интервале изменения удельной радиальной силы 20...50 Н/см.

Следовательно, появляется возможность с единых теплофизических позиций рассмотреть температурное поле при прерывистом (дискретном) шлифовании (рис. 1) для двух случаев. В первом случае (макропрерывистое шлифование) режущие выступы – искусственные образования на сплошном круге, во втором (микропрерывистое шлифование) – это отдельные режущие зерна высокопористого шлифовального круга. Этому способствует такая характерная для высокопористых кругов особенность, как отсутствие влияния связки круга на потребляемую мощность резания.

В соответствии с известной методикой [18] входными параметрами, характеризующими температуру прерывистого шлифования $\theta^*(u, Fo_1, n)$, являются следующие величины:

$$u = \frac{Vh}{a},$$

$$Fo_1 = \frac{\alpha\tau_1}{h^2} = \frac{al_1}{h^2V_{кр}},$$

$$n = \frac{l_2}{l_1},$$

где u – безразмерный комплекс скорости; Fo_1 – безразмерное время действия теплового импульса; a – температуропроводность обрабатываемого материала, м²/с.

Условием выбора геометрических параметров (выступов и впадин) прерывистого круга является предварительно заданная степень понижения температуры прерывистого шлифования. Среди указанных выше входных параметров геометрическим параметром круга является только отношение $n = \frac{l_2}{l_1}$. Другие параметры

(u и Fo_1) зависят также от режимов шлифования. Кроме того, в известной методике не учитывается, что сравниваемые геометрические конструкции прерывистого круга предназначены для совершения одной и той же работы резания, которая пропорциональна площади теплового импульса [7]. Поэтому в этой методике эквивалентные по температуре шлифования конструкции круга не обеспечивают одинакового съема материала в единицу времени.

Что касается определения температурного поля от отдельных зерен круга, то в работе [17] такая попытка делается с применением метода суперпозиции с учетом многократного действия источников – режущих зерен, однако величину плотности теплового потока от действия режущего зерна находят расчетным путем через интенсивность напряжения, а не мощность резания.

Необходимо получить зависимость температуры прерывистого шлифования только от геометрических параметров прерывистого круга, к числу которых относятся число N режущих выступов на круге и коэффициент заполнения окружного шага (или скважность импульсов теплового потока, которая обратно пропорциональна этому коэффициенту). Кроме того, в работах [14; 18; 19] не учитывается важное дополнительное условие, которое необходимо выдержать применительно ко всем прерывистым кругам, сравниваемым по температуре шлифования. А именно: при изменении числа режущих выступов на круге и коэффициента заполнения окружного шага объем снимаемого материала в единицу времени (показатель интенсивности шлифования) должен быть одним и тем же. Т. е. необходимо учитывать, что при нахождении впадины прерывистого круга в зоне контакта отсутствие теплового потока сопровождается отсутствием съема материала, а это приводит к дополнительной нагрузке на последующий режущий выступ круга и, как следствие, к дополнительному возрастанию теплового потока на этом режущем выступе. В соответствии с предлагаемой методикой сформулировано условие постоянства интенсивности шлифования (или работы шлифования), которое необходимо обеспечивать для всех сравниваемых между собой конструкций прерывистых кругов.

Условие постоянства интенсивности шлифования (объем удаляемого в единицу времени материала) на временном участке нагрева $0 \leq \tau \leq \tau_H$, очевидно, должно сопровождаться постоянством мощности, затрачиваемой на резание, которая может быть найдена из известного соотношения. Например, для плоского шлифования

$$P = q_{AVE} S_n \sqrt{Dt},$$

где P – измеренная мощность резания (средняя величина периодически изменяющейся мощности), Вт; q_{AVE} – средняя плотность теплового потока (рис. 1), Вт/м²; D – диаметр шлифовального круга, м; t – глубина резания, м; S_n – поперечная подача, м.

Следовательно, постоянство мощности шлифования при фиксированных режимных параметрах (t , S_n) и диаметре шлифовального круга (D) сопровождается постоянством плотности теплового потока. Поэтому указанное выше условие сравнения кругов (одинаковая интенсивность или работа шлифования), обеспечивается при постоянстве (для разных конструкций прерывистых кругов) удельного параметра q_{AVE} – средней плотности теплового потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований является разработка и апробирование методики определения температуры прерывистого и высокопористого шлифования при одинаковой интенсивности шлифования для разных геометрических параметров прерывистых кругов по мере увеличения числа N режущих выступов на круге. Причем увеличение N производят в интервале $180 \leq N \leq 350$, т. е. до такой величины N , при которой протяженность режущего выступа l_1 становится сопоставимой по вели-

чине с размером режущего зерна при обработке поверхности в тех же условиях высокопористыми шлифовальными кругами. Для этого необходимо разработать математическую модель для определения температуры дискретного (прерывистого и высокопористого) шлифования, для выбора и оптимизации варьируемых геометрических параметров микропрерывистых шлифовальных кругов с режущими участками – зёрнами высокопористого круга исходя из наименьшей температуры микропрерывистого (высокопористого) шлифования.

В качестве модели для определения температуры прерывистого шлифования использовано решение одномерного дифференциального уравнения теплопроводности при пульсирующем тепловом потоке на поверхности [16].

В этом решении установившаяся температура Θ_{SUM} от воздействия на поверхность полуограниченного тела прерывистого (импульсного) теплового потока состоит из двух составляющих в соответствии с уравнением

$$\Theta_{SUM} = \Theta_R(q_{AVE}) + \Theta_P(q_{MAX}) \quad (2)$$

Первая составляющая $\Theta_R(q_{AVE})$ – непрерывно возрастает по величине и зависит от среднего уровня плотности теплового потока q_{AVE} , причем [16]

$$\Theta_R = \frac{2q_{AVE}}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} = \frac{2q_{MAX}}{\lambda} \frac{T_1}{T} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}}, \quad (3)$$

где τ – время действия теплового источника в интервале $0 \leq \tau \leq \tau_H$, с; $q_{AVE} = q_{MAX} \frac{T_1}{T}$ и q_{MAX} – средняя и максимальная за период микроцикла плотность теплового потока, Вт/м²; λ – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·°С).

Вторая составляющая $\Theta_P = \Theta_P(q_{MAX})$ – импульсная периодическая, зависит от максимального уровня плотности теплового потока q_{MAX} и его протяженности во времени на периоде микроцикла (рис. 1), причем в соответствии с работой [16]: в интервале $0 < p < s$ (нагрев)

$$\Theta_P = \frac{2q_{MAX}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT}{\pi}} \left[(1-s)\sqrt{p} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} I(s, p) \right], \quad (4)$$

в интервале $s < p < 1$ (охлаждение)

$$\Theta_P = \frac{2q_{MAX}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT}{\pi}} \left[(1-s)\sqrt{p} - \sqrt{(p-s)} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} I(s, p) \right], \quad (5)$$

где $s = \frac{T_1}{T}$ – коэффициент заполнения или величина, обратная скважности периодического прямоугольного импульса теплового потока;

$p = \frac{\tau}{T}$ – безразмерное (относительное) время в интервале микроцикла шлифования $0 \leq \tau \leq T$. В формулах (4) и (5) используется выражение

$$I(s, p) = \int_0^{\infty} \left\{ \frac{(1-s)\exp(-\xi^2)\exp(-p\xi^2)}{\xi^2[1-\exp(-\xi^2)]} d\xi + \int_0^{\infty} \frac{[-\exp\{-(1-s)\xi^2\} + s]\exp(-p\xi^2)}{\xi^2[1-\exp(-\xi^2)]} d\xi \right\} \quad (6)$$

Математическая модель (2)...(6) для определения температуры от пульсирующего теплового потока позволяет определять эту температуру в любой момент времени на интервале времени установившихся значений температур. Недостатком этой модели является неопределенность этого временного интервала, который наступает после окончания переходного процесса установления температуры. Попытка найти «время теплового насыщения» была сделана в работе [20], однако фактически была сформулирована только задача. Это сдерживает применение модели (2)...(5) для проектирования оптимальных конструкций прерывистых и высокопористых кругов.

Предлагается следующий подход к определению температурного поля при дискретном (макро- и микропрерывистом) воздействии теплового потока. Известно, что при отсутствии принудительного охлаждения обрабатываемой поверхности к температурным полям от действия смещенных во времени дискретных источников тепла применим принцип суперпозиции: смещенные по времени температурные поля от дискретных источников тепла можно алгебраически суммировать путем сложения соответствующих температур в одних и тех же пространственных координатах. Сущность принципа суперпозиции применительно к дискретному (прерывистому и высокопористому) шлифованию заключается в следующем. Температурное поле от отдельного прямоугольного импульса теплового потока, действующего на интервале времени $0 \leq \tau \leq T_1$ (рис. 1), может быть заменено суммой температурных полей от действия двух непрерывных по времени источников. Первый тепловой источник является положительным ($+q_{MAX}$). Он непрерывно действует на интервале времени $0 \leq \tau \leq \infty$. Вторым тепловым источником (сопрягаемый с первым источником) является отрицательным источником ($-q_{MAX}$). Он действует непрерывно на интервале времени $T_1 \leq \tau \leq \infty$. Такое представление одиночного импульса теплового потока известно применительно к одиночному интервалу времени действия теплового потока при обычном шлифовании сплошным кругом [15]. Длительность τ_H этого интервала характеризует макроцикл шлифования (рис. 1). Применительно к прерывистому кругу такой способ представления одиночного импульса теплового потока сохраняется, только вместо времени макроцикла τ_H используется время более короткого цикла T_1 . Такая попытка сделана в работе [19], однако величина плотности теплового

потока в полученной зависимости является переменной. Это некорректно в связи с нарушением принципиального требования $q_{MAX} = \text{const}$, при котором получено решение соответствующего дифференциального уравнения для определения температуры шлифования.

Для макро- и микропрерывистого шлифовального круга общее количество импульсов n (число циклов прерывистого шлифования) на интервале времени нагрева $0 \leq \tau \leq \tau_H$ можно определить по формуле [19]:

$$n = \frac{\sqrt{D \cdot t} \cdot V_{кр}}{V(l_1 + l_2)}. \quad (7)$$

Обозначая $q_{MAX} = q$ и применяя принцип суперпозиции для n последовательных циклов нагрева и охлаждения, можно получить следующую рекуррентную формулу для определения температуры $T = T(q, \tau)$ на участке нагрева:

$$T = \frac{2q}{\lambda} \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{a[\tau - (i-1)T]} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a[\tau - (i-1)T]}} - \sqrt{a[\tau - (i-1)T - T_1]} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a[\tau - (i-1)T - T_1]}} \right). \quad (8)$$

Для построения графика зависимости температуры шлифования от времени (рис. 2) по уравнениям (2)...(6) и (8) в среде MathCAD принимаем следующие исходные данные: $D=390$ мм (из возможного интервала 300...400 мм), $l_1=20$ мм, $l_2=15$ мм, $V_{кр}=35$ м/с, $V=2$ м/мин, $t=0,028$ мм, $q_{MAX}=40 \cdot 10^6$ Вт/м², $\lambda=42$ Вт/(м·°C), $a=8 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

При этих условиях $l_1 + l_2 = 35$ мм, число режущих выступов на прерывистом круге $N=35$, время одного полного оборота круга 35 мс, время воздействия неподвижного плоского теплового источника $\tau_H=100$ мс, количество оборотов круга за время τ_H составляет 2,9. Таким образом, в состав одного макроцикла прерывистого шлифования длительностью $\tau_H=100$ мс входит 100 более коротких циклов длительностью $T=1$ мс, при этом за время одного оборота круга происходит 35 более коротких циклов шлифования.

Время действия режущего выступа составляет

$$T_1 = \frac{l_1}{V_{кр}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{35} = 0,5714 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Время отсутствия теплового импульса (над точкой контакта проходит впадина длиной l_2)

$$T - T_1 = \frac{l_2}{V_{кр}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{35} = 0,42857 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Коэффициент заполнения s окружного шага круга (периода прямоугольного импульса)

$$s = \frac{T_1}{T} = \frac{0,5714}{1} = 0,5714.$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из анализа данных на рис. 2 видно, что математическая модель (2)...(6) дает наибольшую погрешность на интервале первого цикла шлифования (далее – микроцикла): суммарная температура, полученная по формуле (2), изменяется от -27 °C до $+66$ °C (кривая 3), в то

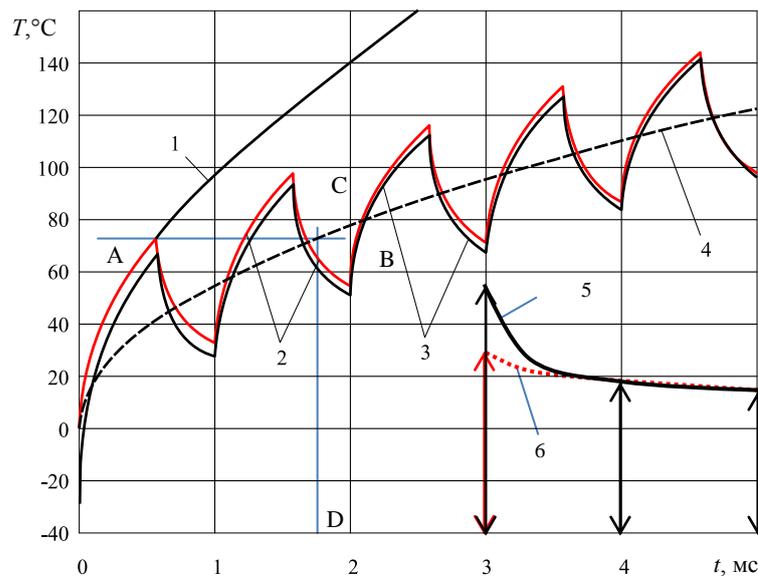


Рис. 2. Температура шлифования (T , °C) в начале макроцикла нагрева на участке переходного процесса:
 1 – от воздействия постоянной плотности теплового потока $q(\tau) = q_{MAX} = 40$ Вт/мм²;
 2 – полученная методом суперпозиции по уравнению (8);
 3 – суммарная (установившаяся) температура по модели (2)...(6);
 4 – непрерывно возрастающая часть установившейся температуры по уравнению (3)

время как температура, полученная методом суперпозиции по формуле (8), изменяется от 0 до +73 °С (кривая 2). Начиная со второго микроцикла и далее различие между графиками 2 и 3, построенными по формулам (2)...(6) и (8), уменьшается, что вызвано затуханием переходного процесса изменения температуры. Затухающие по величине амплитуды 1-го, 3-го и 5-го импульсов для кривых 3 и 2 изменяются, стабилизируясь (показано зависимостями 5 и 6 на рис. 2). Непрерывно возрастающая составляющая температуры (кривая 4 на рис. 2) является экспоненциально подобной, однако, в отличие от экспоненциального закона, медленнее стабилизируется, продолжая нарастать. Причем это нарастание происходит с замедляющимся темпом по мере увеличения длительности макроцикла шлифования на интервале $0 \leq \tau \leq \tau_H$. Начиная с 5-го импульса различием между графиками 2 и 3 (рис. 2) можно пренебречь, переходный процесс заканчивается, относительная ошибка при определении максимальной температуры не превышает 2 %.

Найденному выше эмпирическим способом времени переходного процесса соответствует постоянная времени, которую можно найти из следующего условия. Максимальное значение амплитуды первого импульса температуры, полученного методом суперпозиции (прямая АВ на рис. 2), принадлежит непрерывно возрастающей компоненте температуры (точка пересечения прямой АВ с кривой 4). Линия CD, проходящая через указанную точку пересечения, отсекает на абсциссе координату времени, равную постоянной времени.

Это можно записать в виде математического условия

$$\frac{2q_{MAX}}{\lambda} \sqrt{\frac{aT_1}{\pi}} = \frac{2q_{AVE}}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau_t}{\pi}}, \quad (9)$$

где τ_t – постоянная времени переходного процесса изменения температуры.

Учитывая соотношение между параметрами q_{MAX} и q_{AVE} , из (9) получаем

$$\tau_t = \frac{T}{s} = TQ, \quad (10)$$

где Q – скважность прямоугольного импульса теплового потока ($Q > 1$).

Для рассматриваемого случая ($s=0,5714$) постоянная времени переходного процесса τ_t по формуле (10) составляет

$$\tau_t = \frac{1}{0,5714} = 1,75 \text{ мс.}$$

Известно, что время экспоненциального переходного процесса, при котором выходная величина принимает 95 % от своего установившегося значения, приблизительно равно утроенному значению постоянной времени изменения выходной величины (температуры). Исходя из этого правила с учетом формулы (10), время переходного процесса T_t составит

$$T_t = 3\tau_t = 3 \frac{T}{s} = 3TQ < \tau_H. \quad (11)$$

Для данного случая время переходного процесса $T_t = 1,75 \cdot 3 = 5,25$ мс, что соответствует выбранному интервалу времени на рис. 2.

Общая формулировка задачи оптимизации геометрических параметров микропрерывистого шлифовального круга заключается в определении количества выступов N и коэффициента заполнения окружного шага s , которые обеспечивают наименьшую температуру шлифования на интервале времени действия $0 \leq \tau \leq \tau_H$ теплового источника при шлифовании. В свою очередь максимальное время действия теплового источника, при котором температура шлифования максимальна, например, применительно к плоскому шлифованию определяют по формуле (1).

Для решения задачи оптимизации в интервале времени установившихся значений температур $T_t < \tau < \tau_H$ по уравнениям (2)...(6) определены максимальные температуры прерывистого шлифования в зависимости от количества выступов N на микропрерывистом круге, которое изменяли от 3 до 350. Графики построены для трех различных значений коэффициента заполнения $s = T_t/T$: 0,2; 0,5; 0,8 (рис. 3).

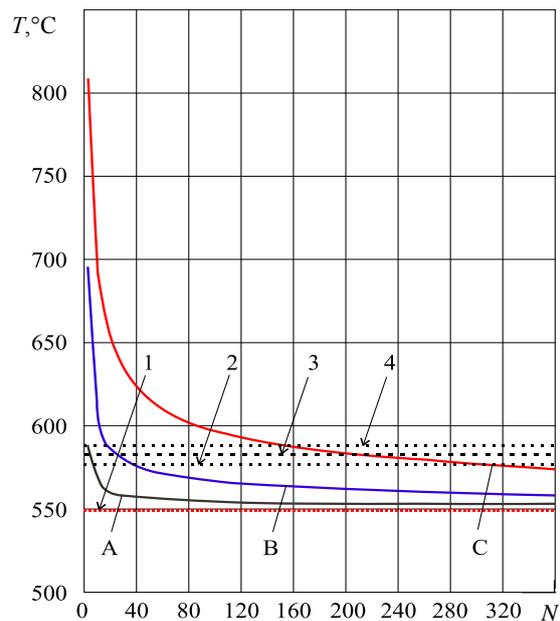


Рис. 3. Изменение температуры $T = \Theta_{SUM}(N)$ макро- и микропрерывистого шлифования при $q_{AVE} = const = 22,856 \text{ Вт/мм}^2$ в зависимости от числа режущих выступов N шлифовального круга при различном коэффициенте заполнения s : A, B и C— $s=0,8; 0,5$ и $0,2$

Видно, что зависимость $\Theta_{SUM}(N)$, полученная при фиксированном значении коэффициента заполнения s , является нелинейной. Температура резко уменьшается

на начальном интервале изменения N , а затем продолжает уменьшаться незначительно. Уменьшение параметра s от $s=0,8$ (кривая А на рис. 3) до $s=0,2$ (кривая С) приводит к увеличению максимальной температуры во всем интервале изменения числа режущих выступов N . В указанном диапазоне изменения s наименьшая температура имеет место при $s=0,8$.

Критерий (или целевая функция) оптимизации для определения оптимальных геометрических параметров прерывистых кругов – наименьшая температура прерывистого шлифования в зоне резания. При этом необходимо обеспечить условие одинаковой интенсивности шлифования для всех сравниваемых конструкций макро- и микропрерывистых шлифовальных кругов, которое приводит к постоянству средней плотности теплового потока на микроцикле шлифования.

Учитывая характер изменения графиков на рис. 3 (резкое уменьшение температуры на начальном участке и дальнейшее незначительное ее понижение), примем следующую методику определения оптимальных величин N и s .

Проводят линию, параллельную оси абсцисс на уровне температуры, соответствующей максимальному на интервале $0 \leq \tau \leq \tau_H$ значению установившейся составляющей температуры, т. е. на уровне температуры $\Theta_R(\tau_H)$ при $\tau = \tau_H$ (рис. 1). В данном случае эта температура составляет $549,226^\circ\text{C}$ (линия 1 на рис. 3). Параллельно этой линии и выше ее, например выше на 5, 6 и 7 % от уровня $549,226^\circ\text{C}$, проводят три параллельные прямые (линии 2, 3 и 4 на рис. 3) таким образом, чтобы каждая из этих прямых пересекала все три графика. Находят интервалы для оптимальных значений N для каждого из графиков, построенных при следующих значениях s : 0,2; 0,5 и 0,8. Например, уровни температур, соответствующие 5 %, 6 % и 7 %, следующие (рис. 3): $576,69^\circ\text{C}$ (линия 2); $582,18^\circ\text{C}$ (линия 3); $587,59^\circ\text{C}$ (линия 4).

В соответствии с рассмотренной методикой получают интервалы изменения оптимального числа N при различных значениях s (табл. 1).

Таблица 1. Оптимальные интервалы геометрических параметров, характеризующих прерывистость поверхности шлифовального круга

Минимальные уровни температур	s		
	0,2	0,5	0,8
5 % ($576,69^\circ\text{C}$)	$N \geq 311$	$N \geq 40$	$N \geq 7$
6 % ($582,18^\circ\text{C}$)	$N \geq 228$	$N \geq 25$	$N \geq 5$
7 % ($587,59^\circ\text{C}$)	$N \geq 152$	$N \geq 17,8$	$N \geq 3$

Видно, что наименьшие значения N (7, 5, 3) имеют место при $s=0,8$ в последовательности, построенной в порядке возрастания минимальных уровней температур. С увеличением s от 0,2 до 0,8 при одном и том же минимальном уровне температур значения N уменьшаются.

При повышении минимального уровня температуры на 2 % (с 5 до 7 %) количество рекомендуемых выступов уменьшается более чем в 2 раза, например, для $s=0,8$ – от 7 до 3, а для $s=0,2$ – от 311 до 152. При выполнении на шлифовальном круге выступов в количестве $N \geq 152$, $N \geq 228$ и $N \geq 311$ требования к параметру s снижаются. Это обусловлено тем, что низкие температуры имеют место при большом количестве выступов при любом коэффициенте заполнения s .

Установленная закономерность уменьшения температуры прерывистого шлифования по мере увеличения N и s отражает наметившуюся тенденцию замены прерывистых кругов соответствующими по габаритным размерам высокопористыми шлифовальными кругами. При большом количестве режущих зерен (на порядок и больше числа режущих выступов обычного прерывистого круга), расположенных на периферии высокопористого круга, требования к коэффициенту заполнения окружного шага уменьшаются. Эта тенденция характеризует переход от макро- (обычные прерывистые круги) к микропрерывистости (высокопористые круги). Преимуществом высокопористых кругов, по сравнению с обычными прерывистыми кругами, является отсутствие дополнительной механообработки по формированию режущих выступов на круге, поскольку тепловые источники (а это – режущие зерна круга) формируются естественным образом при изготовлении высокопористых кругов.

По данным работы [17] определены параметры дискретных тепловых источников – зерен и мгновенная максимальная температура под зерном (табл. 2). При этом использованы следующие новые обозначения:

z_{ϕ} – фактическое число режущих зерен на площадке контакта;

$S_{\text{зерн}}$ – площадь контакта абразивного зерна с заготовкой;

$P_{\text{зерн}}$ – мощность резания, приходящаяся на одно режущее зерно.

Видно, что мгновенные максимальные температуры от действия отдельных режущих зерен составляют $1450 \dots 2897^\circ\text{C}$, что превышает температуру плавления обрабатываемого материала. Однако при этом необходимо учитывать, что это теоретические (расчетные) температуры, которые после приведения их к средней температуре на площадке контакта изменяются в интервале, показанном на рис. 3.

Таблица 2. Расчетные параметры тепловых источников – зерен высокопористого круга

Размер зерна, мм	l_1 , мм	l_2 , мм	l_1+l_2 , мм	Q	z_{ϕ}	$S_{\text{зерн}}$, мм ²	$P_{\text{зерн}}$, Вт зерно	$q_{\text{МАХ}}$, Вт/мм ²	$q_{\text{АВЕ}}$, Вт/мм ²	N	Θ_{SUM} , °C
0,25	0,25	3,35	3,60	14,00	3,94	0,0490	76,57	1562,73	111,578	340,30	2897
0,40	0,40	4,30	4,70	11,76	3,07	0,1256	98,27	782,40	66,200	260,68	1716
0,50	0,50	6,00	6,50	13,00	2,20	0,1960	137,14	699,69	53,800	188,49	1450

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Наиболее рациональные конструктивные параметры обычных прерывистых шлифовальных кругов выбирают исходя из следующих установленных закономерностей:

– увеличение числа режущих выступов N на круге при постоянном коэффициенте заполнения s окружного шага (величина, обратная скважности импульсов теплового потока) приводит к снижению температуры шлифования (например, при коэффициенте заполнения 0,5 увеличение числа режущих выступов от 3 до 35 приводит к снижению температуры от 646,392 °С до 577,375 °С);

– увеличение коэффициента заполнения s при постоянном числе режущих выступов N также приводит к снижению температуры шлифования (например, при числе режущих выступов $N=15$ увеличение коэффициента заполнения s от 0,2 до 0,8 приводит к уменьшению температуры от 666,101 °С до 562,225 °С);

– одновременное увеличение числа режущих выступов N и коэффициента заполнения s приводит к более эффективному, чем в указанных выше случаях, снижению температуры шлифования (например, одновременное увеличение N от 3 до 35 и s от 0,2 до 0,8 приводит к снижению температуры от 808,088 °С до 557,753 °С).

2. При выборе числа N режущих выступов обычных прерывистых кругов по иным, чем температура, факторам (при малых периметрах кругов не удается изготовить большое количество N режущих выступов, т. к. с ростом числа N увеличивается трудоемкость механических работ по изготовлению кругов) необходимо пользоваться полученными рекомендациями по выбору скважности режущих выступов (табл. 1). Например, при $N=3$ необходимо выбирать коэффициент заполнения $s \geq 0,8$, а при $N=35$ – $s \geq 0,5$. Т. е. с ростом числа N требования к s уменьшаются. Например, при $N=300$ коэффициент заполнения s выбирают из условия $s \geq 0,2$ (т. к. при $s < 0,2$ температура будет дополнительно и значительно увеличиваться), в то время как при $N=3$ – $s \geq 0,9$ (при $s < 0,9$ температура будет дополнительно и значительно увеличиваться).

3. Установленная закономерность уменьшения температуры прерывистого шлифования по мере увеличения численных значений N и s отражает наметившуюся тенденцию замены обычных прерывистых кругов соответствующими по габаритным размерам высокопористыми шлифовальными кругами, отдельные режущие зерна которых эквивалентны режущим выступам микропрерывистого шлифовального круга. При большом количестве режущих зерен (на порядок и больше числа режущих выступов обычного прерывистого круга), расположенных на периферии высокопористого круга, требования к коэффициенту заполнения окружного шага уменьшаются (см. п. 2). Эта тенденция характеризует переход от макро- к микропрерывистости в технологии изготовления абразивного инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агасарян Р.Р. Абразивная обработка закаленных сталей типа 9Х (на примере обработки рабочих валков холодной прокатки). Ереван: Айастан, 1971. 128 с.

2. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
3. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки. Киев: Лыбидь, 1991. 240 с.
4. Якимов А.В., Ткаченко Б.О., Зимин С.Г. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин. Одесса: ОГПУ, 1997. 272 с.
5. Якимов А.В., Смирнов Л.П., Бояршинов Ю.А. Качество изготовления зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.
6. Якимов А.В., Паршаков А.Н., Свирцев В.И., Ларшин В.П. Управление процессом шлифования. Киев: Техніка, 1983. 184 с.
7. Напарьин Ю.А., Якимов А.В., Ярмонов Н.А., Паршаков А.Н. К вопросу о влиянии формы теплового импульса при прерывистом шлифовании на распределение температур в теле // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ, 1972. С. 45–52.
8. Судариков А.С., Якимов А.В., Кудашкин В.Н. Расчет температурного поля при прерывистом шлифовании // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ, 1972. С. 53–60.
9. Паршаков А.Н., Паньков Л.А. К расчету температурных полей при прерывистом шлифовании с малым временем действия источника // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ, 1972. С. 77–79.
10. Гордеев А.В. К расчету геометрии прерывистых шлифовальных кругов // Повышение надежности и долговечности изделий машиностроения: тезисы докладов конф. Пермь: ППИ, 1972. С. 105–106.
11. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
12. Старков В.К., Рябцев С.А., Горин Н.А. Качество обработки хвостовиков турбинных лопаток при глубинном шлифовании высокоструктурными кругами // Методы повышения технологических возможностей металлообрабатывающего оборудования с ЧПУ: сб. науч. трудов. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 51–55.
13. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки труднообрабатываемых материалов. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 359 с.
14. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 167 с.
15. Лищенко Н.В. Исследование влияния смазочно-охлаждающей жидкости на температуру шлифования // Труды Одесского политехнического университета. 2011. № 2. С. 80–86.
16. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
17. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. М.: Машиностроение, 1974. 280 с.
18. Якимов А.В. Прерывистое шлифование. Киев: Вища школа, 1986. 175 с.
19. Якимов А.В., Царюк В.Н., Якимов А.А. Технология машиностроения. Одесса: Астропринт, 2001. 608 с.

20. Сипайлов В.А. Расчет времени теплового насыщения при шлифовании // Физико-математические науки: сб. науч. трудов. № 21. Пермь: ППИ, 1966. С. 18–27.
- REFERENCES**
1. Agasaryan R.R. *Abrazivnaya obrabotka zakalennykh staley tipa 9X (na primere obrabotki rabochikh valkov kholodnoy prokatki)* [Abrasive treatment of hard steel of 9X type (on the example of treatment of cold reduction work rolls)]. Erevan, Ayastan Publ., 1971, 128 p.
 2. Maslov E.N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory of materials grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 320 p.
 3. Yakimov A.V., Slobodyanik P.T., Usov A.V. *Teplofizika mekhanicheskoy obrabotki* [Thermophysics of mechanical treatment]. Kiev, Lybid' Publ., 1991, 240 p.
 4. Yakimov A.V., Tkachenko B.O., Zimin S.G. *Osnovy teorii teplovykh yavleniy pri shlifovanii detaley mashin* [General theory of thermal phenomena during machine parts grinding]. Odessa, OGPU Publ., 1997, 272 p.
 5. Yakimov A.V., Smirnov L.P., Boyarshinov Yu.A. *Kachestvo izgotovleniya zubchatykh koles* [Quality of production of gear wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 191 p.
 6. Yakimov A.V., Parshakov A.N., Svirshchev V.I., Larshin V.P. *Upravlenie protsessom shlifovaniya* [Grinding process control]. Kiev, Tekhnika Publ., 1983, 184 p.
 7. Naparyin Yu.A., Yakimov A.V., Yarmonov N.A., Parshakov A.N. On the problem of influence of heat impulse form during interrupted grinding on temperature distribution within a body. *Tezisy dokladov konf. "Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti izdeliy mashinostroeniya"*. Perm', PPI Publ., 1972, pp. 45–52.
 8. Sudarikov A.S., Yakimov A.V., Kudashkin V.N. Calculation of temperature field during interrupted grinding. *Tezisy dokladov konf. "Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti izdeliy mashinostroeniya"*. Perm', PPI Publ., 1972, pp. 53–60.
 9. Parshakov A.N., Pan'kov L.A. On the calculation of temperature fields during interrupted grinding with little source operation time. *Tezisy dokladov konf. "Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti izdeliy mashinostroeniya"*. Perm', PPI Publ., 1972, pp. 77–79.
 10. Gordeev A.V. On the calculation of geometry of interrupted grinding wheels. *Tezisy dokladov konf. "Povyshenie nadezhnosti i dolgovechnosti izdeliy mashinostroeniya"*. Perm', PPI Publ., 1972, pp. 105–106.
 11. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding by high-porous wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 688 p.
 12. Starkov V.K., Ryabtsev S.A., Gorin N.A. Quality of treatment of turbine blade roots during deep grinding by high-structure wheels. *Sbornik nauch. trudov "Metody povysheniya tekhnologicheskikh vozmozhnostey metalloobrabatyvayushchego oborudovaniya s ChPU"*. Ufa, UGATU Publ., 2010, pp. 51–55.
 13. Makarov V.F. *Sovremennyye metody vysokoeffektivnoy obrabotki trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Modern methods of high-efficiency abrasive treatment of hard-to-machine materials]. Perm', Permsky nats. issled. politekhn. universitet Publ., 2013, 359 p.
 14. Sipaylov V.A. *Teplovye protsessy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverkhnosti* [Thermal processes during grinding and the product quality management]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 167 p.
 15. Lishchenko N.V. Investigation of metal-working coolant's influence on the grinding temperature. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 80–86.
 16. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Teploprovodnost tverdykh tel* [Conduction of heat in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 487 p.
 17. Korchak S.N. *Proizvoditelnost protsessa shlifovaniya stalnykh detaley* [Processing rate of steel parts grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 280 p.
 18. Yakimov A.V. *Preryvistoe shlifovanie* [Interrupted grinding]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1986, 175 p.
 19. Yakimov A.V., Tsaryuk V.N., Yakimov A.A. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Manufacturing engineering]. Odessa, Astroprint Publ., 2001, 608 p.
 20. Sipaylov V.A. Calculation of thermal saturation time during grinding. *Sbornik nauch. trudov "Fiziko-matematicheskie nauki"*. Perm', PPI Publ., 1966, no. 21, pp. 18–27.

TEMPERATURE DURING GRINDING BY INTERRUPTED AND HIGHLY POROUS GRINDING WHEELS

© 2015

N.V. Lishchenko, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physics and materials sciences”
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa (Ukraine)

V.P. Larshin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical engineering technology”
Odessa National Polytechnic University, Odessa (Ukraine)

Keywords: interrupted and highly porous grinding wheels; macro- and micro-intermittence; number of cutting ledges; duty cycle for circular pitch; grinding temperature; grinding wheel grains.

Abstract: The authors suggested a common approach and work technique for temperature determination while grinding by plain, interrupted and highly porous grinding wheels on the basis of presentation of thermal process during grinding as a single heating and cooling cycle (plain wheels) or as a complex of such cycles (interrupted and highly porous wheels). According to this presentation, the authors suggested distinguishing macro- and micro-interrupted grinding, respectively, for grinding by interrupted (macro-interrupted) and highly porous (micro-interrupted) grinding wheels. In this case, the principle of superposition of thermal fields caused by positive and negative heat source successive exposure on the processed surface at macro- and micro-levels is used according to the frequency of this exposure. The study showed that the increase of number of cutting ledges on the interrupted wheel at a constant duty cycle for these ledges circular pitch (the inverse value for pulse relative duration of heat flow) causes the reduction of grinding temperature under otherwise equal conditions. Equal grinding rate of wheels of compared designs is one of these conditions. The same trend for grinding temperature reduction takes place when increasing the duty cycle for circular pitch at a constant number of cutting ledges. The authors determined that the increase in quantity of cutting ledges on the wheel periphery causes the decrease of duty cycle influence on the temperature. The regularity of interrupted grinding temperature decrease during the increase of cutting ledges number and duty cycle (under otherwise equal conditions) confirms the validity of the discernible trend for replacing the plain interrupted wheels (macro-interrupted) with the highly porous grinding wheels (micro-interrupted) appropriate by overall dimensions. The authors present the technique for grinding temperature determination while grinding by the highly porous wheels which can be used when designing the optimal composition for these wheels and selecting their components.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ АЛМАЗНОМ ЗАТАЧИВАНИИ

© 2015

Д.В. Лобанов, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения»
А.С. Янюшкин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»
П.В. Архипов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»
Братский государственный университет, Братск (Россия)

Ключевые слова: алмазная обработка; твердосплавный инструмент; качество обработки; моделирование напряжений и деформаций.

Аннотация: Отражено влияние на процесс резания, износ режущего инструмента во время работы и качество обработанных изделий технологии формирования режущих поверхностей и лезвия инструмента. Отмечена актуальность этой проблемы при затачивании композиционных инструментальных материалов, где наблюдается хрупкое разрушение инструментального материала под действием сил резания. Обозначена необходимость детального изучения напряженно-деформированного состояния режущей кромки и поверхностей вблизи ее при формообразовании (затачивании) инструмента со специфической для обработки композиционных неметаллических материалов геометрией. Рассмотрены вопросы формообразования качественного лезвия режущего инструмента из высокопрочных материалов при алмазном затачивании. Представлены начальные и граничные условия проведения исследований и методика создания расчетной модели напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине. Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне затачивания пластины из сплава высокой твердости была использована вычислительная модель, разработанная с учетом механики повреждаемых сред. Расчетная модель реализована на примере твердосплавных режущих элементов марки ВК6, обладающих специфической геометрией, характерной для инструмента по обработке изделий из композиционных неметаллических материалов. Проведена оценка исследуемых параметров при различном сочетании усилий резания, скорости и температуры. Выявлены параметры и условия затачивания для обеспечения удовлетворительного состояния лезвия режущих инструментов, оснащенных твердосплавными режущими элементами. Таким требованиям могут отвечать комбинированные методы электроалмазной обработки: алмазное затачивание с непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга; электрохимическое алмазное затачивание; комбинированный метод, сочетающий электрохимическое алмазное затачивание с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга.

ВВЕДЕНИЕ

Качество готовой продукции в машиностроении зависит от многих взаимосвязанных факторов. Немаловажная роль при этом отводится режущему инструменту. Во внимание следует принимать не только надежность и точность его изготовления, но и качество изготовления (формообразования) режущего лезвия. Качественно сформированные режущие поверхности инструмента оказывают значительное влияние на процесс резания, износ режущего инструмента и качество обработанных поверхностей изделий [1–7]. Особо актуальна эта проблема при затачивании высокопрочных инструментальных материалов, где наблюдается хрупкое разрушение инструментального материала под действием сил резания.

Анализ технологий изготовления (формообразования) твердосплавных режущих элементов инструмента со специфической геометрией (например, для обработки композиционных неметаллических материалов) показал, что при подготовке инструмента к работе большое значение имеет качество формирования режущего лезвия, сведение к минимуму дефектов, возникающих на нем и непосредственно в его близи [8]. Кроме того, существенным фактором, влияющим на износостойкость инструмента, является уровень остаточных напряжений на поверхности и в приповерхностных слоях на режущем лезвии после операции затачивания. Практический интерес представляет изучение закономерностей формирования напряженно-деформированного состоя-

ния в элементах режущего инструмента из твердых материалов при затачивании алмазным кругом [3; 9–12].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для моделирования процесса затачивания твердосплавного режущего элемента рассмотрим схему обработки и действующие при этом динамические составляющие процесса (рис. 1).

Затачиваемый режущий элемент, имеющий форму клина с углом заострения β , закреплен неподвижно. Шлифовальный круг (в данном случае чашечный конический) вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью V (м/с). Кроме того, шлифовальный круг поступательно движется в сторону затачиваемого режущего элемента с постоянной скоростью, равной величине продольной подачи $S_{пр}$ (м/мин). В процессе затачивания с поверхности режущего элемента снимается слой материала, равный величине поперечной подачи $S_{поп}$ (мм/дв. ход).

В результате кинематического воздействия абразивного инструмента на обрабатываемую заготовку в зоне резания возникают технологические силы, которые достаточно просто измерить с высокой точностью.

Линейные скорости смещения поверхностного слоя материала зависят от радиальных размеров шлифовального круга в месте его непосредственного контакта с затачиваемым режущим элементом.

Примем некоторые допущения для оценки напряженно-деформированного состояния режущей кромки

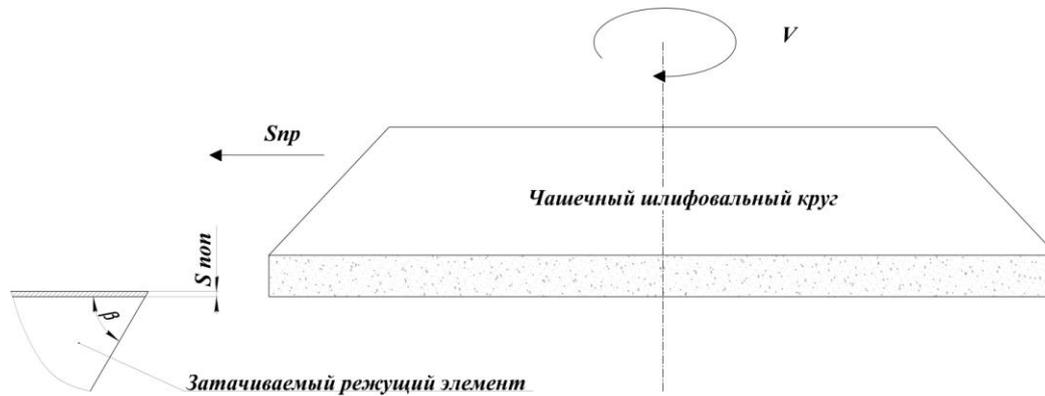


Рис. 1. Схема затачивания режущего элемента

и поверхностей вблизи ее при затачивании. Материал режущего элемента считается однородным сплошным и анизотропным. В процессе обработки он испытывает незначительные деформации. Разрушение материала считается хрупким, то есть при превышении предела прочности происходит отслаивание материала. Технологические силы, действующие на режущий элемент со стороны абразивного инструмента, распределены равномерно по передней поверхности вдоль режущей кромки затачиваемого инструмента. Предполагается, что режущая кромка является абсолютно острой (радиус округления равен нулю) и внешние силы распределены равномерно по ширине резца, а задняя поверхность не нагружена.

Упрощенно процесс шлифования рассматриваем как результат воздействия на обрабатываемую поверхность движущегося индентора (абразивного зерна). В действительности поверхность абразивного круга представляет собой распределенные по объему зерна-абразивы неодинакового размера, геометрически отличающиеся друг от друга. Поэтому каждое отдельное зерно снимает малую часть материала, а существенное влияние оказывает рабочий диаметр круга и скорость сдвига в месте обработки. Допущение об однородности поверхности круга может приводить к завышенным значениям параметра поврежденности вблизи области шлифования. Тем не менее распределение повреждений в режущем лезвии должно соответствовать данным, реализуемым на практике.

Уровень остаточных напряжений и степень поврежденности твердых материалов в зоне шлифования зависят от большого количества технологических и физических факторов. Определение рационального сочетания параметров процесса шлифования зависит не только от физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и конкретных геометрических размеров изделия.

Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне затачивания пластины из сплава высокой твердости была использована вычислительная модель, разработанная с учетом механики повреждаемых сред [8; 13].

Модель позволяет оценить давления, интенсивность напряжений и поврежденность, возникающие в объеме пластины в процессе алмазного затачивания.

Для численной реализации модели в качестве примера исследуем систему композиционного твердого

сплава марки ВК6, в состав которого входят карбиды вольфрама WC и кобальт Co в качестве связующего. Экспериментальные данные о механических характеристиках сплавов WC-Co широко представлены в литературе [3; 14; 15]. Анализ данных свидетельствует о том, что в сплавах WC-Co практически отсутствует зависимость прочности от давления.

Начальные условия выбраны в предположении об отсутствии во всей исходной области внутренних напряжений и равномерном распределении температуры.

Моделирование проводилось для граничных условий, имитирующих взаимодействие обрабатываемой пластины с алмазным кругом.

Для этого была построена расчетная область, соответствующая обрабатываемой пластине из сплава (рис. 2).

Габаритные размеры пластины в расчетной модели были приняты равными: высота $c=3$ мм, ширина пластины $a=21$ мм, длина пластины $b=12$ мм, угол заострения $\beta=50^\circ$.

Для оценки закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния и повреждения в зоне шлифования в расчетах были зарегистрированы изменения данных параметров во времени в лагранжевых точках 1, 2, 3 (рис. 2). Расчетные значения интенсивности сдвиговых напряжений, возникающих при шлифовании с заданными комбинациями распределенного по обрабатываемой поверхности прижимающего усилия резания (10 Н, 100 Н, 300 Н), линейной скорости сдвига материала с обрабатываемой поверхности (15 м/с, 33 м/с, 45 м/с), температуры (430 °С, 1000 °С) в зоне шлифования.

Решение вычислительной модели выполнено с помощью конечно-разностного метода, реализованного в решателе программного комплекса *AUTODYN TM / ANSYS Workbench – 13*.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведена оценка исследуемых параметров при различном сочетании усилий резания, скорости и температуры. Примеры распределения давления и интенсивности напряжений в теле исследуемой пластины представлены на рис. 3 и рис. 4.

Наибольший интерес, с точки зрения качества подготовки режущего лезвия, имеет распределение значений параметра поврежденности вблизи режущей кромки. Пример распределения поврежденности в теле

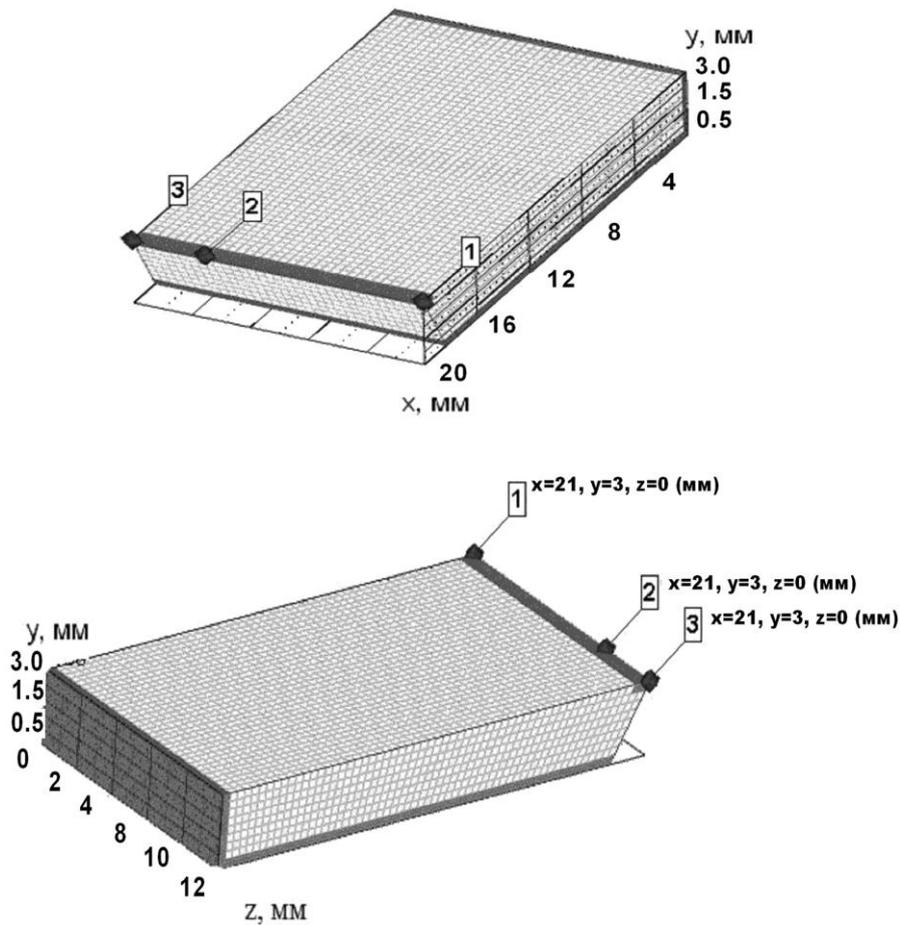


Рис. 2. Расчетная модель затачиваемой твердосплавной пластины

$F=100 \text{ Н}$, $V=33 \text{ м/с}$, $T=430^\circ\text{C}$

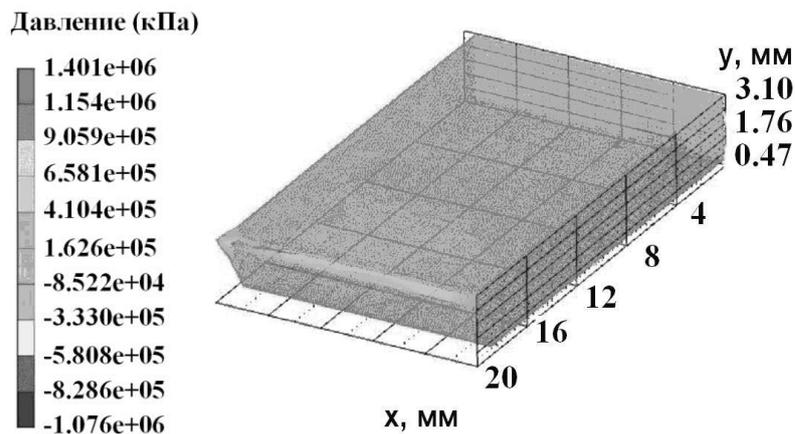


Рис. 3. Распределение давления в теле пластины ВК6 в процессе алмазного шлифования

исследуемой пластины и результаты оптического исследования поверхностей твердосплавных элементов после затачивания в тех же условиях представлены на рис. 5.

Сопоставление данных, полученных в одинаковых условиях в результате экспериментальных исследований и при численной реализации модели, выявило расхождения, не превышающие 10...15 %, что позволяет сделать вывод об адекватности полученной модели [8].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложена адекватная физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения твердых композиционных материалов системы WC-Co, позволяющая проводить оценку напряженно-деформированного состояния режущего элемента при алмазном затачивании. Расчетная модель реализована на примере твердосплавных режущих элементов марки ВК6,

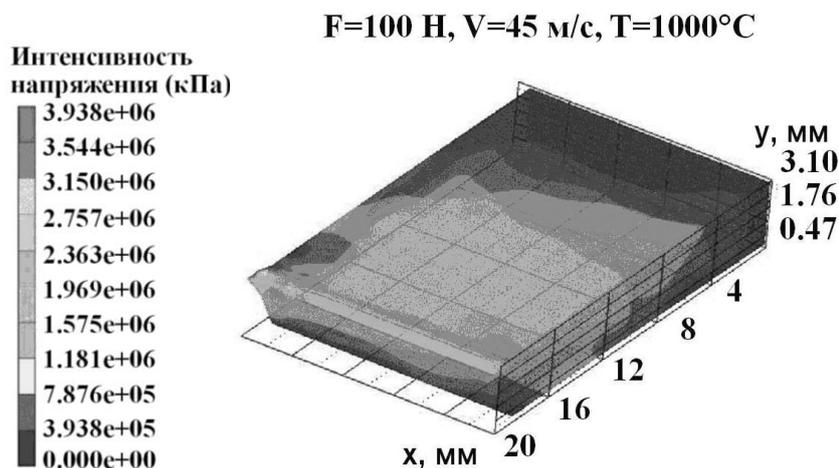


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений в теле пластины ВК6 в процессе алмазного шлифования

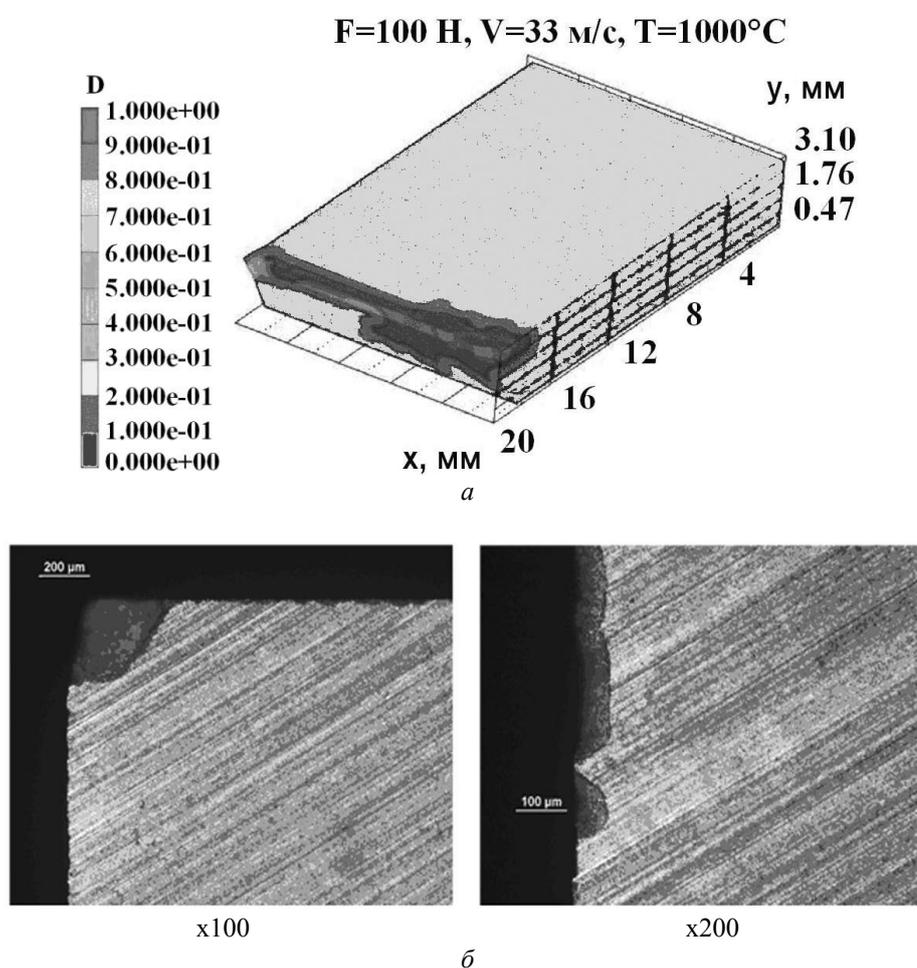


Рис. 5. Расчетное распределение параметра поврежденности в теле пластины ВК6 (а) и оптическое исследование участков поверхности режущих элементов после затачивания в тех же условиях (б)

обладающих специфической геометрией, характерной для инструмента по обработке изделий из композиционных неметаллических материалов. Модель может быть адаптирована и для других композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, что позволит выполнять оценку напряженно-деформированного состояния при различных со-

четаниях абразивного инструмента и обрабатываемых материалов.

Физико-математическая модель позволила выявить формирование сложного напряженного состояния в объеме пластины при взаимодействии с алмазным кругом. При силах резания до 100 Н серьезных разрушений режущей кромки не наблюдается. Зонами наибольшей

концентрации напряжений являются участки режущей кромки по краям образца режущего элемента, где могут проследиваться частичные разрушения. При достижении сил резания свыше 100 Н и скоростей резания более 33 м/с наблюдается разрушение режущей кромки на протяжении всей длины лезвия.

Зоной опасных напряжений, приводящих к разрушению, является контактная площадка затачиваемой поверхности с абразивным инструментом. С удалением от режущей кромки на величину, превышающую вдвое размер контактирующих поверхностей, напряжения снижаются и не способствуют возникновению серьезных дефектов.

Критическими, находящимися вблизи области обработки и вызывающими интенсивное развитие микроповреждений в приповерхностных слоях и зонах, являются условия шлифования (скорость – сила резания): 15 м/с – 300 Н, 33 м/с – 300 Н, 45 м/с – 300 Н.

Результаты моделирования процесса шлифования пластины из сплава ВК6 при линейной скорости ~ 45 м/с и прижимающим усилию 300 Н свидетельствуют о возможности образования повреждений в объеме пластины на глубине свыше 1 мм под обрабатываемой поверхностью.

Анализ данных по распределению параметра поврежденности в обрабатываемой пластине свидетельствует о том, что при температуре 1000 °С критические условия для возникновения микроповреждений в приповерхностных слоях возникают при более низких силах резания, чем при температуре 430 °С.

Следовательно, для затачивания алмазным кругом режущих элементов из композиционных инструментальных материалов группы ВК (WC-Co) со специфической геометрии и габаритными размерами, предназначенных для инструмента по обработке композиционных неметаллических материалов, рекомендуется добиваться линейных скоростей на контактирующих поверхностях в пределах от 33 м/с до 45 м/с.

Для достижения удовлетворительного качества подготовленных режущих поверхностей и лезвия инструмента из твердых сплавов необходимо применять методы и условия обработки, гарантирующие силы резания, не превышающие 100 Н. Таким требованиям могут отвечать комбинированные методы электроалмазной обработки.

Согласно ранее проведенным исследованиям, экспериментально определенные силы резания при различных методах алмазного шлифования твердого сплава составляют [14; 15]:

- традиционное алмазное затачивание без применения электрических процессов $F=200$ Н;
- алмазное затачивание с непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга $F=80$ Н;
- электрохимическое алмазное затачивание $F=55$ Н;
- комбинированный метод, сочетающий электрохимическое алмазное затачивание с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга $F=30$ Н.

Следовательно, последние три метода могут быть рекомендованы для качественного формообразования твердосплавных режущих элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Е.В. Повышение работоспособности сборных режущих инструментов на основе исследования напряженно-деформированного состояния и прочности сменных твердосплавных пластин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2003. 34 с.
2. Артамонов Е.В., Чернышов М.О. Модель разрушения и прочности твердосплавных элементов сборных сверл // Омский научный вестник. 2014. № 1 (127). С. 44–46.
3. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Тверяков А.М., Утешев М.Х. Механика разрушения и прочность сменных режущих пластин из твердых сплавов. Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. 148 с.
4. Силич А.А., Утешев М.Х., Некрасов Р.Ю., Путилова У.С., Некрасов Ю.И. Геометрические параметры и модель разрушений режущего лезвия инструмента // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2012. № 2. С. 108–113.
5. Некрасов Р.Ю., Путилова У.С., Некрасов Ю.И. Диагностика процессов нагружения и накопления повреждений инструмента при обработке на станках с ЧПУ. Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. 120 с.
6. Петрушин С.И., Баканов А.А., Махов А.В. Геометрический и силовой анализ сборных сверл со сменными многогранными пластинами // Технология машиностроения. 2007. № 10. С. 27–30.
7. Petrushin S.I. Calculation of thermal residual stresses in multilayer composite materials // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 379. P. 95–100.
8. Лобанов Д.В. Разработка и реализация технологических методов создания, изготовления и выбора фрезерного инструмента для эффективной обработки композиционных неметаллических материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2013. 36 с.
9. Деренговский А.Г. Напряженно-деформированное состояние линейно-упругого материала в окрестности вершины остроугольного концентратора напряжений : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Орел, 2007. 19 с.
10. Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Деренговский А.Г. Конечность напряжений в окрестности вершины плоского клина // Механика XXI века. 2010. № 9. С. 89–93.
11. Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю. Модель состояния поверхностного слоя твердого тела // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4-4. С. 1876–1878.
12. Шоркин В.С. Напряженно-деформированное состояние в окрестности концентратора напряжений // Прикладные проблемы прочности и пластичности. 1996. Т. 54. С. 207–213.
13. Скрипняк В.В., Лобанов Д.В., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине из композиционного материала (WC-Co) при алмазном затачивании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. № 4. С. 99–110.
14. Янюшкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. М.: Машиностроение, 2003. 242 с.

15. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 336 с.

REFERENCES

1. Artamonov E.V. *Povyshenie rabotosposobnosti sbornikh rezhushchikh instrumentov na osnove issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti smennikh tverdosplavnykh plastin*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Efficiency improvement of modular cutting tools based on studies of the deflected mode and strength of replaceable carbide inserts]. Tomsk, 2003, 34 p.
2. Artamonov E.V., Chernyshov M.O. Model of fracture and strength of carbide cutting element of assembled drills. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2014, no. 1 (127), pp. 44–46.
3. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Tveryakov A.M., Uteshev M.Kh. *Mekhanika razrusheniya i prochnost' smennikh rezhushchikh plastin iz tverdikh splavov* [Fracture mechanics and strength of interchangeable carbide inserts]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2013, 148 p.
4. Silich A.A., Uteshev M.N., Nekrasov R.Yu., Putilova U.S., Nekrasov Yu.I. Geometric parameters and a model of destructions produced by tool cutting end. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz*, 2012, no. 2, pp. 108–113.
5. Nekrasov R.Yu., Putilova U.S., Nekrasov Yu.I. *Diagnostika protsessov nagruzheniya i nakopleniya povrezhdeniy instrumenta pri obrabotke na stankakh s ChPU* [Diagnostics and processes of loading and damage accumulation in the tool processing with a CNC machine]. Tyumen, TyumGNGU Publ., 2013, 120 p.
6. Petroushin S.I., Bakanov A.A., Makhov A.V. Geometrical and force evaluation of removable-facet-plated build-up drills. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no. 10, pp. 27–30.
7. Petrushin S.I. Calculation of thermal residual stresses in multilayer composite materials. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 379, pp. 95–100.
8. Lobanov D.V. *Razrabotka i realizatsiya tekhnologicheskikh metodov sozdaniya, izgotovleniya i vybora frezernogo instrumenta dlya effektivnoy obrabotki kompozitsionnykh materialov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Development and implementation of technological methods of creation, production and selection of cutting tools for the efficient processing of composite non-metallic materials]. Novosibirsk, 2013, 36 p.
9. Derengovsky A.G. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie lineynno-uprugogo materiala v okrestnosti vershiny ostrougol'nogo kontsentratora napryazheniy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Deflected mode of linear-elastic material in the vicinity of the top of an acute stress concentrator]. Orel, 2007, 19 p.
10. Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu., Derengovskiy A.G. Voltage finiteness in the vicinity of the top of a flat wedge. *Mekhanika XXI veku*, 2010, no. 9, pp. 89–93.
11. Shorkin V.S., Frolenkova L.Yu. The model of thermoelastic state of the surface layer of a solid. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4-4, pp. 1876–1878.
12. Shorkin V.S. Deflected mode in the vicinity of a stress concentrator. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti*, 1996, vol. 54, pp. 207–213.
13. Skripnyak V.V., Lobanov D.V., Skripnyak V.A., Yanyushkin A.S. Modeling of the stress-strain state in a plate of a composite material (WC – Co) at diamond grinding. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2013, no. 4, pp. 99–110.
14. Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya kombinirovannogo elektroalmaznogo zatachivaniya tverdosplavnykh instrumentov* [Technology of combined electro-diamond sharpening of carbide tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 242 p.
15. Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya elektroalmaznogo zatachivaniya rezhushchikh instrumentov i metody ee realizatsii* [Technology of electro-diamond sharpening of carbide tools and methods of its implementation]. Stary Oskol, TNT Publ., 2013, 336 p.

DEFLECTED MODE OF HARD-ALLOY CUTTING ELEMENTS AT DIAMOND SHARPENING

© 2015

D.V. Lobanov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical Engineering”
A.S. Yanyushkin, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair “Mechanical Engineering”
P.V. Arkhipov, Ph.D. (Engineering), assistant professor of Chair “Mechanical Engineering”
Bratsk State University, Bratsk (Russia)

Keywords: diamond machining; hard-alloy tool; processing quality; simulation of stresses and deformations.

Abstract: The paper shows the influence of the technology forming the cutting surfaces and blades of the tools on the cutting process and tool wear during operation, and the quality of the processed products. The importance of this problem is emphasized for sharpening tools made of composite materials when a brittle fracture of the tool material occurs under the influence of cutting forces. The authors communicate the necessity a detailed study of deflected mode of the cutting edge and surfaces near it during formation (sharpening) of a tool with a geometry specific for the processing of non-metallic composite materials. The paper considers the questions of shaping the quality cutting blade of a tool made of high-strength materials in diamond machining. Initial and boundary conditions for research are presented as well as methodology for creation of a computational model of deflected mode in the sharpened plate. To research the formation of the deflected mode in the sharpened plate made of hard alloy, there has been used a computational model developed with account for mechanics of the damaged environment. The computational model has been implemented on the example of carbide cutting elements of the brand VK6 (WC + Co) having a specific geometry typical for a tool used for processing the items made of non-metallic composite materials. Evaluation of the test parameters in various combinations of cutting force, velocity and temperature has been performed. Sharpening parameters and terms that ensure a satisfactory condition of the cutting tools blade with carbide cutting elements are determined. Such requirements can be met by combined methods of electro-diamond machining: diamond grinding with continuous electrochemical dressing of the diamond wheel surface; electrochemical diamond grinding; a mixed method which combines electrochemical diamond grinding with simultaneous electrochemical dressing of the diamond wheel surface.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ РЕЗАНИЯ

© 2015

Н.П. Мазур, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»
Хмельницкий национальный университет, Хмельницкий (Украина)

Ключевые слова: источники тепла; интенсивность тепловых потоков; температура резания; деформация; трение.

Аннотация: В статье приводится подробный аналитический метод расчетов температурных полей для процесса резания лезвийным инструментом. Детально рассматриваются формы тепловых источников при резании, возможность и необходимость схематизации как источников тепла, так и формы взаимодействующих тел. Расчет температуры в зоне первичной пластической деформации выполнен с учетом взаимного влияния температуры на величину сдвиговых напряжений в этой зоне. Установлено, что закон распределения интенсивности источника трения по задней поверхности обуславливается характером изменения касательных напряжений трения и мало отличается от равномерного. Предложено точное решение задачи расчета температуры в полупространстве от действия прямоугольного источника тепла постоянной интенсивности. Таким образом, стало возможным определить постоянные интенсивности тепловых потоков на передней и задней поверхностях. Проведена проверка гипотезы о постоянстве этих интенсивностей тепловых потоков. Для этого каждый итоговый тепловой источник был представлен как комбинация элементарных равномерных источников тепла. Исследованиями установлена большая неравномерность распределения интенсивности тепловых источников, которые действуют на поверхностях режущего инструмента. Это дало возможность выявить новые закономерности распределения температуры на передней и задней поверхностях инструмента при различных комбинациях коэффициентов теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, а также износа инструмента. Установлена существенная роль заторможенного тела на передней поверхности на величину и направление тепловых потоков на передней и задней поверхностях – в инструмент или в заготовку – и в конечном результате – на температуру контактных поверхностей режущего инструмента. Это позволило выработать рекомендации по выбору оптимального инструментального материала для обработки заготовок с различной теплопроводностью.

ВВЕДЕНИЕ

Основным недостатком всех экспериментальных методов является сложность, а иногда и невозможность с их помощью получить достоверные температурные поля в стружке, заготовке и режущем лезвии инструмента [1; 2]. Широко распространенный сейчас метод конечных элементов [3; 4; 5] при всей своей наглядности требует значительных компьютерных ресурсов и пригоден для получения обобщающих зависимостей только в достаточно простых случаях. Поэтому многими отечественными и зарубежными исследователями были разработаны аналитические методы расчетов температурных полей [6–9]. Среди них самое большое распространение нашли: метод непосредственного решения дифференциального уравнения теплопроводности [6], метод источников тепла и др. Метод источников тепла позволяет сравнительно простыми математическими способами получать приемлемые инженерные решения по определению температурных полей [9–14]. Однако попытки его применения для реальных процессов не всегда были успешными через игнорирование многих деталей процесса резания и существующие в литературе ошибки. Поэтому целью работы является создание максимально детальной инженерной методики аналитического расчета тепловых полей для процесса лезвийной обработки, учитывающего взаимосвязи явлений, происходящих в зоне резания.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТОВ

Чтобы сложный процесс распространения теплоты при резании металлов сделать доступным математическому описанию, его необходимо схематизировать, вы-

деляя главные особенности, пренебрегая второстепенными. Схематизация, которая выполняется как по отношению форм источников тепла, так и к упрощению форм тел зоны резания, наиболее детально была разработана в работах А.Н. Резникова, С.С. Силина и др. [8–10; 12; 14; 15] (рис. 1).

Исследования по изучению деформаций в зоне резания [1; 9–12; 16; 17] показывают, что области, в которых происходит тепловыделение, с повышением скорости резания занимают все меньший объем. Это дает основание для практически применяемых режимов резания принимать источники теплообразования сосредоточенными плоскими или ленточными. Поэтому теплоту деформации можно представить в виде плоского источника интенсивностью q_d , расположенного на плоскости сдвига OM (см. рис. 1). Часть этой теплоты (которая определяется коэффициентом b^*) идет в заготовку, создавая источник $(1-b^*)q_d$, показанный на рис. 1, где для удобства анализа заготовка, стружка и резец раздвинуты. Другая часть интенсивностью $b^* \times q_d$ представляет ту часть теплоты деформации, которая выносятся стружкой.

Теплота трения на передней поверхности может быть представлена в виде плоского источника переменной интенсивности q_{1T} , расположенного на площадке размерами $l_1 \times b$, а на задней поверхности – в виде плоского источника интенсивностью q_{2T} , расположенного на площадке размерами $l_2 \times b$.

На контактных поверхностях резец обменивается теплом со стружкой и поверхностью резания. С целью упрощения картины в первом приближении теплообмен резца со стружкой и заготовкой представляется, соответственно,

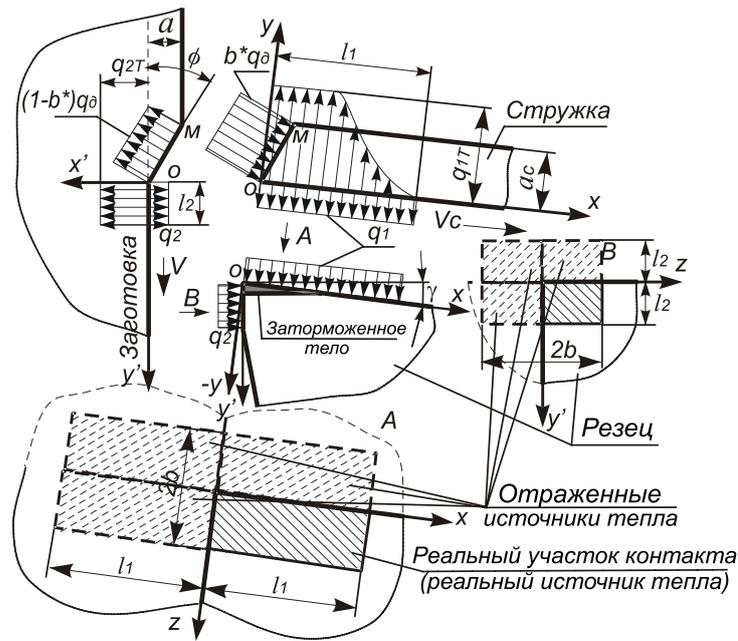


Рис. 1. Схема действия тепловых источников в зоне резания

в виде источников постоянной интенсивности q_1 и q_2 [10; 12; 14]. Каждый из тепловых потоков q_1 и q_2 может быть направлен в инструмент ($q > 0$) или из него ($q < 0$). Предполагается также, что за пределами источников и стоков все поверхности заготовки, стружки и резца не отдают теплоты в окружающую среду. Как установлено, при резании без принудительного охлаждения этим предположением вносится незначительная погрешность в определение температур [11; 15].

Определенной схематизации подвергается также и форма тел зоны резания. Выполняя отражение стружки и источников, на ней действующих относительно ее боковых сторон, удастся представить эти источники как ленточные, что действуют на поверхности стержня бесконечной длины [11; 15]. Реальное режущее лезвие с тепловыми источниками q_1 и q_2 отражается относительно вспомогательной задней поверхности и сводится к бесконечному клину, на поверхностях которого действуют плоские источники размерами $(2b) \times l_1$ и $(2b) \times l_2$, или к полупространствам с источниками $(2b) \times 2l_1$ и $(2b) \times 2l_2$.

Тогда температура на поверхности контакта между стружкой и инструментом (со стороны стружки) определяется зависимостью [10]:

$$\theta_{IC} = (1 + C) \cdot \theta_0 + \theta_{IT} - \theta_1, \quad (1)$$

где θ_0 – температура, которая возникает вследствие деформации материала в зоне первичной пластической деформации;

θ_{IT} – температура, создаваемая источником тепла интенсивностью q_{IT} ;

θ_1 – снижение температуры, создаваемое стоком тепла в резец интенсивностью q_1 ;

C – коэффициент, который учитывает подогрев срезаемого слоя за счет предыдущего хода инструмента. Его значение может быть определено из [10]:

$$C \approx \begin{cases} 0,23 \cdot \exp[-40 \cdot (0,15 - \varphi_0)^2] & \text{при } 0,001 < \varphi_0 < 0,15 \\ 0,23 \cdot \exp[-3,5 \cdot (\varphi_0 - 0,15)^2] & 0,15 < \varphi_0 < 2, \end{cases}$$

где $\varphi_0 = 7,98 \cdot 10^{-2} \cdot V \cdot a^2 / (\omega \cdot d)$;

V, a, d – соответственно, скорость резания (м/с), толщина срезаемого слоя (м) и диаметр обработки (м); ω – коэффициент температуропроводности материала стружки, м²/с.

Рассмотрим методику определения каждого составляющего. Общее количество теплоты деформации в зоне сдвига равняется работе пластической деформации [7]:

$$Q_d = E_d = \bar{\tau}_\phi \cdot \varepsilon \cdot a \cdot b \cdot V,$$

где $\varepsilon = ctg\phi + tg(\phi - \gamma)$ – относительный сдвиг стружки;

$\bar{\tau}_\phi$ – среднее касательное напряжение в зоне сдвига.

Относя Q_d к площади поверхности сдвига ($a \times b \times \sin\phi$), получим формулу для определения интенсивности теплового потока деформации q_d :

$$q_d = \bar{\tau}_\phi \cdot \varepsilon \cdot V \cdot \sin\phi.$$

Поскольку тепло деформации распределяется между стружкой и заготовкой, то на торец стружки будет действовать только часть источника q_d , интенсивность которого равняется $b^* \times q_d$, где коэффициент b^* определяется путем решения балансовой задачи между стружкой и заготовкой [10]:

$$b^* = \frac{1}{\left(1 + \frac{1,33 \cdot K_L}{K_{cu}} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \sin\phi}{V \cdot a}}\right)},$$

где K_L – коэффициент продольной усадки стружки;
 K_{cu} – коэффициент, который учитывает ограниченность ширины быстро движущегося теплового источника деформации [11].

Используя решение задачи из определения температуры от плоского быстро движущегося источника, который действует на торце неограниченного стержня [10], имеем:

$$\theta_\delta = \frac{b^* \cdot q_\delta \cdot \omega \cdot K_L}{\lambda \cdot V} = \frac{b^* \cdot \bar{\tau}_\phi \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot K_L \cdot \sin \phi}{\lambda}$$

или

$$\theta_\delta = \frac{b^* \cdot \bar{\tau}_\phi \cdot \varepsilon \cdot K_L \cdot \sin \phi}{C_V}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала стружки, Вт/мК;
 $C_V = \lambda / \omega$ – объемная теплоемкость материала стружки, Дж/м³К.

Установлено, что $\bar{\tau}_\phi$ определяется истинным сопротивлением разрыва обрабатываемого материала и температурой в области основных деформаций зоны сдвига [13; 17]:

$$\bar{\tau}_\phi = K_c \cdot S_b \cdot (1 - b_\theta \cdot \theta_\delta), \quad (3)$$

где $K_c \approx 0,97$ – коэффициент взаимосвязи между средними и максимальными касательными напряжениями в области сдвига;
 $S_b = R_m / (1 - 0,01Z)$ – истинное сопротивление разрыва, Па;
 R_m – предел прочности при растягивании, Па;
 Z – относительное сужение при разрыве, %;
 $b_\theta = 5 \times 10^{-4}$ – коэффициент, который учитывает влияние температуры на предел текучести, 1/°С.

Решив совместно формулы (2) и (3), после преобразований получим выражения для максимальной температуры вблизи верхней границы зоны стружкообразования и средних касательных напряжений $\bar{\tau}_\phi$ [18]:

$$\theta_\delta = \frac{\theta_S}{1 + b_\theta \cdot \theta_S},$$

$$\bar{\tau}_\phi = \frac{K_c \cdot S_b}{1 + b_\theta \cdot \theta_S},$$

где $\theta_S = \frac{b^* \cdot K_c \cdot S_b \cdot \varepsilon \cdot K_L \cdot \sin \phi}{C_V}$.

После подстановки в формулу для θ_S выражений для ε и K_L , а также $K_L = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\sin \phi}$ после упрощений будем иметь:

$$\theta_S = \frac{b^* \cdot K_c \cdot S_b \cdot \cos \gamma}{C_V \cdot \sin \phi}.$$

Температура θ_1 от действия быстро движущегося источника равномерной интенсивности q_1 (Вт/м²) на поверхности полупространства (стружки) в подвижной системе координат, связанной с источником, равняется [10]:

$$\theta_1 = \frac{2 \cdot q_1}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_1 \cdot K_L}{\pi \cdot V}} \cdot \tau_1 \cdot L_{MC}, \quad (4)$$

где l_1 – длина контакта стружки по передней поверхности, м;

$$\tau_1 = \begin{cases} \sqrt{\psi} & \text{при } \psi = x/l_1 \leq 1, \\ \sqrt{\psi} - \sqrt{\psi - 1} & \text{при } \psi = x/l_1 > 1, \end{cases} \quad (5)$$

где x – расстояние от центра системы координат источника тепла к рассматриваемой точке на передней поверхности;

L_{MC} – коэффициент, который учитывает влияние отраженных источников, какие вводятся из-за ограниченности толщины стружки [10].

$$L_{MC} = 1 \text{ при } \chi = \frac{K_L^2 \cdot a^2 \cdot V}{l_1 \cdot \omega} > 1,62;$$

$$L_{MC} = \frac{1,18}{\chi^{0,35}} \text{ при } \chi \leq 1,62.$$

Выражение для определения температуры θ_{IT} имеет вид, аналогичный формуле (4), с учетом сложного характера распределения интенсивности источника q_{IT} , которое учитывается введением коэффициента формы источника K_F [9]:

$$\theta_{IT} = \frac{2 \cdot q_{IT}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_1 \cdot K_L}{\pi \cdot V}} \cdot \tau_1 \cdot L_{MC} \cdot K_F, \quad (6)$$

где параметр τ_1 определяется аналогично (5).

Следует отметить, что в формуле (6) интенсивность источника q_{IT} может быть определена, исходя из характера распределения касательных напряжений трения q_{F1} вдоль контактного участка l_1 . Откуда:

$$q_{IT} = q_{F1} \cdot V / K_L.$$

Рассмотрим схему определения температуры на участке контакта между поверхностью резания и задней поверхностью инструмента (ЗПИ). Как и в предыдущем случае, температура в этой зоне $\theta_{2n.p.}$ (со стороны поверхности резания) определяется частью тепла деформации, которое перешло в заготовку, теплом от источника трения ЗПИ по поверхности резания q_{2T} и стоком тепла в инструмент интенсивностью q_2 . Отсюда получим [10]:

$$\theta_{2n.p.} = (1 + C) \cdot (\sqrt{\psi_{II}} - \sqrt{\psi_{II} - 1}) \cdot \theta_\delta + \theta_{2T} - \theta_2, \quad (7)$$

где $\psi_{II} = 1 + y' \cdot \text{tg} \phi / a$;

y' – расстояние от центра системы координат источника тепла к рассматриваемой точке на задней поверхности;

θ_{2T} – температура, создаваемая ленточным быстро движущимся источником q_{2T} .

Очевидно, что закон изменения интенсивности источника q_{2T} будет определять характер изменения температуры на ЗПИ. В разные времена его принимали равномерным, распределенным по прямоугольному [19], треугольному [12; 14] или экспоненциальному [10] закону. Как показали последние исследования, закон распределения интенсивности источника трения по задней поверхности обуславливается характером изменения касательных напряжений и мало отличается от равномерного [18]. Поэтому θ_{2T} рассчитываем аналогично, как и θ_{1T} :

$$\theta_{2T} = \frac{2 \cdot q_{2T}}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_2}{\pi \cdot V}} \cdot \tau_2,$$

где l_2 – длина контактного участка по задней поверхности, м;

$$\tau_2 = \begin{cases} \sqrt{\psi_2} & \text{при } \psi = y'/l_2 \leq 1 \\ \sqrt{\psi_2} - \sqrt{\psi_2 - 1} & \psi = y'/l_2 > 1 \end{cases}$$

Интенсивность источника q_{2T} определяется, исходя из величины касательных напряжений трения q_{F2} на задней поверхности:

$$q_{2T} = q_{F2} \cdot V.$$

Температура θ_2 определяется аналогично θ_1 на передней поверхности (см. формулу 4):

$$\theta_2 = \frac{2 \cdot q_2}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_2}{\pi \cdot V}} \cdot \tau_2.$$

Температура контактных участков со стороны инструмента в тех же точках режущего лезвия будет опре-

$$\begin{aligned} \mathfrak{I}_1(X, Y, Z) = & X \cdot \ln \frac{Z+b+\sqrt{X^2+Y^2+(Z+b)^2}}{Z-b+\sqrt{X^2+Y^2+(Z-b)^2}} - (X-l_1) \cdot \ln \frac{Z+b+\sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z+b)^2}}{Z-b+\sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z-b)^2}} + \\ & + (Z+b) \cdot \ln \frac{X+\sqrt{X^2+Y^2+(Z+b)^2}}{X-l_1+\sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z+b)^2}} - (Z-b) \cdot \ln \frac{X+\sqrt{X^2+Y^2+(Z-b)^2}}{X-l_1+\sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z-b)^2}} - \\ & - \left\{ Y \cdot \left[\arcsin \frac{(Z+b) \cdot \sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z+b)^2} + Y^2 + (Z+b)^2}{\left[Z+b+\sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z+b)^2} \right] \cdot \sqrt{Y^2+(Z+b)^2}} - \arcsin \frac{(Z+b) \cdot \sqrt{X^2+Y^2+(Z+b)^2} + Y^2 + (Z+b)^2}{\left[Z+b+\sqrt{X^2+Y^2+(Z+b)^2} \right] \cdot \sqrt{Y^2+(Z+b)^2}} \right. \right. \\ & \left. \left. - \arcsin \frac{(Z-b) \cdot \sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z-b)^2} + Y^2 + (Z-b)^2}{\left[Z-b+\sqrt{(X-l_1)^2+Y^2+(Z-b)^2} \right] \cdot \sqrt{Y^2+(Z-b)^2}} + \arcsin \frac{(Z-b) \cdot \sqrt{X^2+Y^2+(Z-b)^2} + Y^2 + (Z-b)^2}{\left[Z-b+\sqrt{X^2+Y^2+(Z-b)^2} \right] \cdot \sqrt{Y^2+(Z-b)^2}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

где X, Y, Z – координаты рассматриваемой точки режущего лезвия в системе координат плоского источника:

X – по направлению длины источника (l_1),

Z – по направлению его ширины (b),

Y – перпендикулярно двум первым осям).

T_2 определяется аналогично (10) и (11), но вместо l_1 подставляется l_2 и координата X меняется на Y' , а Y – на X' (см. рис. 1). Параметры T_1' и T_2' рассчитываются

деляться суммой температур, создаваемых всеми действительными и отраженными от вспомогательной задней поверхности источниками q_1 и q_2 (см. рис. 1):

$$\theta_1 = T_1 \cdot q_1 + T_2 \cdot q_2; \quad (8)$$

$$\theta_2 = T_1' \cdot q_1 + T_2' \cdot q_2, \quad (9)$$

где

$$T_1 = \frac{\mathfrak{I}_1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_u} \quad (10);$$

(функции T с другими индексами рассчитывают аналогично);

\mathfrak{I}_1 – интегральная функция, что определяет температуру в точке участка режущего лезвия с координатами x, y, z , которая создается плоским источником с размерами $(2b) \times l_1$;

λ_u – коэффициент теплопроводности инструментального материала, Вт/мК.

Выражение для функции \mathfrak{I}_1 получается путем решения интеграла, который определяет переход от множества точечных источников, расположенных на участке $(2b) \times l_1$, к плоскому:

$$\mathfrak{I}_1(x, y, z) = \int_0^{l_1} dx_u \int_{-b}^{+b} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u - x)^2 + y^2 + (z_u - z)^2}},$$

где x, y – координаты точки, где рассчитывается температура;

x_u, z_u – координаты точечного источника.

Попытка точного решения этого интеграла была впервые сделана А.Н. Резниковым, а в дальнейшем решение было уточнено в [12] и [18; 20]. В окончательном варианте он имеет вид [18]:

аналогично T_1 и T_2 : T_1' – когда источник размещен на передней поверхности, а точки с координатами X, Y, Z находятся на задней, и наоборот – для T_2' .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В полученных формулах есть две неизвестные интенсивности итоговых тепловых потоков в инструмент q_1 и q_2 , а также коэффициент K_F , который зависит от координаты x на передней поверхности инструмента

(ППИ). Но поскольку режущий инструмент находится практически в безззорном контакте как со стружкой, так и с поверхностью резания, то для расчетов q_1 и q_2 принимается граничное условие 4-го рода: равенство контактных температур контактирующих тел. При этом коэффициент K_F достаточно определить для одной произвольной точки на передней поверхности. По данным [11] для точки с максимальной температурой, которая имеет место при $x=l_0=l_1/2$, $K_F=0,71$. После этого сравниваются попарно уравнения (1) и (8), а также (7) и (9). Получим систему двух линейных уравнений (12) и с двумя неизвестными q_1 и q_2 , решив которую, можно потом рассчитать все температурное поле инструмента, стружки и обрабатываемой заготовки.

$$\begin{cases} (1+C) \cdot \theta_0 + \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{\omega \cdot l_1 \cdot K_L}{\pi \cdot V}} \cdot \tau_1 \cdot \\ \cdot L_{MC}(K_F \cdot q_{1T} - q_1) = T_1 \cdot q_1 + T_2 \cdot q_2 \\ (1+C) \cdot (\sqrt{\psi_{II}} - \sqrt{\psi_{II} - 1}) \cdot \theta_0 + \\ + \frac{2}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot l_2}{\pi \cdot V}} \cdot \tau_2 (q_{2T} - q_2) = T'_1 \cdot q_1 + T'_2 \cdot q_2 \end{cases} \quad (12)$$

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Недостатком приведенной классической методики является принятие как исходной гипотезы равномерности интенсивности тепловых источников, направленных в инструмент. Последние исследования показывают, что закон изменения q_1 и q_2 определяется целым рядом факторов, как то: величинами температур на контактных участках, соотношением длин контактов на передней и задней поверхностях, теплопроводностями обрабатываемого и инструментального материалов, наличием заторможенного тела и т. п. Реальный закон изменения q_1 и q_2 можно установить, представив эти источники в виде комбинации элементарных равномерных источников разной интенсивности (рис. 2). Тогда, решив задачу равенства температур на каждом i -м элементарном участке (аналогично (12)), можно определить значения q_{1i} и q_{2i} [8; 18], а затем – основные термомеханические параметры зоны резания лезвийного инструмента.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты расчетов по влиянию основных параметров системы резания на ее термомеханические показатели приведены на рис. 3, из анализа которого можно сделать следующие выводы.

1. Интенсивность теплового потока в инструмент на участке пластического контакта ППИ определяется соотношением между коэффициентами теплопроводности материалов стружки λ и инструмента λ_u . Если $\lambda > \lambda_u$ (см. рис. 3 а, материалы 45–Т15К6), то интенсивность теплового потока в инструмент q_1 больше на участке пластического контакта и уменьшается при переходе на участок упругого контакта. Когда имеет место обратное соотношение – $\lambda < \lambda_u$ (см. рис. 3 а, материалы 12Х18Н9Т – ВК8), то резко возрастает интенсивность оттока тепла в инструмент на участке упругого контакта, тем самым уменьшая температуру на этом участке (см. рис. 3 б). Заторможенное тело в этом

случае играет роль термосопротивления на пути теплового потока. Причем указанный эффект тем больше, чем больше разница между λ и λ_u .

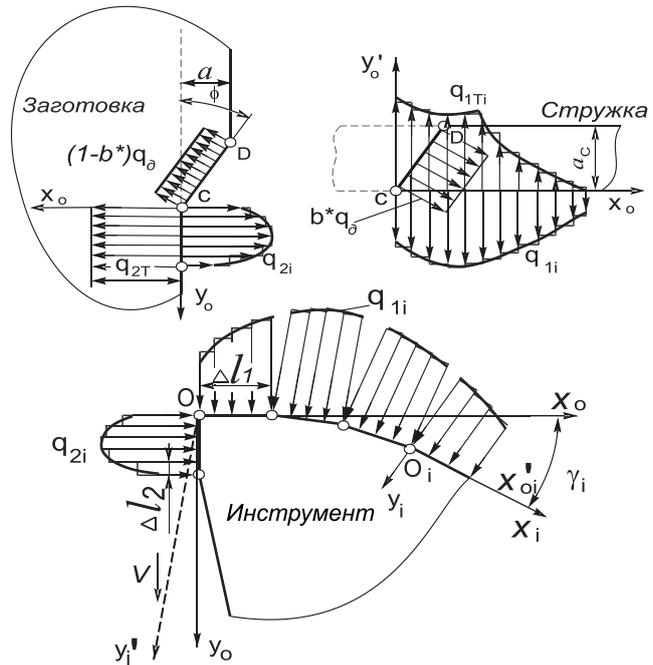


Рис. 2. Схема для определения законов изменения q_1 и q_2 вдоль контактных площадок на передней и задней поверхностях

2. Интенсивность результирующего теплового потока на задней поверхности q_2 приблизительно в 2...3 раза ниже за q_1 и является результатом суммарного действия более мощных тепловых источников на ППИ (q_{1T}) и их аналогов на ЗПИ (q_{2T}). Как видно из рис. 3 в, возле вершины заторможенного тела (нароста) еще не нагретые слои поверхности резания заготовки оттягивают на себя тепло, которое выделяется на ЗПИ, и через тело нароста – тепло из ППИ (поэтому $q_2 < 0$). На следующих участках ЗПИ толщина тела нароста увеличивается (возрастает термосопротивление для потока q_1), а интенсивность теплового потока в заготовку q_2 уменьшается и даже меняет свое направление для инструментов с большими λ_u (см. рис. 3 б, сплав ВК8). Причем это явление имеет место не только при больших фасках изнашивания h_3 , как это было установлено в [10] (см. рис. 3 б), но и при малых, а тепловой поток в инструмент приходится именно на фаску h_3 , из-за чего и температура в этой зоне выше (см. рис. 3 г). Если $\lambda \ll \lambda_u$, то тепловой поток в заготовку может вообще прекратиться даже на участке нароста через его большое термосопротивление и малую интенсивность q_1 на участке пластического контакта ППИ. Тогда все тепло переходит в инструмент, увеличивая тем самым температуру поверхности изнашивания. Аналогичный результат имеет место и в случае обработки малотеплопроводных материалов инструментами с аналогичными свойствами (см. рис. 3 г, сталь 12Х18Н9Т–Т15К6).

3. Для высокотеплопроводных обрабатываемых материалов значение q_{F1} практически не зависит от λ_u , из-за

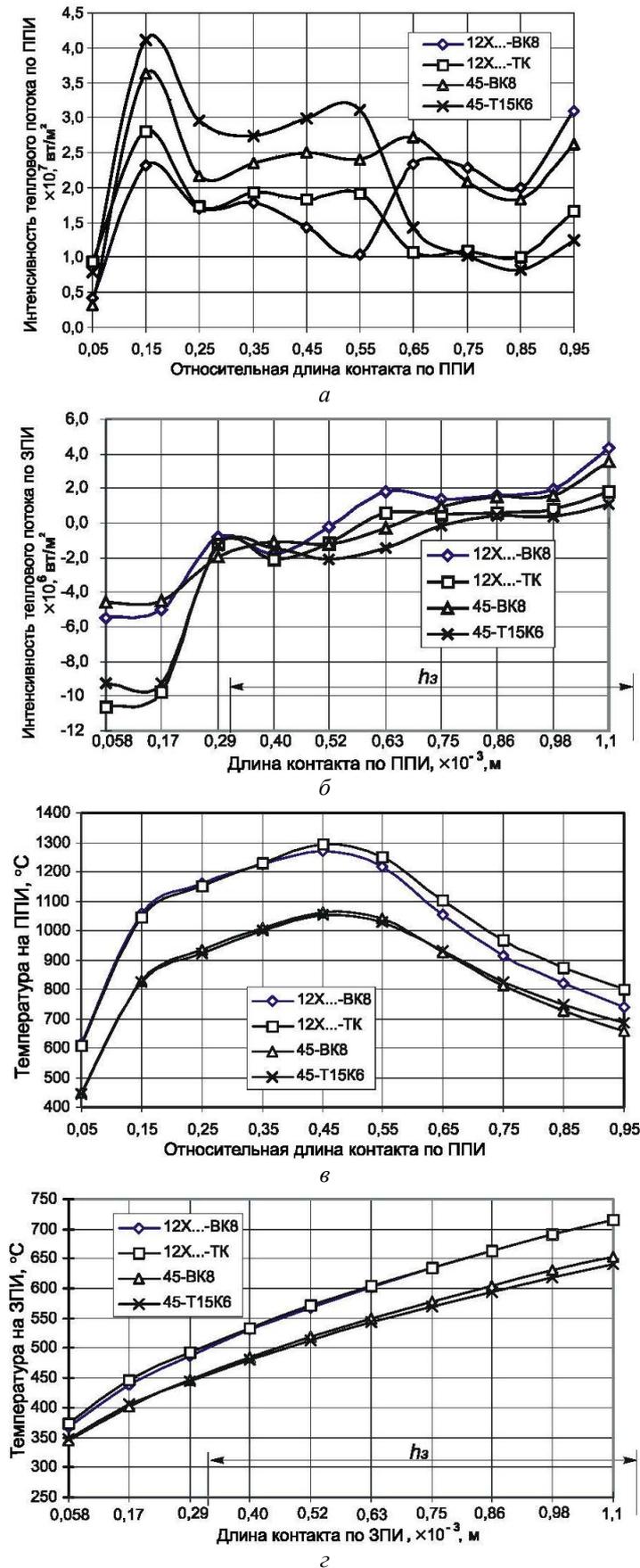


Рис. 3. Распределение интенсивностей результирующих тепловых потоков в инструмент (а, б) и температур по передней (в) и задней (г) поверхностям при обработке сталей 45 и 12Х18Н9Т резцами из твердых сплавов ВК8 и Т15К6 (ширина фаски изнашивания по ЗПИ – 0,8 мм)

того что тепло распространяется преимущественно через заторможенное тело с высокой теплопроводностью (см. рис. 3 в). Поэтому и температура на ППИ для таких материалов мало зависит от λ_u (см. рис. 3 а, обработка стали 45).

4. Более высокая теплопроводность инструментального материала при малых λ приводит к незначительному снижению температуры на ЗПИ (от 3 до 100 °С). Однако влияние этого фактора на ЗПИ не такое весомое, как на ППИ (см. рис. 3 г, обработка стали 12Х18Н9Т). Для высокотеплопроводного обрабатываемого материала увеличение λ_u приводит к росту температуры на ЗПИ через усиление влияния тепловых источников на ППИ (см. рис. 3 г, обработка стали 45). Этим теоретически доказывается целесообразность использования высокотеплопроводных инструментальных материалов (группы ВК) для резания малотеплопроводных обрабатываемых и, наоборот, малотеплопроводных материалов (группы ТК) для обработки материалов с большим λ . Выявленные взаимосвязи и являются причиной уменьшения температуры на контактных поверхностях инструмента при обработке стали 45, несмотря на большую величину касательных напряжений трения как на ППИ, так и ЗПИ (см. рис. 3 г). Без учета результирующих тепловых потоков в инструмент такой вывод был бы невозможным.

5. Увеличение ширины фаски изнашивания хотя и повышает интенсивность теплового потока q_2 , но практически не может повлиять на общую картину напряженного, теплового и температурного состояний на ППИ (см. рис. 3 а), где действуют более мощные тепловые источники. Поэтому температура на ППИ меняется незначительно для всех комбинаций λ и λ_u . Несмотря на небольшое снижение касательных напряжений q_{F2} при $h_3=0,8$ мм через повышение температуры материала пластической заторможенной зоны по ЗПИ, по всей длине контактной зоны ЗПИ температура возрастает (рис. 3 г).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мазур Н.П., Внук Ю.Н., Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Залого В.А., Новосолов Ю.К., Якубов Ф.Я. Основы теории резания материалов. 2-е изд. Харьков: ХПИ, 2013. 534 с.
2. Grzesik Wit. *Podstawy skrawania materiałow metalowych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998. 382 s.
3. Piendl S., Aurich J.C., Steinicke M. 3D Finite-Element Simulation of Chip Formation in Turning // *Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. Chemnitz, 2005. P. 225–233.
4. Marusich T.D. Trends in machining modeling // 2005 Third Wave AdvantEdge International Users' Conference. Dearborn, 2005. P. 1–25.
5. Остафьев В.О., Нощенко О.М. Термопружні напруження при переривчастій роботі твердосплавного різального інструменту // *Вісник Технологічного університету Поділля*. 2002. № 4. С. 188–192.
6. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.А. Теплофизика механической обработки. Одесса: Либідь, 1991. 240 с.
7. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

8. Мазур М.П. Визначення контактних температур ріжучого інструмента // *Вестник Технологического университета Подолья*. 1997. № 1. С. 5–13.
9. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Т. 5. Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2006. 316 с.
10. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
11. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
12. Силин С.С. Исследование термомеханических явлений при резании материалов методами теории подобия : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1970. 282 с.
13. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание металлов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 447 с.
14. Силин С.С. Метод подобия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
15. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
16. Ящерицин П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск: Выш. шк., 1990. 512 с.
17. Кушнер В.С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов. Иркутск: Иркутский ун-т, 1982. 180 с.
18. Мазур Н.П. Разработка теоретических основ и практическое использование термомеханической модели обработки пластических материалов : дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1999. 309 с.
19. Oxley P. L. *Mechanics of machining. An analytical approach to assessing machinability*. New York: Ellis Horwood Ltd., 1989. 242 p.
20. Остаф'єв В.О., Мазур М.П. До питання про використання методу джерел тепла для розрахунку температурних полів ріжучих інструментів // *ТЕМА*. 1998. № 8. С. 8–11.

REFERENCES

1. Mazur N.P., Vnukov Yu.N., Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Zaloga V.A., Novosyolov Yu.K., Yakubov F.Ya. *Osnovy teorii rezaniya materialov* [Foundations of materials cutting theory]. 2nd ed. Kharkov, KhPI Publ., 2013, 534 p.
2. Grzesik Wit. *Podstawy skrawania materiałow metalowych*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998, 382 s.
3. Piendl S., Aurich J.C., Steinicke M. 3D Finite-Element Simulation of Chip Formation in Turning. *Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*. Chemnitz, 2005, pp. 225–233.
4. Marusich T.D. Trends in machining modeling. 2005 Third Wave AdvantEdge International Users' Conference. Dearborn, 2005, pp. 1–25.
5. Ostafyev V.O., Noshchenko O.M. Thermo-elastic stress during the intermittent duty of hard-alloy cutting tool.

- Vestnik tekhnologicheskogo universiteta Podolya*, 2002, no. 4, pp. 188–192.
6. Yakimov A.V., Slobodyanik P.T., Usov A.A. *Teplofizika mekhanicheskoy obrabotki* [Thermal physics of heat processing]. Odessa, Libid' Publ., 1991, 240 p.
 7. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Foundations of metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 344 p.
 8. Mazur M.P. Definition of cutting tool contact temperatures. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta Podolya*, 1997, no. 1, pp. 5–13.
 9. Klimenko C.A., ed. *Sverkhverdie materialy. Poluchenie i primenenie. Tom 5. Obrabotka materialov lezviynym instrumentom* [Hard-alloy materials. Production and application. Vol. 5. Materials processing with edge tool]. Kiev, ISM im. V.N. Bakulya Publ., 2006, 316 p.
 10. Reznikov A.N. *Teplogizika rezaniya* [Thermophysics of cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 288 p.
 11. Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of processes of materials machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 279 p.
 12. Silin S.S. *Issledovanie termomekhanicheskikh yavleniy pri rezanii materialov metodami teorii podobiya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The research of thermomechanical phenomena during material cutting using the methods of theory of similarity]. Moscow, 1970, 282 p.
 13. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie metallov. Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Metal cutting. Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2001, 447 p.
 14. Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii metallov* [Similarity method during metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 152 p.
 15. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teploviye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990, 288 p.
 16. Yashcheritsin P.I., Eremenko M.L., Feldshteyn E.E. *Teoriya rezaniya. Fizicheskie i teploviye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Theory of cutting. Physical and thermal processes within technological systems]. Minsk, Visshaya shkola Publ., 1990, 512 p.
 17. Kushner V.S. *Termomekhanicheskaya teoriya protsessa neprerivnogo rezaniya plasticheskikh materialov* [Thermomechanical theory of the process of continuous cutting of plastic materials]. Irkutsk, Irkutsky universitet Publ., 1982, 180 p.
 18. Mazur N.P. *Razrabotka teoreticheskikh osnov i prakticheskoe ispolzovanie termomekhanicheskoy modeli obrabotki plasticheskikh materialov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of theoretical foundations and practical application of thermomechanical pattern of plastic materials processing]. Kiev, 1999, 309 p.
 19. Oxley P. L. *Mechanics of machining. An analytical approach to assessing machinability*. New York, Ellis Horwood Ltd., 1989, 242 p.
 20. Ostafyev V.O., Mazur M.P. To the issue of applying of heat sources method for calculation of temperature fields of cutting tools. *TEMA*, 1998, no. 8, pp. 8–11.

IMPROVEMENT OF ANALYTICAL METHODS OF CALCULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN THE CUTTING SYSTEM

© 2015

N.P. Mazur, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical engineering”
Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi (Ukraine)

Keywords: heat source; rate of heat flows; cutting temperature; deformation; friction.

Abstract: This paper presents the detailed analytical method of calculation of temperature fields for the blade tool cutting process. The author considers in details the heat sources forms during cutting, the possibility and necessity of schematization both of the heat sources and the forms of interacting bodies. The calculation of temperature in the zone of primary plastic deformation is carried out taking into account the mutual influence of temperature on the intensity of shear stresses within this area. The author determined that the distribution of intensity of friction source along the back surface is stipulated by the nature of changes in friction induced shear stresses and is little different from the uniform one. The author offered the accurate solution of the issue of calculating temperature within the half-space from the action of a rectangular constant rate heat source. Thus, it became possible to determine the rate of constant heat flows on the front and back surfaces. The author tested a hypothesis about the constancy of heat flows rate. For this purpose, each final heat source was presented as a combination of elementary uniform heat sources. The research proved the large non-uniformity of rate distribution of heat sources that act on the cutting tool surfaces. This made it possible to identify new patterns of temperature distribution on the front and back surfaces of tool within various combinations of heat conductivity of the processed and tool materials, as well as the tool wear. The author identified the essential influence of body deferred on the front surface on the amount and direction of heat flows within the front and back surfaces – to the tool or to the blank part, and eventually on the temperature of cutting tool contact surfaces. It allowed development of guidelines for selecting optimal tool material for processing of blank parts with different heat conductivity.

ФОРМИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В СТЕРЖНЯХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2015

Д.А. Расторгуев, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

К.О. Семенов, магистрант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: остаточные напряжения; нежесткий вал; волновая механика; фазовая траектория; реологическая модель; локальность; деформация.

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы обеспечения равномерности деформирования мало жестких валов, винтов при одновременном действии продольных нагрузок и нагрева при термосиловой обработке. Однородность остаточных деформаций в продольном направлении обеспечивает выравнивание остаточных технологических напряжений, а это ведет к минимальному короблению в осевом направлении вследствие релаксации напряжений. Особенно актуальны эти вопросы для ходовых винтов, у которых жесткие требования по точности шага. В работе приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию основных технологических режимов термосиловой обработки: величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева на равномерность деформирования по длине вала, выразившейся коэффициентом локальности, который определялся как отношение максимальной деформации одного из участков к средней или минимальной деформации участков. Приведено сравнение кривых упрочнения, полученных при теоретическом моделировании процесса деформирования и из результатов натурного эксперимента, из которого следует вывод о неустойчивом, колебательном характере деформирования на стадии пластического течения. Из различных теорий, связанных с возможностью возникновения волн деформаций при нагружении деталей, в упругой постановке задачи, ударных возмущений для объяснения неравномерности распределения пластических деформаций по длине образца была принята волновая теория распространения упруго-пластических деформаций при статическом нагружении. На основе реологической модели Фойхта были получены фазовые траектории для различных параметров системы, которые показали возможность реализации в системе затухающих волновых процессов. С учетом этого предлагается управлять процессом формирования распределения остаточных деформаций с учетом формирующихся зон узлов и пучностей упруго-пластических деформаций.

ВВЕДЕНИЕ

Для длинномерных мало жестких деталей типа валов основная трудность при их изготовлении заключается в снижении поперечного коробления в межоперационный и в эксплуатационный периоды. Для винтов и ходовых валов, которые относятся к группе валов, помимо поперечной деформации, нерешенной проблемой является обеспечение равномерных физико-механических свойств и геометрии вдоль оси детали. Это связано с жесткими требованиями по шагу резьбы. При релаксации остаточных технологических напряжений происходит деформация вала в продольном направлении, что с неизбежностью приводит к потере точности шага резьбы и снижению кинематической точности изделия в целом. Поэтому при изготовлении деталей данной группы нужно стремиться к обеспечению не только поперечной, но и продольной устойчивости.

Релаксационные процессы в материале заготовки ведут к потере точности резьбы по шагу за счет самопроизвольных деформационных процессов в осевом направлении. Степень коробления зависит от характера и интенсивности распределения остаточных напряжений, особенностей геометрии детали и физико-механических свойств ее материала. Чтобы снизить коробление, необходимо либо повысить сопротивление металла пластическому деформированию, т. е. его релаксационную стойкость, либо уменьшить действующие напряжения. В последнее время получают развитие методы старения, повышающие релаксационную стойкость материала с наибольшим снижением уровня остаточных напряжений.

К ним относятся статическое и динамическое нагружение, старение тепловыми ударами, вибрационное старение, обработка ультразвуком, стабилизация размеров деталей в магнитном поле, обработка электрогидравлическим ударом, облучение рентгеновскими лучами. Существуют способы снижения уровня остаточных напряжений в мало жестких деталях в зависимости от физико-механических свойств их материала: пластическая деформация, отжиг, отпуск и т. д.

К недостаткам традиционной термообработки можно отнести следующее: остаточные напряжения снимаются не полностью в зависимости от температуры обработки, длительности выдержки, материала, массивности изделия; при нагреве и последующем охлаждении заготовка с остаточными напряжениями меняет свою форму и размеры; термообработка длинномерных деталей является трудоемкой операцией, снижающей производительность процесса. Существенное влияние при этом оказывает скорость охлаждения после термической операции, так как при остывании изделий возможно наведение новых остаточных напряжений и коробление длинномерных заготовок.

Процесс деформации в протяженных заготовках является неравномерным. Волновой характер процесса деформирования рассматривается или в задачах для упругой деформации [1; 2], или для упруго-пластической деформации с учетом внешних колебаний. Причем в последнем случае рассматриваются в основном вопросы рассеяния энергии в материале [3; 4]. Также рассматривается волновой процесс деформирования при

ударных воздействиях [5–7]. Также отмечен феноменологический подход для описания волнового процесса упруго-пластического деформирования, в том числе в виде модели Фойхта для распределенных систем [8–11]. При этом модель Фойхта ограниченно подходит только для определенных материалов и случаев деформирования.

Для обеспечения точности обработки маложестких валов за счет равномерности их деформирования в продольном направлении, сохранения размерной стабильности необходимо формировать напряженно-деформированное состояние заготовки с учетом локализации деформации автоволнового характера. Для этого разработана технология термосилового обработки (ТСО), заключающаяся в одновременном приложении осевой нагрузки и высокой температуры [9–19]. Целью является минимизация и стабилизация остаточных напряжений в продольном и поперечном направлениях длинной детали с одновременным формированием геометрии заготовки. Усилия (напряжения) прилагаются на уровне, превышающем предел относительной пропорциональности $\sigma_{0,2}$, т. е. в зоне пластических деформаций. Для сведения к минимуму коробления (автодеформаций валов) целесообразно обеспечить при термообработке под нагрузкой достаточное развитие пластической деформации. Соответственно, необходимо ис-

следовать распределение упруго-пластических деформаций, характер их локализации и распределение остаточных напряжений в стержнях на основных формообразующих операциях.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Резко выраженная локализация деформации по длине вала наблюдается при больших степенях формоизменения при растяжении в виде шейки. При описании локализации деформации она рассматривается как неравномерность формоизменения, а не закономерный физический процесс. В процессе развития локальной деформации возникают значительные колебания истинных напряжений, которые обусловлены сменой упрочнений и разупрочнений. Данный процесс характеризуется амплитудой и частотами. Локализация деформации происходит после достижения порога предела текучести и проявляется как возникновение и приостановка областей локального течения до появления устойчивой шейки.

Результат моделирования упруго-вязко-пластической деформации на основе реологической модели показан на рис. 1 [19]. Но реальная кривая упрочнения имеет не гладкий характер, а явно выраженные релаксационные возмущения, которые указывают на неравномерный характер деформирования (рис. 2).

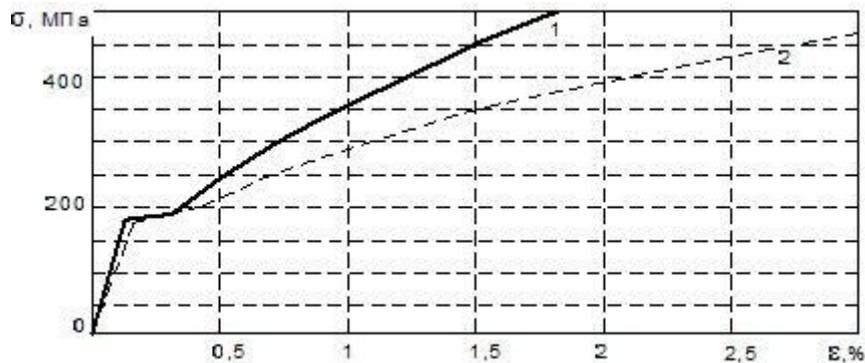


Рис. 1. Кривые упрочнения при 20 °С (сталь 35):
1 – с учетом упрочнения; 2 – без учета упрочнения

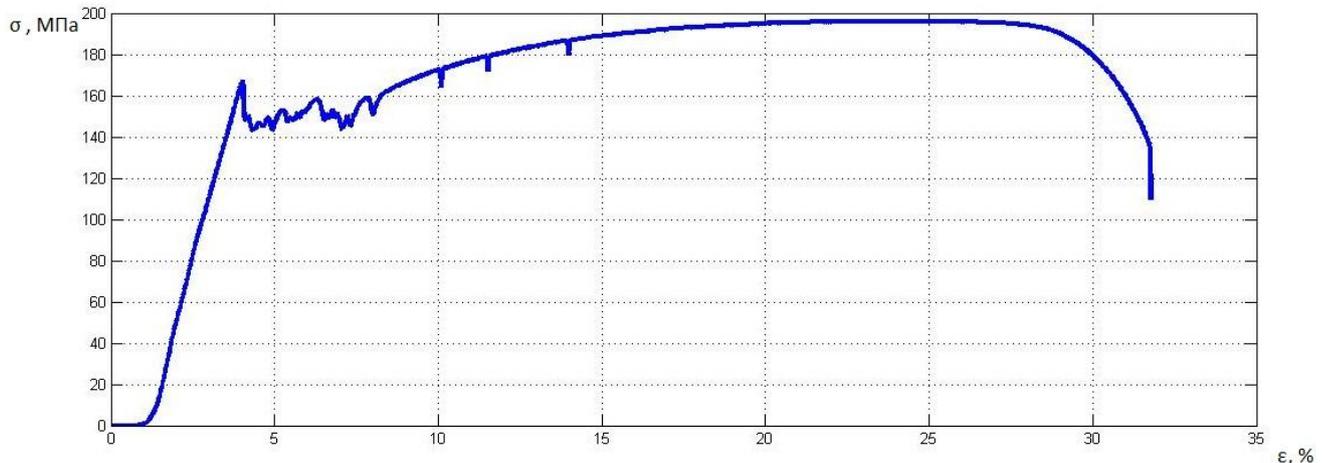


Рис. 2. Экспериментальная кривая упрочнения стали 35

Ниже приведены результаты моделирования волнового процесса на основе элементарной реологической модели Фойхта в виде системы уравнений [8]:

$$\begin{cases} \sigma' = -\frac{\sigma - \sigma_0}{T} - g \cdot \varepsilon \cdot \sigma, \\ \varepsilon' = -\frac{\varepsilon}{\tau} + \frac{\sigma}{\eta}; \end{cases} \quad (1)$$

где τ – время релаксации деформационных процессов, с;
 η – динамическая вязкость;
 σ – напряжения, МПа;
 σ_0 – уровень напряжений, до которого они релаксируют на концентраторе, МПа;
 T – время релаксации напряжений, с;
 g – константа;
 ε – деформация.

Граничные условия для данной системы:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \sigma}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \Big|_{r=l_0} = 0,$$

где r – линейный размер образца, м;
 l_0 – длина образца, м.

Решение системы:

$$\sigma = \sigma_m e^{pt}; \quad \varepsilon = \varepsilon_m e^{pt},$$

где комплексная частота p деформационного процесса

$$p^2 + \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{T} + \frac{g\sigma_0 T}{\eta} \right) p + \left(\frac{1}{\tau T} + \frac{2g\sigma_0}{\eta} \right) = 0.$$

Для определения возможности возникновения автоволновых процессов для системы (1) построим фазовые портреты (рис. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспериментальных исследований [20], где изучались вопросы локализации деформации с использованием большого объема экспериментальных данных при варьировании технологических факторов (величины деформации, скорости деформирования и температуры нагрева) (пример такой гистограммы на рис. 4), показывают, что неравномерность деформирования по длине может являться не только следствием неравномерности исходных свойств материала, но волновым характером процесса пластической деформации.

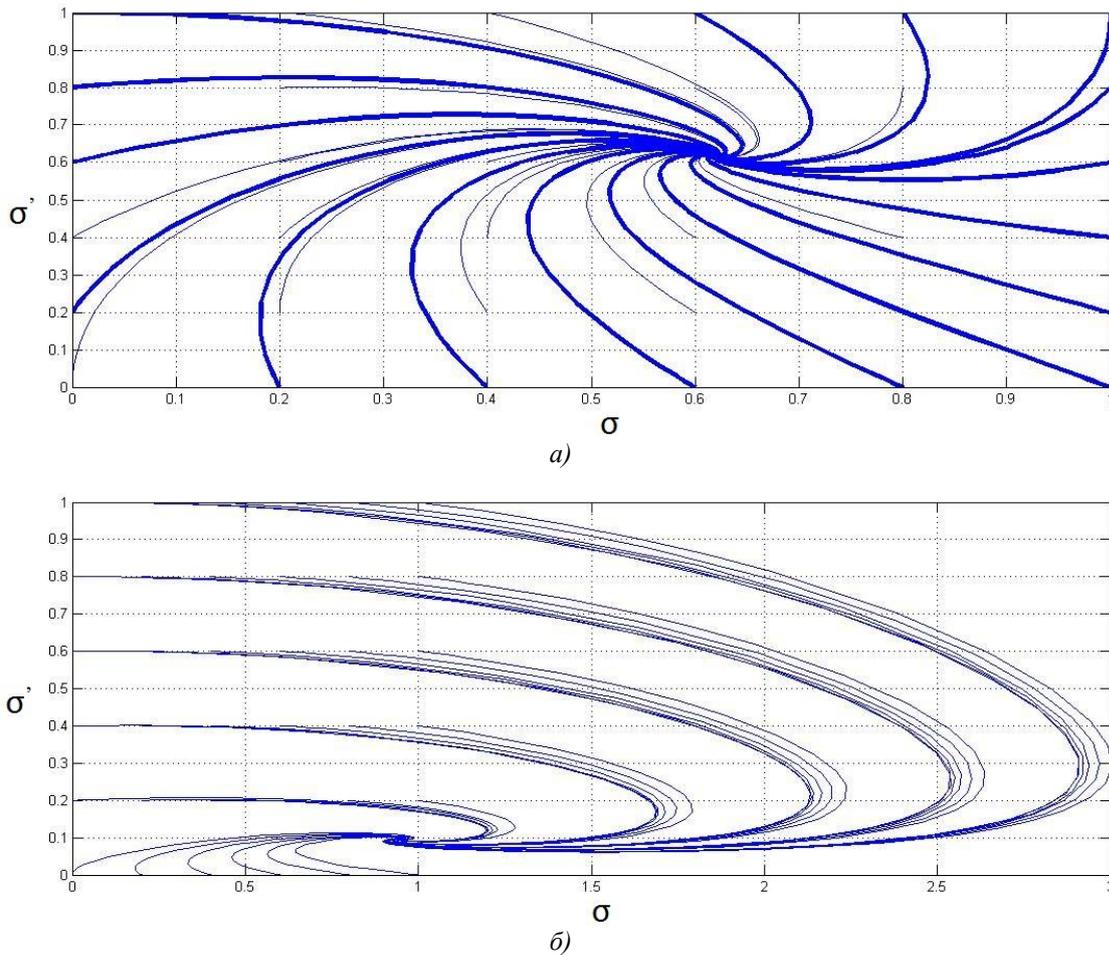


Рис. 3. Фазовые портреты системы (1) с различными параметрами модели:
 а – быстрое затухание в системе; б – медленное затухание в системе

При переходе за предел текучести одновременного охвата пластической деформацией всего объема металла не происходит до тех пор, пока все микрообъемы металла не окажутся охваченными пластической деформацией критической величины. Только после этого возможна одновременная деформация всего объема материала.

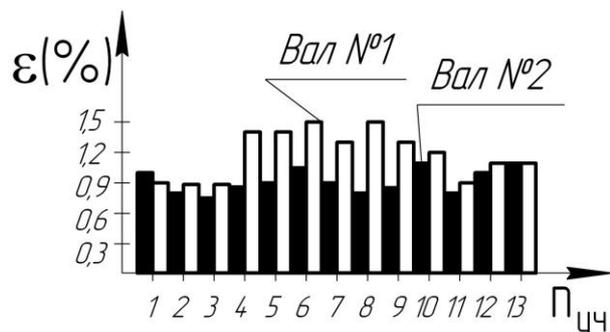


Рис. 4. Распределение деформаций по участкам для экспериментальных образцов

Трудность определения данной пороговой величины деформации заключается в том, что эта величина зависит от таких параметров, как размер зерна, вид термической обработки, величина скорости деформирования и т. д. В качестве оценки, характеризующей среднюю неравномерность пластических деформаций, взят критерий локальности $K_{cp} = \varepsilon_{max} / \varepsilon_{cp}$.

Значение K_{cp} , близкое к единице, свидетельствует об однородности пластических деформаций материала по всей длине заготовки. Из результатов исследований видно, что значение K_{cp} с увеличением средней деформации постепенно уменьшается. При минимальной деформации $\varepsilon \leq 1\%$ наблюдается значительный разброс данных и большое значение коэффициента K_{cp} (от 1,5 до 2) на рабочих температурных режимах.

Пластическая деформация в поликристаллических металлах в условиях однородного напряженного состояния характеризуется локальностью протекания. Здесь следует различать микро- и макролокальность (неоднородность) пластической деформации. Неравномерность пластической деформации в микрообъемах оказывает значительное влияние на процесс пластического течения в целом и на критерии прочности, однако количественного влияния микронеоднородности на макронеоднородность пластической деформации пока еще сделать не удастся. Неравномерность пластической деформации имеет две фазы протекания. Первая – одновременная, но неравномерная деформация микрообъема металла имеет решающее значение для оценки неоднородности пластических свойств материалов. Поэтому критерий K_{cp} оказывается чувствителен к изменению структуры металла. Если в результате некачественной термической обработки оказались участки с различными по величине зернами, то величина K_{cp} резко возрастает.

При ТСО при растяжении вдоль оси вала происходят периодические изменения структуры материала, связанные с колебательным характером изменения раз-

меров дефектных элементов. В ходе экспериментов над образцами из малоуглеродистой стали [12] выявлена логарифмическая зависимость величины длины пластической волны λ от размеров зерна, линейная – от размера поперечника образца. Скорость же распространения волны пластической деформации v возрастает с увеличением скорости нагружения и не зависит от размеров зерен и размеров вала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что неравномерность пластической деформации длинномерных валов при ТСО является результатом действия не только исходной неоднородности физико-механических свойств материала заготовки, его структуры, но и результатом действия собственно волнового процесса пластической деформации.

Для повышения качества ТСО необходимо учитывать влияние частотных параметров данной волны на распределение узлов и пучностей зон пластической деформации по длине заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Работнов Ю.И. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 350 с.
2. Работнов Ю.И. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
3. Писаренко Г.С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях. Киев: Наукова думка, 1985. 236 с.
4. Писаренко Г.С., Богинич О.Е. Колебания кинематически возбуждаемых систем с учетом диссипации энергии. Киев: Наукова думка, 1982. 220 с.
5. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение. М.: Машиностроение, 1974. 472 с.
6. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
7. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М.: Иностранная литература, 1955. 194 с.
8. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
9. Зуев Л.Б. О волновом характере пластического течения. Макроскопические волны локализации деформации // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 3. С. 47–54.
10. Зуев Л.Б., Данилов Л.Б. Медленные волновые процессы при деформации твердых тел // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 1. С. 75–94.
11. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. 1998. Т. 1. № 1. С. 5–22.
12. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Новая технология термосилового обработки маложестких валов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 32–35.
13. Драчев О.И., Воронов Д.Ю., Расторгуев Д.А. Экспериментальная установка для равномерного осевого пластического деформирования маложестких деталей при термосилового обработке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2004. № 9. С. 15–18.

14. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. СПб.: Политехника, 2005. 289 с.
15. Драчев О.И., Аржеткин А.В., Драчев А.О., Яшкина Т.Л. Способ и устройство для термосиловой обработки осесимметричных длинномерных деталей : патент РФ № 2235794; заявл. 20.02.2001; опубл. 10.09.2004.
16. Драчев О.И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости. Ирбит: ОНИКС, 2011. 192 с.
17. Драчев О.И. Повышение точности и стабильности форм нежестких осесимметричных деталей методом термосиловой обработки. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 267 с.
18. Репин К.А., Драчев О.И., Воронов Д.Ю. Новые технологии обработки маложестких длинномерных деталей и описание устройства для их реализации // Механика XXI века: XII Всерос. науч.-техн. конф. Братск: Братский гос. ун-т, 2013. С. 135–139.
19. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. № 3. С. 80–85.
20. Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Повышение эффективности обработки маложестких валов при комбинированном термосиловом нагружении // Металлообработка. 2012. № 3. С. 30–35.
8. Panin V.E., Likhachev V.A., Grinyaev Yu.V. *Strukturnye urovni deformatsii tverdykh tel* [Structural levels of solid bodies deformation]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985, 229 p.
9. Zuev L.B. On the wave character of plastic flow. Macroscopic autowaves of deformation localization. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 47–54.
10. Zuev L.B., Danilov V.I. Slow autowave processes in the course of deformation of solid. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2003, vol. 6, no. 1, pp. 75–94.
11. Panin V.E. Foundations of physical mesomechanics. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 5–22.
12. Drachev O.I., Voronov D.Yu., Rastorguev D.A. New technology of thermo-power processing of elastic shafts. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 1, pp. 32–35.
13. Drachev O.I., Voronov D.Yu., Rastorguev D.A. Experimental plant for uniform axle plastic deformation of non-hard parts during thermo-power processing. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2004, no. 9, pp. 15–18.
14. Drachev O.I. *Tekhnologiya izgotovleniya malozhestkikh osesimmetrichnykh detaley* [Technology of production of non-hard axisymmetric parts]. S. Petersburg, Politekhnik Publ., 2005, 289 p.
15. Drachev O.I., Argetkin A.V., Drachev A.O., Yashkina T.L. *Sposob i ustroystvo dlya termosilovoy obrabotki osesimmetrichnykh dlinnomernykh detaley* [Method and device for thermo-power processing of axisymmetric long parts]. Patent RF no. 2235794, 2004.
16. Drachev O.I. *Upravlenie tekhnologicheskoy nasledstvennostyu detaley maloy zhestkosti* [Control of technological heredity of fragility parts]. Irbit, ONIKS Publ., 2011, 192 p.
17. Drachev O.I. *Povyshenie tochnosti i stabilnosti form nezhestkikh osesimmetrichnykh detaley metodom termosilovoy obrabotki* [The improvement of accuracy and stability of forms of non-hard axisymmetric parts using the method of thermo-power processing]. Stary Oskol, TNT Publ., 2011, 267 p.
18. Repin K.A., Drachev O.I., Voronov D.Yu. New technologies of processing of fragile long parts and description of the device for their implementation. *Materialy XII Vseros. nauchno-tekhn. konf. "Mekhaniki XXI veku"*. Bratsk, Bratskiy gos. universitet Publ., 2013, pp. 135–139.
19. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Modeling of the elastic-plastic deformations at thermal force processing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 80–85.
20. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Increase of efficiency of processing of low-rigid shaft at the combined thermopower loading. *Metalloobrabotka*, 2012, no. 3, pp. 30–35.

REFERENCES

1. Rabotnov Yu.I. *Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel* [The elements of hereditary mechanics of solid bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 350 p.
2. Rabotnov Yu.I. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Solid mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 744 p.
3. Pisarenko G.S. *Obobshchennaya nelineynaya model' ucheta rasseyaniya energii pri kolebaniyakh* [General nonlinear model of energy dissipation evaluation during oscillations]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985, 236 p.
4. Pisarenko G.S., Boginich O.E. *Kolebaniya kinematicheski vzbuzhdaemykh sistem s uchetom dissipatsii energii* [Fluctuations of kinematically induced systems with the account of energy dissipation]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1982, 220 p.
5. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch. 1. Deformatsiya i razrushenie* [Mechanical properties of metals. P. 1. Deformation and destruction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 472 p.
6. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* [Foundations of the theory of plasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 420 p.
7. Kolsky G. *Volny napryazheniya v tverdykh telakh* [Stress waves in solid bodies]. Moscow, Inostrannaya literatura Publ., 1955, 194 p.

**THE FORMATION OF DISTRIBUTION OF ELASTO-PLASTIC DEFORMATION IN THE RODS
IN THE RESULT OF WAVE PROCESSES**

© 2015

D.A. Rastorguev, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Equipment and technology of engineering manufacture”
K.O. Semenov, graduate student of Chair “Equipment and technology of engineering manufacture”
Togliatti state University, Togliatti (Russia)

Keywords: residual stresses; elastic shaft; wave mechanics; phase trajectory; rheological model; locality; deformation.

Abstract: The paper considers the issues of ensuring the uniformity of deformation of elastic shafts and screws under the simultaneous action of the longitudinal loads and heating during thermal-power processing. The uniformity of residual deformations in the longitudinal direction ensures the equalization of the residual technological stresses, and it leads to the minimum buckling in the axial direction due to the stress relaxation. These questions are particularly topical for the lead screws which have strict requirements for the spacing accuracy. The paper presents the results of experimental studies on the influence of main technological modes of thermo-power processing: the degree of deformation, deformation rate and heating temperature on the uniformity of deformation along the length of the shaft, which is expressed by the coefficient of locality, which is defined as the ratio of maximum deformation of one of the sections to the average or minimum deformation of areas. The authors give the comparison of the hardening curves obtained during theoretical modeling of the deformation process and from the results of the full-scale experiment which followed by a conclusion on the unstable, oscillating deformation nature at the stage of plastic flow. Among various theories concerned with the possibility of deformation wave occurrence during parts load, in the elastic task formulation of impact disturbances, the wave theory of elasto-plastic deformations distribution under the static loading was used for explanation of non-uniformity of plastic deformations distribution along the length of the sample. On the basis of Voigt rheological model, phase trajectories for different parameters of the system were obtained, that showed the feasibility of implementation within the system of damped wave processes. Taking it into account, the authors suggested controlling of the process of formation of residual stresses distribution in view of the forming node areas and antinodes of the elasto-plastic deformations.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОВОЛЖЬЯ

© 2015

С.Ш. Сайриддинов, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедр «Теплогазоснабжение и вентиляция, водоснабжение и водоотведение»,
«Энергетические машины и системы управления»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: водоснабжение; поверхностные источники; подземные источники; природная вода; антропогенные загрязнения; водозабор; водопотребление; питьевая вода; очистные сооружения; водопроводная сеть; трубопроводы; реконструкции; эксплуатация; физический износ водопроводных сетей; бестраншейная технология; реконструкция трубопроводных систем.

Аннотация: В данной статье рассматривается состояние сетей и сооружений и пути повышения эффективности эксплуатации систем хозяйственно-питьевого водоснабжения в условиях Поволжья на примере г.о. Тольятти. Определены приоритеты в соответствии со стратегией социально-экономического развития Самарской области на период до 2020 года. Отмечается, что приоритетами государственной политики в регионе будут являться основные сферы жизнедеятельности, обеспечивающие безопасность жизни и здоровья человека и, соответственно, увеличение объемов строительства жилья и коммунальной инфраструктуры и приведение существующего жилищного фонда и коммунальной инфраструктуры в соответствие со стандартами качества. Обеспечение населения чистой водой – приоритетная проблема, решение которой необходимо для сохранения здоровья и повышения уровня жизни населения. В данной статье приведен эколого-статистический анализ источников водоснабжения, гидравлический и технологический анализ процессов подготовки и транспортирования питьевой воды, состояние трубопроводов подачи и степени их аварийности с целью принятия решения по обеспечению гидравлического решения, повышению эффективности подачи и распределению хозяйственно-питьевой воды при эксплуатации систем водоснабжения регионов России на примере г.о. Тольятти. Повышение уровня антропогенного загрязнения территории источников питьевого водоснабжения, значительный износ сооружений и оборудования водного сектора, отсутствие резервного водоисточника (Автозаводский район) определяют актуальность проблемы гарантированного обеспечения жителей чистой питьевой водой и выводят ее в приоритетные задачи социально-экономического развития г.о. Тольятти. Отмечается, что для решения задачи по гарантированному обеспечению жителей г.о. Тольятти чистой питьевой водой необходима организация совместных действий органов исполнительной и законодательной власти, предприятий водного сектора, инвесторов, технических специалистов, населения города по созданию в водном секторе эффективных качественно новых современных форм и методов управления. Рекомендуются альтернативные варианты восстановления и эксплуатации сетей и сооружений систем хозяйственно-питьевого водоснабжения в данном регионе. Масштабность проблемы определяет необходимость разработки Программы с использованием программно-целевого решения комплекса организационно-технических, правовых, экономических, социальных и других задач и мероприятий, обеспечивающих условия реализации Программы. Применение программно-целевого метода должно обеспечить эффективное решение системных проблем в водном секторе города за счет реализации комплекса программных мероприятий, увязанных по задачам, ресурсам и срокам.

Согласно Стратегии социально-экономического развития Самарской области на период до 2020 года [1], безусловными приоритетами государственной политики в регионе будут являться основные сферы жизнедеятельности, обеспечивающие безопасность жизни и здоровья человека. Основными задачами вышеназванной Стратегии определены: увеличение объемов строительства жилья и коммунальной инфраструктуры и приведение существующего жилищного фонда и коммунальной инфраструктуры в соответствие со стандартами качества.

Обеспечение населения чистой водой – приоритетная проблема, решение которой необходимо для сохранения здоровья и повышения уровня жизни населения, обеспечения комфортных условий проживания граждан, создания условий, обеспечивающих повышение качества и увеличение продолжительности жизни населения области.

Трудность ее решения обусловлена повсеместным ухудшением состояния источников питьевой воды,

техническими трудностями получения питьевой воды, соответствующей санитарно-гигиеническим нормативам [2–9].

По данным Федеральной службы государственной статистики за 2008 год, в Российской Федерации подается в сеть на хозяйственно-питьевые нужды более 11 млрд куб. метров воды в год, однако 30,5 млн человек, или 22 % населения, не обеспечены услугами централизованного водоснабжения. По данным Федеральной службы государственной статистики за 2009 год, централизованный водопровод отсутствует в 11 % городов и 53 % сельских населенных пунктов. В г.о. Тольятти не обеспечены услугами централизованного водоснабжения 0,5 % населения (станция Канал Комсомольского р-на, северо-западная часть мкр-н Федоровка Комсомольского р-на, мкр-н Новоматюшкино).

Повышение уровня антропогенного загрязнения территории источников питьевого водоснабжения, значительный износ сооружений и оборудования водного сектора, отсутствие резервного водоисточника

(Автозаводский р-н) определяют актуальность проблемы гарантированного обеспечения жителей чистой питьевой водой и выводят ее в приоритетные задачи социально-экономического развития г.о. Тольятти. Возрастающие экологические требования предписывают необходимость повышения качества очистки природных и сточных вод [2–4]. Для решения задачи по гарантированному обеспечению жителей г.о. Тольятти чистой питьевой водой необходима организация совместных действий органов исполнительной и законодательной власти, предприятий водного сектора, инвесторов, технических специалистов, населения города по созданию в водном секторе эффективных, качественно новых, современных форм и методов управления [2].

Централизованное водоснабжение жителей г.о. Тольятти осуществляется в Автозаводском районе – посредством водозаборных и очистных сооружений ОАО «АВТОВАЗ» из поверхностного источника – Куйбышевского водохранилища на р. Волга. Водозабор размещен вблизи села Подстепки выше плотины на 30 км. Транспортировка воды осуществляется ОАО «ТЕВИС». Речная вода насосами I подъема подается по пяти ниткам водоводов на водопроводные очистные сооружения ОАО «АВТОВАЗ» с попутным отбором потока речной воды на нужды ТЭЦ. Очистные сооружения водопровода построены по проектам, разработанным в 1967 году, и эксплуатируются с 1969 года, они предназначены для подготовки производственной и питьевой воды для нужд ОАО «АВТОВАЗ», его предприятий и жилищно-коммунального фонда Автозаводского р-на г.о. Тольятти. Проектная производительность насосной станции первого подъема ОАО «АВТОВАЗ» составляет 480 тыс. куб. метров в сутки, производительность очистных сооружений водоснабжения – 305 тыс. куб. метров в сутки. С 2006 года отмечается снижение потребления воды. Однако в летний период при максимуме водоразбора ОАО «АВТОВАЗ» вынуждено вводить ограничение по водоснабжению Автозаводского р-на и промышленно-коммунальной зоны, что связано с незавершенными работами по реконструкции районных насосных станций – РНС-1 и РНС-2, напорных коллекторов, транспортирующих стоки на очистной станции канализации (ОСК) ОАО «АВТОВАЗ» [2]. Применяемая технология водоподготовки решает задачу получения качества питьевой воды, удовлетворяющего нормативным требованиям. Однако ухудшение состояния источников водоснабжения, возрастающий риск их антропогенного загрязнения в условиях маловодья и постоянного ужесточения нормативов качества питьевой воды обуславливают необходимость внедрения современных эффективных технологий [2–6].

Учитывая особенность питьевого водоснабжения Автозаводского р-на и то, что источником водоснабжения является речная вода Куйбышевского водохранилища, куда сбрасываются без очистки до 100 тыс. куб. метров в сутки производственных и дождевых сточных вод, а также учитывая незащищенность и неблагоприятное качество волжской воды, обуславливающее необходимость проведения дорогостоящих мероприятий по водоподготовке до требуемых кондиций, участвовавшие в последнее время перебои в обеспечении населения питьевой водой, а также для необходимости обеспечения населения питьевой водой в период чрезвычайных си-

туаций, мэрией г.о. Тольятти проработан вопрос по строительству в Автозаводском р-не водозаборов питьевой воды – «Лесной» и «Лесной-2» из подземных источников общей производительностью 35,5 тыс. куб. метров в сутки (23,0 тыс. куб. метров и 12,5 тыс. куб. метров соответственно) в соответствии с ГОСТ Р 22.6.01.-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита систем хозяйственно-питьевого водоснабжения», система хозяйственно-питьевого водоснабжения средних и крупных городов должна базироваться не менее чем на двух независимых источниках водоснабжения [7–9]. Для целей хозяйственно-питьевого водоснабжения должны быть привлечены все возможные ресурсы подземных вод. При этом минимальная доля подземных вод в общем объеме водоснабжения города должна быть достаточной, чтобы иметь возможность обеспечивать бесперебойную подачу воды населению при отключении головных сооружений поверхностных источников в период их аварийного загрязнения.

Транспортировка питьевой воды осуществляется по системе трубопроводов протяженностью более 384 км. Водопроводная сеть является одним из уязвимых элементов в системе водоснабжения города. Средний физический износ водопроводных сетей Автозаводского р-на (эксплуатирующая организация ОАО «ТЕВИС») составляет 87,1 %, оборудования водопроводных насосных станций (ВНС) – 59,4 %. Ежегодно капитальный ремонт выполняется на сетях водоснабжения протяженностью 6–8 км, включая магистральные сети. Установленный нормативный срок службы исчерпали около 112 км труб, т. е. 30 % от общей протяженности. Ежегодный прирост мортизированных сетей водоснабжения достигает от 30 км и более.

Для хозяйственно-питьевого водоснабжения г.о. Тольятти (Центрального и Комсомольского районов) используется вода, добываемая из подземных источников Тольяттинского месторождения, находящихся в хозяйственном ведении организации водопроводно-канализационного хозяйства. Добываемая вода по своим качественным характеристикам соответствует действующим нормам СанПиН «Вода питьевая» [5; 6], поэтому на всех водозаборах отсутствуют системы водоподготовки.

Для водоснабжения Центрального и Комсомольского р-нов г.о. Тольятти в качестве источников водоснабжения организация водопроводно-канализационного хозяйства использует 8 водозаборов подземных вод, расположенных в центральной части Тольяттинского месторождения. Каждый водозабор включает в себя группу водозаборных скважин (от 1 до 59 скважин), накопительные резервуары чистой воды и насосные станции второго подъема, а также сети водопровода различного диаметра. Вода с водоносного горизонта забирается скважинами и по трубопроводам поступает в накопительные резервуары, далее без какой-либо водоподготовки насосными станциями второго подъема или самооттеком по магистральным водопроводам подается в разводящую сеть и далее потребителям. Среднесуточный забор воды составляет 120–125 тыс. куб. метров.

Общая протяженность магистральных, уличных и внутриквартальных эксплуатируемых сетей водопровода Центрального и Комсомольского р-нов, поселка Поволжский и Ягодинского лесничества, квартал № 5 оздоровительного комплекса «Алые паруса» составляет 480,58 км.

Анализ существующего состояния сетей водоснабжения, проведенный организацией водопроводно-канализационного хозяйства, показал, что процент износа составляет 84,67 %, для поддержания системы водоснабжения в технически исправном состоянии требуется ежегодно перекаладывать сети диаметром до 400 мм – 23,0 км и диаметром более 400 мм – 4,3 км.

Водопроводные сети Центрального и Комсомольского р-нов (материалы труб: сталь, чугун и полиэтилен, асбестоцемент, диаметры от 25 мм до 1400 мм) представляют собой кольцевые водопроводные сети, включающие магистральные водоводы и разводящую уличную и внутриквартальную сеть (рис. 1).

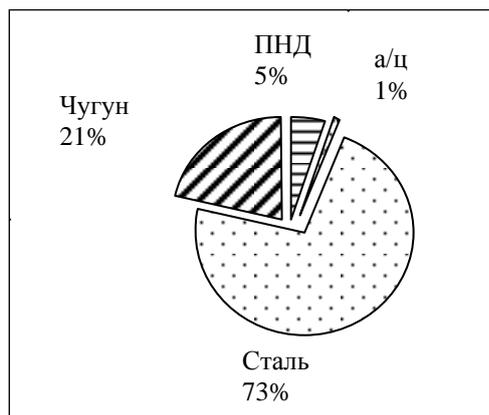


Рис.1. Материалы труб Центрального и Комсомольского р-нов

Давление в сети центральной части Комсомольского р-на и жилого массива «Шлюзовой» определяется уровнем воды в резервуарах водозаборов, а в водопроводных сетях Центрального р-на и мкр-на «Железнодорожный» – давлением насосов насосной станции второго подъема.

Анализ существующего давления в водопроводной сети показывает, что практически на всей территории центральной части Комсомольского р-на свободный напор превышает максимально допустимый свободный напор, который, согласно СНиП [7], в наружной сети хозяйственно-питьевого водопровода у потребителей не должен превышать 60 м. Такое положение объясняется значительной разностью отметок уровня воды в резервуарах и отметок земли в жилой застройке. Во многих узлах сети напор превышает 80 м, а в районе ул. Ярославской и ул. Мурысева свободный напор по данным замеров равен 102 м. Эксплуатация такой сети имеет как положительные моменты, так и отрицательные.

Положительным моментом является то, что практически все здания независимо от этажности обеспечиваются требуемым напором непосредственно из водопроводной сети, что позволяет получать значительный экономический эффект и снижение эксплуатационных затрат.

Отрицательными моментами являются:

1. Рост нерациональных потерь воды потребителями;
2. Рост аварийных ситуаций, вызванных избыточными напорами.

Исследованиями установлено, что при снижении среднего напора на вводе в здание на 10 м достигается уменьшение общего суточного расхода воды на 5–8 % при прочих равных условиях. Следовательно, фактическое водопотребление может значительно отличаться от нормативного [10–13]. Анализ структуры водопроводной сети показывает четко выраженную систему водоводов и перемычек. Анализ работы водопроводной сети при максимальном часовом водопотреблении показывает:

а) в водопроводной сети центральной части района расчетные свободные напоры в большей части узлов превосходят регламентируемый СНиПом [7] максимально допустимый напор – 60 м;

б) расчетные скорости в участках сети колеблются от 0,01 м/с до 0,99 м/с, причем большее число участков (67,6 % от общего количества) работает со скоростями менее 0,3 м/с.

На рис. 2 представлена гистограмма распределения участков по их нагрузке в процентном соотношении. Только 15 % участков работает со скоростями более 0,5 м/с. Потери напора в участках небольшие, поэтому разница в пьезометрических напорах между точкой подключения водовода к сети и наиболее удаленными точками сети составляет примерно 2 м. Это говорит о том, что водопроводная сеть обладает большой пропускной способностью. Наиболее нагружены водоводы от водозаборов, в которых скорость достигает 0,99 м/с (рис. 2). Скорость на других водоводах меняется по мере разбора воды.

Важен следующий факт. Наблюдается стабильное водопотребление в ночные часы суток, которое примерно в 2 раза меньше максимального. Это говорит о том, что в общем объеме водопотребления есть постоянная составляющая – утечки воды у потребителя. Такое положение характерно для систем водоснабжения с высоким давлением в водопроводной сети [14–16]. В таких случаях фактическое водопотребление превышает нормативное.

Наличие повреждений на стальных водопроводных сетях подтверждает их физический износ [17; 18]. На рис. 3 представлена диаграмма изменения количества повреждений n в зависимости от изменения диаметра стальных трубопроводов. Производственной программой перекаладки сетей водоснабжения предусматриваются с заменой стальных труб на полиэтиленовые среднего и высокого давления.

Ежегодно на трубопроводах и оборудовании городской водопроводной сети города фиксируется более 250 различных аварий и повреждений (табл. 1), причем для устранения трети из них требуется проведение раскопочных работ.

Увеличение дефектов на сетях водопровода связано с продолжением старения [17; 18]. В настоящее время из 480,58 км водопровода в аренде 336,06 км имеет износ 92–100 %. Для поддержания уровня износа сетей необходимо ежегодно перекаладывать 21,26 км сетей (табл. 2), что способствует допустимости эксплуатации водопроводных сетей и снижения уровня износа по общей протяженности сети водопровода.

Для обновления сетей водопровода объем плановой перекаладки должен превышать амортизационный износ. Планы ремонтов на будущие годы разрабатываются

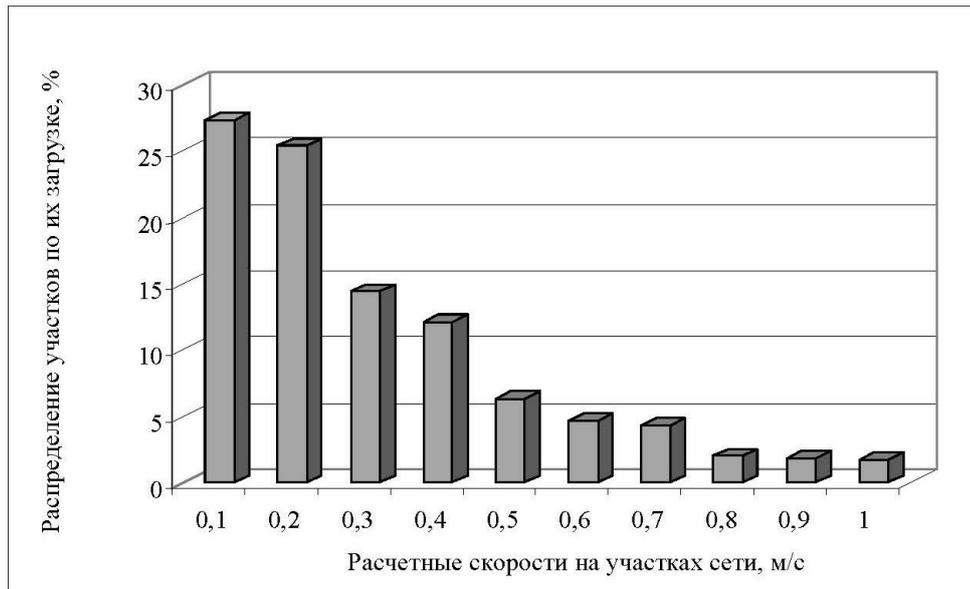


Рис. 2. Распределение участков сети по скорости

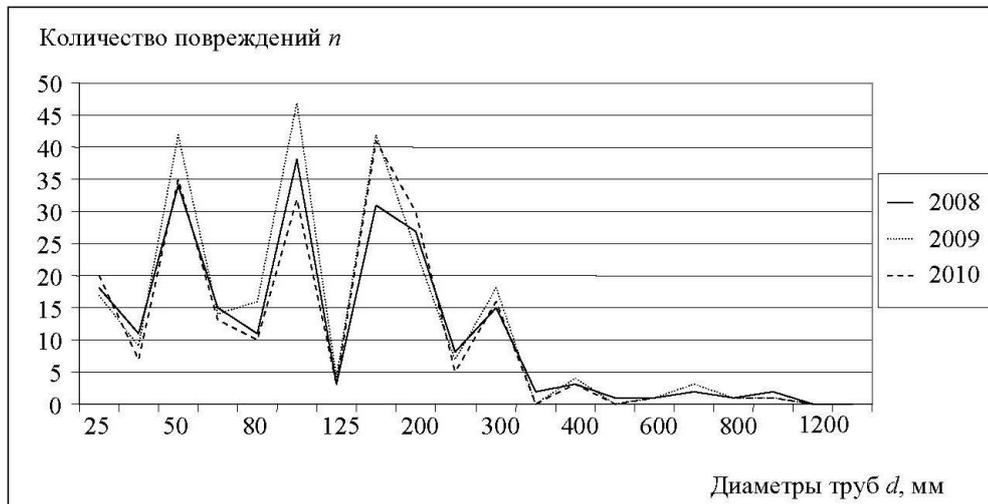


Рис. 3. Повреждения на стальных трубопроводах

Таблица 1. Аварийность на водопроводных сетях

Период	Аварии	Отказы	Удельная аварийность на водопроводных сетях, количество порывов, км
2007 факт	1	254	0,48
2008 факт	1	265	0,57
2009 факт	1	287	0,60
2010 факт	2	259	0,54

Таблица 2. Необходимый ежегодный объем перекладки

Материал труб	Норма амортизации, %	Протяженность, км	Объем перекладки, км/год
Сталь	5,00	347,74	17,39
Чугун	2,88	130,53	3,76
Асбестоцемент	5,00	2,20	0,11
Железобетон	3,30	0,11	0,00
Итого		480,58	21,26

исходя из прогноза выделения средств на эти цели. Системный анализ трубопроводных систем на зарастание не проводится, данные не собираются, но по опыту эксплуатации наибольшие зарастания наблюдаются на стальных трубопроводах, затем на чугунных. На полиэтиленовых трубах практически отсутствуют отложения либо присутствуют в виде пленки.

В зависимости от гидравлического режима трубопроводов зарастание происходит менее или более интенсивно. На участках трубопроводов с малыми скоростями 0,1–0,5 м/с наблюдается уменьшение сечения до 40 %. В зависимости от диаметра трубопроводов толщина твердых отложений достигает: при небольших диаметрах 4 мм, а на трубопроводах диаметром 1000 мм – до 15 см. Наибольший слой отложений наблюдается в донной части трубопровода на стенках и верхней части слой отложений значительно меньше. При промывке снимаются не все отложения, а лишь мягкие. Промывка ведется до полного очищения воды от взвешенных веществ. При этом твердые отложения могут остаться на стенках трубопровода, что, несомненно, в дальнейшем будет значительно ухудшать гидравлические свойства трубопровода.

По данным ПК «Водоканал», за 2011 год зафиксировано 459 отказов на сетях водопровода, находящихся в эксплуатации организации водопроводно-канализационного хозяйства, а также на частных сетях водопровода (рис. 4, 5, 6). Под отказом понимается событие, когда сети и их элементы полностью или частично перестают выполнять свои функции, т. е. функции водообеспечения.

Всего за 2011 год зафиксировано 459 отказов, из них: в колодце 299 шт.; в траншее (на трубопроводе) – 160 шт.

Согласно собранным данным сделан вывод, что наибольшее количество отказов (35 %) приходит на трубопроводы, находящиеся в грунте (в траншее). Причиной отказов служат свищи, коррозия (74 %); износ трубопровода (25 %); течь по сварному шву (1 %). Наиболее часто происходят отказы на сетях диаметром: 100 мм – 43 %;

150 мм – 20 %; 200–300 мм – 17 %. На стальные трубопроводы приходится 86 % отказов.

Причиной сложившейся ситуации стало низкое качество материала трубопроводов. Большинство трубопроводов водопроводной сети г.о. Тольятти имеет в настоящее время значительный физический износ, так как они были построены и введены в эксплуатацию в период бурного жилищного строительства в 1960–1980 гг. прошлого века без учета требований надежности применяемым материалам и организационно-технических возможностей эксплуатирующих организаций. Причины сложившейся в последние годы напряженной ситуации с обеспечением надежности водопроводной сети связаны с тем, что, вопреки требованиям СНиП при строительстве водопроводов, в бывшем СССР широко использовались стальные трубы, не защищенные от внутренней и внешней коррозии.

В этот период времени наблюдался дефицит качественных труб и арматуры, выпуск чугунных труб отечественной промышленностью был прекращен, а вместо них производились только стальные, из некачественной низколегированной стали и без антикоррозионной защиты. Срок службы таких стальных труб не превышает 20 лет.

Опыт эксплуатации подземных водозаборов показывает, что не всегда обычный санитарно-химический анализ воды подземного источника водоснабжения позволяет определить форму, в которой железо и марганец находятся в воде.

В воде подземного источника железо обычно находится в истинно растворенном состоянии и виде бикарбоната закиси железа $[\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2]$. Такая вода в первое время по выходу из скважины бесцветна и прозрачна, но при стоянии в открытом сосуде постепенно мутнеет и из нее выпадает красно-коричневый осадок. Если в воде одновременно содержится железо и сероводород, то вода оказывается загрязненной тонкодисперсной взвесью сульфида железа (FeS), придающей воде черную окраску.

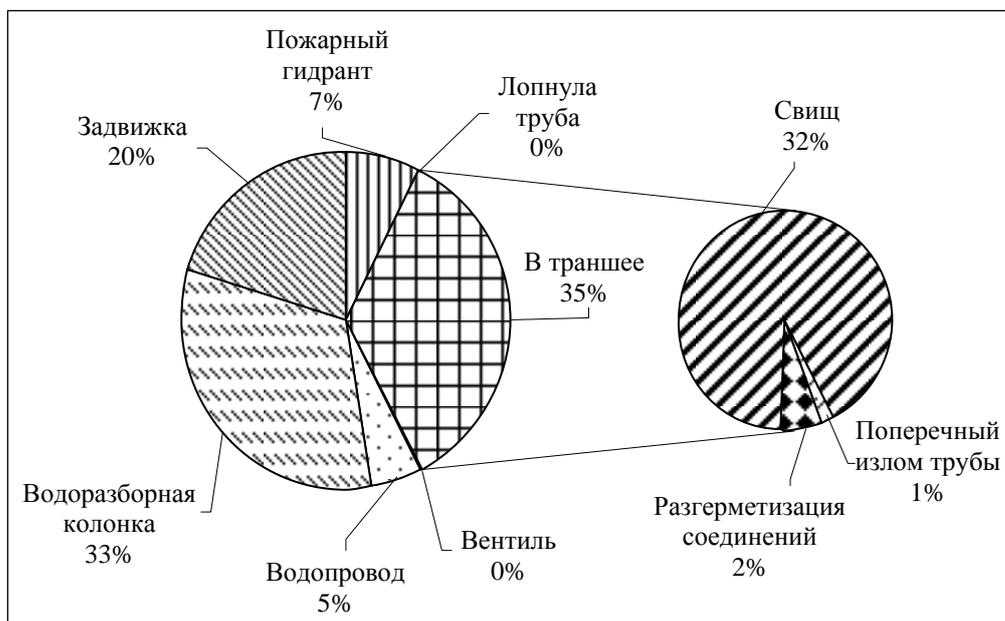


Рис. 4. Отказы на сетях водопровода в 2011 г.

Кроме железа в воде подземных водозаборов содержится марганец. Марганец в воде подземных источников чаще всего встречается в виде бикарбоната закиси $[Mn(HCO_3)_2]$. При контакте с воздухом прежде всего из воды выделяется осадок гидроокиси железа, так как железо окисляется легче, чем марганец. Марганец растворенным в воде кислородом при $pH < 7$ не окисляется.

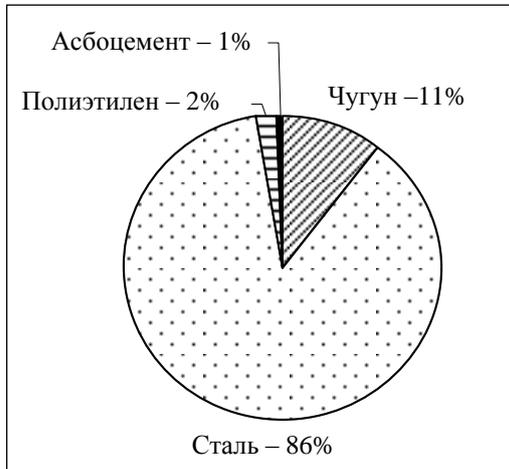


Рис. 5. Отказы (в траншее) по материалам труб

Практикой установлено, что окисление марганца и железа осуществляется хлорированием. Хлор окисляет Mn^{2+} в Mn^{3+} при $pH=6,5 \div 7$ за 2-3 часа. Расход хлора на окисление 1 мг марганца в отсутствие аммонийных солей составляет примерно 1,3 мг, при наличии NH_4^+ расход хлора увеличивается на величину, необходимую для их связывания.

На окисление 1 мг двухвалентного железа расходуется около 0,64 мг Cl_2 , щелочность воды при этом снижается на 0,018 ммоль/л на каждый 1 мг удаленного из воды железа. Окисление закисного железа хлором идет очень быстро, так, при содержании в воде железа 1,0 мг/л окисление происходит в течение 10–15 мин. Окисленные Mn и $Fe(OH)_3$ выпадают в осадок. Осадок образуется на стенах труб и резервуаров, кроме того, в резервуарах имеются «мертвые» зоны, где не происходит обмена воды, что создает условия для образования сульфида железа, который представляет собой черный тонкодисперсный осадок. В подземной воде подземных водозаборов, питающих Центральный и Комсомольский р-ны, содержится как железо в двухвалентной форме, так и марганец.

Периодически резервуары чистой воды останавливают на чистку и хлорирование. В период остановки вода из резервуара сбрасывается полностью в сеть, поэтому часть железа, выпавшего в осадок, перед чисткой резервуара попадает в разводящую сеть. При хлорировании воды, находящейся в течение суток в резервуаре для дезинфекции, происходит окисление хлором двухвалентного железа и марганца, в результате чего содержание взвешенных веществ и мутность воды, поступающей в сеть из резервуара, увеличивается.

Выносимый осадок в водопроводную сеть при скоростях движения воды в трубах меньше 0,7 м/с оседает на стенках труб, в тупиковых участках водопроводной сети с малым обменом воды происходит образование сульфида железа, происходит развитие железобактерий. Образование сероводорода здесь может происходить вследствие восстановления содержащихся в воде сульфатов в результате жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий. При окислении железа и марганца в воде образуется осадок, который при малых скоростях

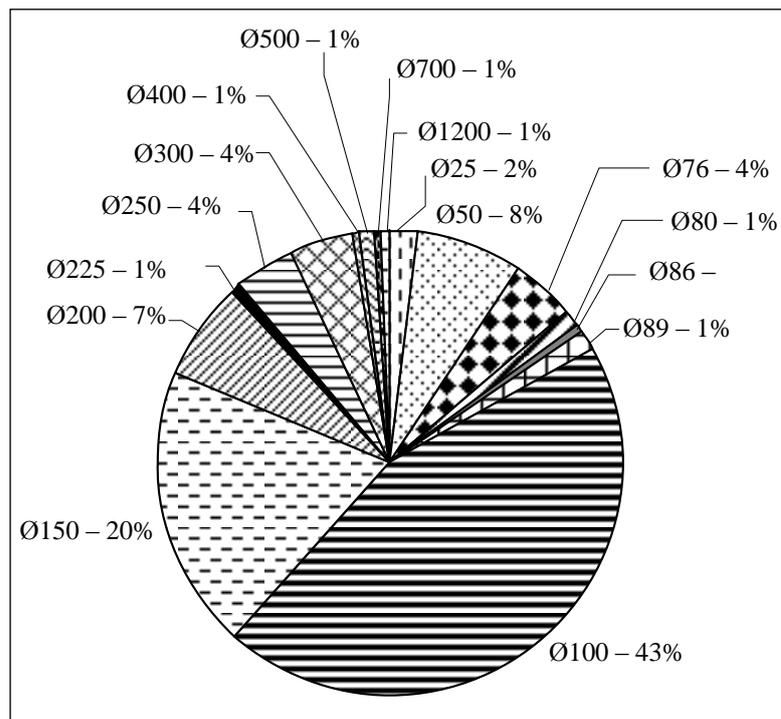


Рис. 6. Отказы на трубопроводе (в траншее) по диаметрам

оседает на стенках труб. В результате этот осадок накапливается и периодически, срываясь со стенок (изменяется скорость, направление движения воды), ухудшает качество подаваемой потребителю воды.

Анализ результатов физико-химического состава воды, поступающей из скважин в резервуары, и качества воды, поступающей потребителям, позволяет сделать следующие выводы:

1. Среднее значение качественного состава воды, подаваемой потребителям, соответствует требованиям СанПиН [5] по всем показателям, кроме железа общего и марганца. Средние концентрации железа и марганца соответствуют согласованным значениям (не превышает 0,8 и 0,5 мг/л).

2. В периоды чистки резервуаров, при полном сбрасывании воды из резервуара перед чисткой и после хлорирования с водой выносятся взвесь в водопроводную сеть, в результате в питьевой воде возрастает содержание взвешенных веществ, а мутность воды превышает требования СанПиН 2.1.4.559-96 [5]. Взвесь оседает на стенках труб и создает условия для образования сульфида железа (черный тонкодисперсный осадок).

3. При остановке резервуаров необходимо обеспечивать тщательную очистку стен и днища от отложений взвеси, не допускать мест с накоплением железистых отложений, в противном случае в этих местах будет образовываться сульфид железа, способствующий развиту железобактерий.

При сборе информации о состоянии трубопроводов систем водоснабжения г.о. Тольятти была выявлена проблема – отсутствие единой информационной базы. Разрозненность первичной документации, такой как исполнительная документация, паспорта трубопроводов, паспорта акврий, инвентаризационные данные и пр., усложняет процесс оценки и составления прогноза показателей надежности, выбора приоритетных объектов санации трубопроводов, что в дальнейшем приводит к неэффективной эксплуатации трубопроводных систем. По этой причине необходимо создание единой электронной информационной базы. Для автоматизированного ввода, хранения, обработки и выдачи необходимой информации по оценке и прогнозу уровня надежности трубопроводов и оборудования водопроводной сети необходимо применение автоматизированного информационно-технического обеспечения, включающего в себя базы данных (БД) [19]: паспортов участков сети; паспортов водосчетчиков; паспортов колодцев и камер; паспортов водопроводного ввода; эскизов детализировки запорной арматуры колодцев и камер; графического изображения водопроводной сети; схем водомерного узла; текущего состояния трубопроводов (результаты диагностического контроля); прочих эксплуатационных параметров (напоры в сети, данные группы гидроизмерений и т. п.); учтенного водопотребления; качества воды в распределительной сети; по повреждениям и восстановлению участков трубопроводов и арматуры; выданных Технических условий на водоснабжение объекта, переключку, санацию, проектирование СКЗ.

Такая база данных позволит выбирать первоочередные объекты восстановления, к которым относятся объекты, имеющие наибольший риск аварий и которые в ближайшее время с экономической и с технической

позиций окажутся непригодными для дальнейшего нормального функционирования, т. е. потребуются их восстановление.

Для практической реализации алгоритма выбора потенциальных и приоритетных (первоочередных) объектов восстановления трубопроводов методами бестраншейных технологий (санации) разработано автоматизированное информационно-техническое обеспечение (система АИТС «Санация») [19; 20].

Как и в большинстве российских городов, в г.о. Тольятти для восстановления трубопроводов систем водоснабжения используется преимущественно открытый способ, т. е. проведение земляных работ с раскопкой траншей или котлованов, ремонтом или заменой трубопровода. Чаще всего лишь в случае пересечения трубопроводов с автодорогами, чтобы предотвратить разрушение асфальтового покрытия и перекрытие движения автотранспорта, используются бестраншейные методы, такие как метод горизонтально-направленного бурения, метод «труба в трубе».

Предлагаемые на строительном рынке методы восстановления трубопроводов достаточно разнообразны. Инженерные коммуникации – особая сфера, которая требует более тщательной проработки при принятии решения. При малейшей ошибке решение вопроса в денежном выражении вырастает в несколько раз. Поэтому перед принятием решения необходимо провести диагностику трассы и на основе обследований выбрать метод восстановления трубопровода. В случае если трасса не подлежит ремонту, принимается решение ее замены. Отечественные и зарубежные производители предлагают обширный перечень оборудования для разрушения старых трубопроводов из любого материала с одновременной заменой их на полиэтиленовые трубы большего сечения. Подобное оборудование позволяет решить сразу несколько задач: избежать переключки трубопровода, увеличить пропускную способность. Несомненно, бестраншейные методы ремонта и замены коммуникаций значительно выгоднее, чем проектирование и строительство новых коммуникаций. И чем раньше мы сможем приступить к ремонту, тем выгоднее это для владельцев сетей и жителей городов. Наибольший интерес для формирования подходов к вопросам экологической безопасности и надежности при функционировании систем водоснабжения крупных городов представляют последние работы В.А. Орлова, С.В. Храменкова, О.Г. Примины, В.А. Харьковина [19–26]. В них наиболее полно освещен вопрос совершенствования методов бестраншейной реконструкции трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения на примере г. Москвы. Большой вклад в развитие теории и практики водоснабжения вносят МГУП «Мосводоканал», НИИ ВОДГЕО, НИИ КВОВ, АКХ им. К.Д. Памфилова. В [22–24; 26] представлены сведения о последних достижениях в области бестраншейных технологий строительства, реконструкции, модернизации подземных инженерных сетей, систематизированы и проанализированы вопросы, связанные с использованием труб и защитных покрытий из традиционных и новых материалов, а также оборудования для бестраншейных технологий, описаны основные принципы современных методов локации, телеинспекции инженерных сетей, прочистки и эксплуатации подземных трубопроводов.

В последние десятилетия в сфере эксплуатации и ремонта городских коммунальных систем водоснабжения стало популярным направление, получившее название бестраншейной технологии восстановления (санации) старых (ветхих) и прокладки новых трубопроводов. Это направление является альтернативой открытому способу ремонта, реконструкции и строительства подземных трубопроводов любого предназначения [23].

Под бестраншейными технологиями понимаются технологии прокладки, замены, ремонта, инспекции и обнаружения дефектов в подземных коммуникациях различного назначения с минимальным вскрытием земной поверхности. Бестраншейные технологии санации и прокладки трубопроводов наряду с оперативностью и экономичностью по сравнению с традиционными методами (проведение работ открытым способом) позволяют не нарушать сложившуюся экологическую обстановку.

Целью бестраншейной технологии является полное восстановление структуры трубопровода путем устранения всех видов дефектов по длине труб и в местах их стыковки при соблюдении (поддержании) исходных гидравлических характеристик течения потока жидкости. Восстановление структуры призвано обеспечить механическую прочность сооружению (трубопроводу) для выдерживания им постоянных нагрузок (насыпного грунта, покрытий) и временных (транспортных средств). При этом восстановление структуры не должно сопровождаться появлением дополнительных проблем, которые ранее не наблюдались.

Для решения задачи по гарантированному обеспечению жителей г.о. Тольятти чистой питьевой водой необходима организация совместных действий органов исполнительной и законодательной власти, предприятий водного сектора, инвесторов, технических специалистов, населения города по созданию в водном секторе эффективных, качественно новых, современных форм и методов управления. Необходимо отметить, что восстановление сетей и сооружений требует серьезных предварительных проработок (научно-технических, экономических, организационных и т. д.), на которые может быть затрачено до 25 % средств, выделяемых на восстановление объекта. Об этом и о других проблемах этого направления будем представлять более обобщающие научные материалы в последующих статьях.

Выводы и рекомендации. Анализ существующего состояния сетей водоснабжения показал, что большинство трубопроводов водопроводной сети г.о. Тольятти имеет в настоящее время значительный физический износ, так как они были построены и введены в эксплуатацию в период бурного жилищного строительства прошлого века без учета требований надежности применяемым материалам и организационно-технических возможностей эксплуатирующих организаций.

Отсутствует единая информационная база о состоянии трубопроводов. Разрозненность первичной документации, такой как исполнительная документация, паспорта трубопроводов, паспорта аварий, инвентаризационные данные и пр., усложняет процесс оценки и составления прогноза показателей надежности, выбора приоритетных объектов санации трубопроводов, что в дальнейшем приводит к неэффективной эксплуатации трубопроводных систем. По этой причине необходимо создание единой электронной информационной базы.

Такая база данных позволит выбирать первоочередные объекты восстановления, к которым относятся объекты, имеющие наибольший риск аварий и которые в ближайшее время с экономической и с технической позиций окажутся непригодными для дальнейшего нормального функционирования, т. е. потребуются их восстановление.

В периоды чистки резервуаров, при полном срабатывании воды из резервуара перед чисткой и после хлорирования с водой выносятся взвесь в водопроводную сеть, в результате в питьевой воде возрастает содержание взвешенных веществ, а мутность воды превышает требования СанПиН 2.1.4.559-96. Взвесь оседает на стенках труб и создает условия для образования сульфида железа (черный тонкодисперсный осадок). При остановке резервуаров необходимо обеспечивать тщательную очистку стен и днища от отложений взвеси, не допускать мест с накоплением железистых отложений, в противном случае в этих местах будет образовываться сульфид железа, способствующий развитию железобактерий.

Как и в большинстве российских городов, в г.о. Тольятти для восстановления трубопроводов систем водоснабжения используется преимущественно открытый способ, т. е. проведение земляных работ с раскопкой траншей или котлованов, ремонтом или заменой трубопровода. Ухудшение состояния источников водоснабжения, возрастающий риск их антропогенного загрязнения в условиях маловодья и постоянного ужесточения нормативов качества питьевой воды обуславливают необходимость внедрения современных эффективных технологий.

Предлагаемые на строительном рынке методы восстановления трубопроводов достаточно разнообразны. Инженерные коммуникации – особая сфера, которая требует более тщательной проработки при принятии решения. При малейшей ошибке решение вопроса в денежном выражении вырастает в несколько раз. Поэтому перед принятием решения необходимо провести диагностику трассы и на основе обследований выбрать метод восстановления трубопровода. Несомненно, бестраншейные методы ремонта и замены коммуникаций значительно выгоднее, чем проектирование и строительство новых коммуникаций. Целью бестраншейной технологии является полное восстановление структуры трубопровода путем устранения всех видов дефектов по длине труб и в местах их стыковки при соблюдении (поддержании) исходных гидравлических характеристик течения потока жидкости. Восстановление структуры призвано обеспечить механическую прочность сооружению (трубопроводу) для выдерживания им постоянных нагрузок (насыпного грунта, покрытий) и временных (транспортных средств). При этом восстановление структуры не должно сопровождаться появлением дополнительных проблем, которые ранее не наблюдались. Для практической реализации алгоритма выбора потенциальных и приоритетных (первоочередных) объектов восстановления трубопроводов методами бестраншейных технологий (санации) разработано автоматизированное информационно-техническое обеспечение (система АИТС «Санация») [19; 20].

Для решения задачи по гарантированному обеспечению жителей г. Тольятти и других регионов России

чистой питьевой водой необходима организация совместных действий органов исполнительной и законодательной власти, предприятий водного сектора, инвесторов, технических специалистов, населения города по созданию в водном секторе эффективных, качественно новых, современных форм и методов управления. Необходимо отметить, что восстановление сетей и сооружений требует серьезных предварительных проработок (научно-технических, экономических, организационных и т. д.), на которые может быть затрачено до 25 % средств, выделяемых на восстановление объекта. Об этом и о других проблемах этого направления будем представлять более обобщающие научные материалы в последующих статьях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РФ. Правительство. Об утверждении Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года : распоряжение № 1235-р от 27.08.2009 (ред. от 28.12.2010).
2. Селезнева А.В., Селезнев В.А., Сайридинов С.Ш. Проблемы водоснабжения г. Тольятти и их обоснование решения комплексными исследованиями (на примере Автозаводского района) // Яковлевские чтения: сб. материалов IX научно-практ. конференции. М.: МГСУ, 2014. С. 18–21.
3. Селезнева А.В., Селезнев В.А., Сайридинов С.Ш. Инструмент превентивного воздействия. Экологическое нормирование биогенной нагрузки на источники питьевого водоснабжения (на примере Саратовского водохранилища) // Вода MagaZine. 2012. № 4. С. 40–43.
4. Селезнева А.В. От мониторинга к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007. 105 с.
5. СанПиН 2.1.4.559-96. Питьевая вода: Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарные правила и нормы. М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 11 с.
6. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. 103 с.
7. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. М.: Госстрой России, 2001. 128 с.
8. СНиП 2.04.01-85*. Внутренний водопровод и канализация зданий. М.: Госстрой России, 2000. 128 с.
9. СНиП 2.07.01-89*. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 56 с.
10. Водоснабжение. Водоотведение. Оборудование и технологии / гл. ред. С.А. Грачев. М.: Стройинформ, 2006. 401 с.
11. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения / под ред. В.Д. Дмитриева. 3-е изд. Л.: Стройиздат, 1988. 383 с.
12. Монтаж систем внешнего водоснабжения и канализации / под ред. А.К. Перешивкина. 4-е изд. М.: Стройиздат, 1988. 653 с.
13. Наладка и интенсификация работы городских систем подачи и распределения воды. М.: Стройиздат, 1978. 111 с.
14. Сайридинов С.Ш. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения. М.: АСВ, 2012. 352 с.
15. Сайридинов С.Ш. Основы гидравлики. М.: АСВ, 2014. 384 с.
16. Сомов М.А., Журба М.Г. Водоснабжение. Т. 1. Системы забора, подачи и распределения воды. М.: АСВ, 2008. 262 с.
17. Сайридинов С.Ш., Чернышева А.В. О причинах реконструкции трубопроводов водопроводных систем подачи и распределения воды // Природоресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России: материалы IX междунар. научно-практ. конференции. Пенза: МНИЦ ПГСХА, 2011. С. 98–102.
18. Сайридинов С.Ш. Влияния старения и коррозии трубопроводов водопроводных и водоотводящих сетей на качество транспортируемой воды ВНИИН-ТПИ Госстроя России // Экспресс-информация. Серия: Строительство и архитектура. 2004. № 1. С. 81–84.
19. Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. М.: Стройиздат, 2005. 400 с.
20. Орлов В.А., Харькин В.А. Стратегии и методы восстановления подземных трубопроводов. М.: Стройиздат, 2001. 96 с.
21. Храменков С.В., Примин О.Г. Регламент эксплуатации водопроводной сети г. Москвы. М.: Миклош, 2007. 224 с.
22. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Бестраншейные методы восстановления трубопроводов. М.: Прима-Пресс-М, 2002. 283 с.
23. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Бестраншейные методы восстановления трубопроводов. М.: ТИМР, 2009. 179 с.
24. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Реконструкция трубопроводных систем. М.: АСВ, 2008. 216 с.
25. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А., Отставнов А.А. Регламент использования полиэтиленовых труб для реконструкции сетей водоснабжения и водоотведения. М.: Миклош, 2007. 264 с.
26. Бестраншейные технологии в России. М.: ТА Инжиниринг, 2006. 304 с.

REFERENCES

1. RF Government Order "About the confirmation of water strategy of the Russian Federation for the period until 2020" of August 27, 2009 no. 1235-p (as amended by Order of December 28, 2010). (In Russ.).
2. Selezneva A.V., Seleznev V.A., Sayriddinov S.Sh. Problems of water supply of the city of Togliatti and their justification of the decision by complex research (on the example of Avtozavodskiy district). *Sbornik materialov IX nauchno-prakt. konf. "Yakovlevskie chteniya"*. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 18–21.
3. Selezneva A.V., Seleznev V.A., Sayriddinov S.Sh. Tool of preventive action. Ecological regulation of biogenic load on the drinkable water supply sources (on the example of Saratov water storage basin). *Voda MagaZine*, 2012, no. 4, pp. 40–43.

4. Selezneva A.V. *Ot monitoringa k normirovaniyu antropogennoy nagruzki na vodnye obyekty* [From monitoring to regulation of anthropogenic load on water objects]. Samara, SNTs RAN Publ., 2007, 105 p.
5. SanPiN 2.1.4.559-96. *Pityevaya voda: Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pityevogo vodosnabzheniya. Kontrol kachestva. Sanitarnye pravila i normy* [Drinkable water. Hygienic requirements to the quality of water of drinkable water central systems. Quality control. Sanitary rules and standards]. Moscow, Goskomsanepidnadzor Rossii Publ., 1996, 11 p.
6. SanPiN 2.1.4.1074-01. *Pityevaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pityevogo vodosnabzheniya. Kontrol kachestva. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normy* [Drinkable water. Hygienic requirements to the quality of water of drinkable water central systems. Quality control. Health and hygiene rules and standards]. Moscow, Federalniy tsentr Gossanepidnakhzora Minzdrava Rossii Publ., 2002, 103 p.
7. SNiP 2.04.02-84*. *Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya* [Water supply. External networks and facilities]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2001, 128 p.
8. SNiP 2.04.01-85*. *Vnutrenniy vodoprovod i kanalizatsiya zdaniy* [Internal water pipeline and canalization of buildings]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2000, 128 p.
9. SNiP 2.07.01-89*. *Gradostroitelstvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i selskikh poseleniy* [Urban construction. Planning and building of urban and rural settlements]. Moscow, FGUP TsPP Publ., 2005, 56 p.
10. Grachev S.A., ed. *Vodosnabzhenie. Vodootvedenie. Oborudovanie i tekhnologii* [Water supply. Water disposal. Equipment and technology]. Moscow, Stroyinform Publ., 2006, 401 p.
11. Dmitrieva V.D., ed. *Ekspluatatsiya sistem vodosnabzheniya, kanalizatsii i gazosnabzheniya* [Operation of systems of water supply, canalization and gas supply]. 3rd ed. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988, 383 p.
12. Pereshivkina A.K., ed. *Montazh sistem vneshnego vodosnabzheniya i kanalizatsii* [Mounting of external water supply and canalization systems]. 4th ed. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 653 p.
13. *Naladka i intensifikatsiya raboty gorodskikh sistem podachi i raspredeleniya vody* [Maintenance and intensification of operation of urban water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 111 p.
14. Sayriddinova S.Sh. *Gidravlika sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Hydraulics of water supply and water disposal systems]. Moscow, ASV Publ., 2012, 352 p.
15. Sayriddinova S.Sh. *Osnovy gidravliki* [Basics of hydraulics]. Moscow, ASV Publ., 2014, 384 p.
16. Somov M.A., Zhurba M.G. *Vodosnabzhenie. Vol. 1. Sistemy zabora, podachi i raspredeleniya vody* [Water supply. V.1. Systems of water intake, transport and distribution]. Moscow, ASV Publ., 2008, 262 p.
17. Sayriddinov S.Sh., Chernyshova A.V. About the causes of reconstruction of pipelines of water supply systems of water transport and distribution. *Materialy IX mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Prirodoresursniy potentsial, ekologiya i ustoychivoe razvitie regionov Rossii"*. Penza, MNITs PGSKhA Publ., 2011, pp. 98–102.
18. Sayriddinov S.Sh. The influence of aging and corrosion of pipelines of water supply and water disposal networks on the quality of transposable water of All-Russia Science and Research Institute of Gosstroy of Russia. *Ekspress-informatsiya. Seriya Stroitelstvo i arkhitektura*, 2004, no. 1, pp. 81–84.
19. Khramenkov S.V. *Strategiya modernizatsii vodoprovodnoy seti* [Strategy of modernization of water system]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2005, 400 p.
20. Orlov V.A., Kharkin V.A. *Strategii i metody vosstanovleniya podzemnykh truboprovodov* [Strategy and methods of reconstruction of underground pipelines]. Moscow, Stroyizdat Publ., 2001, 96 p.
21. Khramenkov S.V., Primin O.G. *Reglament ekspluatatsii vodoprovodnoy seti g. Moskvy* [Regulations for operation of water supply network of Moscow]. Moscow, Miklosh Publ., 2007, 224 p.
22. Khramenkov S.V., Primin O.G., Orlov V.A. *Bestransheyne metody vosstanovleniya truboprovodov* [Trenchless methods of pipelines reconstruction]. Moscow, Prima-Press-M Publ., 2002, 283 p.
23. Khramenkov S.V., Primin O.G., Orlov V.A. *Bestransheyne metody vosstanovleniya truboprovodov* [Trenchless methods of pipelines reconstruction]. Moscow, TIMP Publ., 2009, 179 p.
24. Khramenkov S.V., Primin O.G., Orlov V.A. *Rekonstruktsiya truboprovodnykh sistem* [Reconstruction of pipeline systems]. Moscow, ASV Publ., 2008, 216 p.
25. Khramenkov S.V., Primin O.G., Orlov V.A., Otstavnov A.A. *Reglament ispolzovaniya polietilennykh trub dlya rekonstruktsii setey vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Rules for applying polyethylene tubes for reconstruction of water supply and water disposal networks]. Moscow, Miklosh Publ., 2007, 264 p.
26. *Bestransheyne tekhnologii v Rossii* [Trenchless technologies in Russia]. Moscow, TA Inzhiniring Publ., 2006, 304 p.

HYDRAULIC AND TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS OF WATER SUPPLY SYSTEMS OPERATION IN THE VOLGA REGION ENVIRONMENT

© 2015

S.S. Sayriddinov, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chairs “Heat and gas-supply and ventilation, water supply and water disposal”,
“Energy machines and management systems”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: water supply; surface sources; underground sources; natural water; anthropogenic pollutions; water intake; water consumption; drinkable water; purification plants; water supply network; pipelines; reconstructions; operation; water supply physical wear; trenchless technology; pipeline system reconstruction.

Abstract: The paper considers the state of networks and facilities and the ways of efficiency improvement of utility and drinking water supply systems operation in the Volga region environment using the example of Togliatti city district. The author defines the priorities according to the strategy of social and economic development of Samara region for the period until the year 2020. It is noted, that the main life spheres ensuring the safety of human life and health and, consequently, the increase of the amount of housing construction and the communal infrastructure, as well as the reduction of existing housing funds and communal infrastructure to the compliance with the quality standards are considered to be the priorities of state policy in the region. The supply of population with pure water is the priority problem which decision is necessary for health keeping and the human life level improvement. This paper gives the ecologo-statistical analysis of water supply sources, hydraulic and technological analysis of the processes of preparing and transporting drinkable water, the state of pipelines of water distribution and the degree of their breakdowns in order to make a decision on the ensuring of hydraulic decision, efficiency improvement of utility and drinking water supply and distribution while operating water supply systems of Russia using the example of Togliatti city district. The improvement of level of anthropogenic pollution of drinking water supply sources, the significant wear of buildings and equipment of water sector, the lack of reserve water source (Avtozavodskiy district) determine the topicality of the problem of guaranteed supply of population with pure drinking water and make it the priority task of social and economic development of Togliatti city district. It is noted, that in order to solve the problem of supply of population of Togliatti city district with pure drinking water it is necessary to organize united actions of executive and legislative authorities, water sector enterprises, investors, technical specialists, population on the creation in water sector of effective whole new modern forms and methods of management. The author recommends alternative variants of reconstruction and operation of networks and buildings of utility and drinking water supply systems in this region. The scale of the problem causes the necessity to develop the Program with the use of target-oriented solution for the complex of organizational and technical, juridical, economic, social and other objectives and actions ensuring the conditions for the Program implementation. The application of special-purpose approach should provide the effective solution of system problems within the city water sector at the account of implementation of the complex of program actions fit together by the objectives, resources and deadlines.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ПОЛУФАБРИКАТОВ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

© 2015

В.В. Сапунов, ассистент кафедры «Технология машиностроения»

Н.И. Веткасов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Л.В. Худобин, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения»

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: микроволновый нагрев; абразивный инструмент; бакелитовая связка; термостатирование; математическая модель.

Аннотация: Обозначены преимущества и недостатки микроволнового способа термообработки полуфабрикатов абразивного инструмента (АИ). Описан способ микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ с использованием теплоизоляции объектов нагрева, который позволяет обеспечить равномерный нагрев стопки полуфабрикатов. Представлена физическая модель микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке в условиях термостатирования, на основе которой построена математическая модель и назначены начальные и граничные условия. Определены зависимости теплофизических характеристик полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке от температуры. Экспериментально определена зависимость удельной мощности тепловой энергии, выделенной и поглощенной в процессе полимеризации АИ за счет экзо- и эндотермических эффектов, от времени термообработки. Проведено численное моделирование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ методом конечных элементов в программной среде NX 7.5, в ходе которого обозначены источники выделения теплоты и зависимости изменения их удельной мощности от времени, заданы начальные и граничные условия в соответствии с построенной математической моделью. Представлены результаты численного моделирования в виде температурного поля в стопке полуфабрикатов АИ. На основе анализа моделей микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ, теплоизолированных различными материалами, выбран наиболее эффективный теплоизолятор. Выявлено значительное снижение градиента температур в процессе микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ за счет применения радиопрозрачной теплоизоляции. Путем численного моделирования процессов микроволновой термообработки выявлены режимы, обеспечивающие требуемые скорости нагрева полуфабрикатов АИ на различных этапах цикла термообработки. На полученных режимах проведено экспериментальное исследование влияния теплоизоляции на равномерность нагрева полуфабрикатов АИ в микроволновом поле.

Одной из наиболее длительных и энергоемких операций технологического процесса изготовления абразивного инструмента (АИ) на бакелитовой связке является термообработка полуфабрикатов [1; 2]. Существенно сократить длительность этой операции и повысить качество АИ на бакелитовой связке можно путем применения в процессе термообработки микроволнового нагрева, получившего широкое распространение в производстве строительных материалов, полимеров, керамики, резины, сушке древесины и др. [1; 3–6]. Уникальные параметры микроволнового излучения позволяют снизить длительность технологического цикла операции термообработки полуфабрикатов в несколько раз [7–11]. Однако тепловое излучение и конвективный теплообмен полуфабрикатов АИ с менее нагретой окружающей средой при микроволновом нагреве препятствуют минимизации длительности цикла термообработки, особенно ввиду неоднородности температурного поля в пространстве рабочей камеры [12–15]. В Ульяновском государственном техническом университете разработан способ микроволновой термообработки полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке, теплоизолированных сыпучим радиопрозрачным материалом: микроволновое излучение беспрепятственно проникает сквозь теплоизолирующий материал к стопке полуфабрикатов АИ, где рассеивается в виде теплоты, а летучие вещества, выделяющиеся в процессе полимеризации связки, после прохождения слоя сыпучего теплоизолятора удаляются из рабочей камеры с помощью системы вентиляции

[16]. Для оценки эффективности ряда теплоизолирующих материалов и назначения режимов термообработки при различных условиях выполнены математическое моделирование и численное исследование процесса микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке.

Физическая модель микроволнового нагрева стопки полуфабрикатов типоразмера 1 150' 25' 32 представлена на рис. 1. В рассматриваемой постановке для любого продольного сечения цилиндра задача будет осесимметричной и искомая функция будет зависеть только от трех переменных: $T=T(r, z, \tau)$. Соответствующее уравнение теплопроводности в полярных координатах будет иметь следующий вид [17]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v,$$

где τ – время, с;

T – температура, °С;

λ – теплопроводность материала, Вт/(м·°С);

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);

q_v – удельное внутреннее тепловыделение в объеме $dV=dx dy dz$, Вт/м³;

r, z – координаты в цилиндрической системе координат, м;

ρ – плотность материала, кг/м³.

Внутреннее тепловыделение в процессе микроволнового нагрева происходит только в стопке полуфабрикатов:

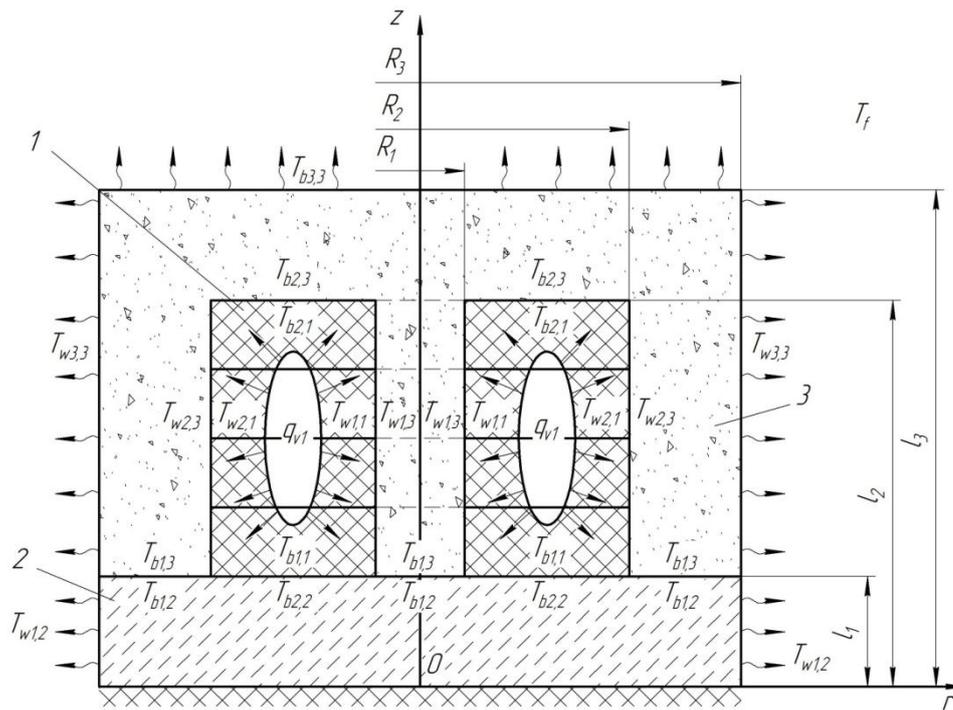


Рис. 1. Схема распространения тепловых потоков при микроволновой бакелизации стопки полуфабрикатов АИ 1, расположенных на диатомитовом основании 2 в условиях термостатирования радиопрозрачным теплоизолятором

$$q_v = q_{mw}(\tau) + q_e(\tau),$$

$$c_i(T) = 0,76T + 863,9.$$

где $q_{mw}(\tau)$, $q_e(\tau)$ – удельное внутреннее тепловыделение в материале, соответственно, за счет энергии микроволнового излучения и экзотермического эффекта, Вт/м³.

Удельная мощность тепловой энергии $q_{mw}(\tau)$, выделенной в материале полуфабриката за счет воздействия на него микроволнового поля, определяется следующим выражением [18]:

$$q_{mw}(\tau) = 0,55 \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta \omega E^2(\tau),$$

где ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м;
 $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 ε – диэлектрическая проницаемость;
 E – напряженность электрического поля, В/м;
 $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, рад/с;
 f – частота приложенного поля, Гц.

Значения параметров $\operatorname{tg} \delta$ и ε были определены по формуле Нильсена [19]: $\varepsilon = 7,89$, $\operatorname{tg} \delta = 0,011$. Зависимость напряженности электрического поля от времени $E(\tau)$ определяется режимом термообработки.

Энергия, выделяемая и поглощаемая в стопке полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке за счет реакции полимеризации $q_e(\tau)$, определена экспериментально (рис. 2) и табулирована. Так как реакция происходит в объеме связующего, то можно считать выделенную энергию равномерно распределенной по объему стопки.

Зависимость теплоемкости $c_i(T)$ опытных образцов полуфабриката АИ от температуры T в диапазоне 20...200 °С:

Таким образом, двумерная нестационарная математическая модель нагрева стопки полуфабрикатов в микроволновом поле выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} c_i(T) \rho \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_i}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \right) + q_{vi}; \\ i = 1, 2, 3; \quad q_{v1} = 0,55 \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{tg} \delta \omega E^2(\tau) + q_e(\tau); \\ q_{v2} = q_{v3} = 0. \end{cases}$$

В качестве начального условия приняли равномерное распределение температуры во всех телах в начальный момент времени:

$$\tau = 0, \quad T_i(r, z, 0) = T_0.$$

В качестве граничных условий были приняты конвективный теплообмен и тепловое излучение на открытых поверхностях стопки полуфабрикатов и кондуктивный теплообмен с радиопрозрачным основанием и теплоизолятором.

Процессы распространения теплоты симметричны относительно оси Oz , а нормальные составляющие тепловых потоков в точках, зеркально расположенных относительно оси Oz , равны между собой по величине и противоположны по направлению. Для нижней поверхности диатомитового основания, которая совпадает с осью Or (см. рис. 1), приняли условие отсутствия

теплообмена с другими телами и окружающей средой. В любой точке этой поверхности удельный тепловой поток и пропорциональный ему градиент по нормали к ней равны нулю. Таким образом, оси $0z$ и $0r$ можно считать адиабатическими границами, для которых справедлив частный случай граничного условия второго рода:

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad z \in [0; l_1];$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial r} = 0, \quad r = 0, \quad z \in [l_1; l_3];$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial z} = 0, \quad z = 0, \quad r \in [-R_3, R_3],$$

где T_2 – температура диатомитового основания, °С;
 T_3 – температура теплоизолятора, °С;
 l_1, R_3 – высота и радиус диатомитового основания, м;
 l_3 – общая высота слоя теплоизоляции и диатомитового основания, м.

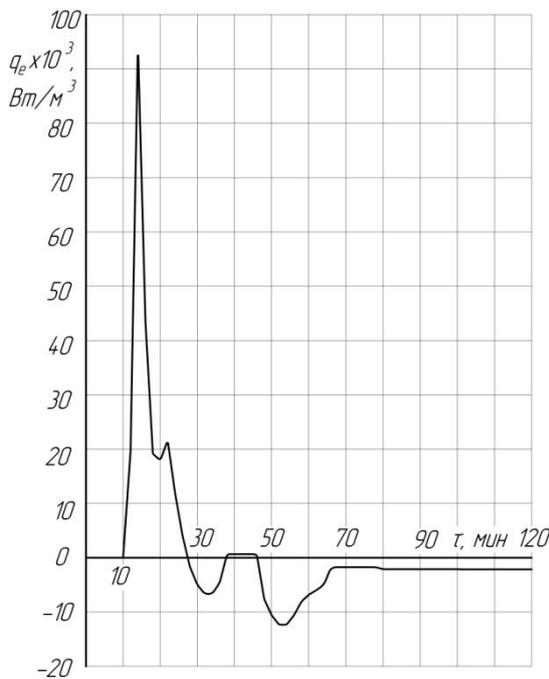


Рис. 2. Зависимость удельной мощности тепловой энергии q_e , выделенной и поглощенной в процессе полимеризации АИ за счет экзо- и эндотермических эффектов, от времени термообработки t

На открытых поверхностях теплоизолятора и диатомитового основания в процессе микроволнового нагрева имеет место конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой. Конвективный теплообмен подчиняется закону Ньютона – Рихмана, а радиационный – с открытых поверхностей тел – закону Стефана – Больцмана [20]. Таким образом, граничные

условия третьего рода, учитывающие конвективный и радиационный теплообмен, будут иметь следующий вид:

$$\lambda_{r,3} \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{w3,3}^4 - T_f^4),$$

$$r = R_3, \quad z \in [l_1; l_3];$$

$$\lambda_{r,2} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_f (T_{w3,2} - T_f) + \varepsilon_{p2} \sigma_0 (T_{w3,2}^4 - T_f^4),$$

$$r = R_3, \quad z \in [0; l_1];$$

$$\lambda_{z,3} \frac{\partial T_3}{\partial z} = \alpha_f (T_{b3,3} - T_f) + \varepsilon_{p3} \sigma_0 (T_{b3,3}^4 - T_f^4),$$

$$z = l_3, \quad r \in [-R_3, R_3],$$

где α_f – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°С);
 T_f – температура окружающей среды, °С;
 $\lambda_{r,i}$ – теплопроводность тела в направлении оси $0r$, Вт/(м·°С);
 σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана;
 $\lambda_{z,i}$ – теплопроводность тела в направлении оси $0z$, Вт/(м·°С);
 $T_{wk,i}$ – температура поверхности тела, перпендикулярной направлению оси $0r$, °С;
 $T_{bk,i}$ – температура поверхности тела, перпендикулярной направлению оси $0z$, °С;
 ε_{pi} – степень черноты поверхности тела;
 i – номер позиции тела (см. рис. 1);
 k – порядковый номер поверхности тела в направлении осей координат (см. рис. 1).

На границах соприкосновения полуфабриката, диатомитового основания и теплоизолятора обеспечивается равенство температур и равенство потоков теплоты. Следовательно, граничное условие четвертого рода примет следующий вид:

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w1,1} = T_{w1,3},$$

$$r = -R_1, \quad z \in [l_1; l_2];$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial r}; \quad T_{w2,1} = T_{w2,3},$$

$$r = R_2, \quad z \in [l_1; l_2];$$

$$\lambda_{r,2}(T) \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial z}; \quad T_{b1,3} = T_{b1,2},$$

$$z = l_1, \quad r \in [-R_3; -R_2], \quad r \in [-R_1; R_1], \quad r \in [R_2; R_3];$$

$$\lambda_{r,1}(T) \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_{r,3}(T) \frac{\partial T_3}{\partial z}; \quad T_{b2,1} = T_{b2,3},$$

$$z = l_2, \quad r \in [-R_2; -R_1], \quad r \in [R_1; R_2],$$

где R_1, R_2 – соответственно, радиус посадочного отверстия и радиус наружного диаметра полуфабриката, м.

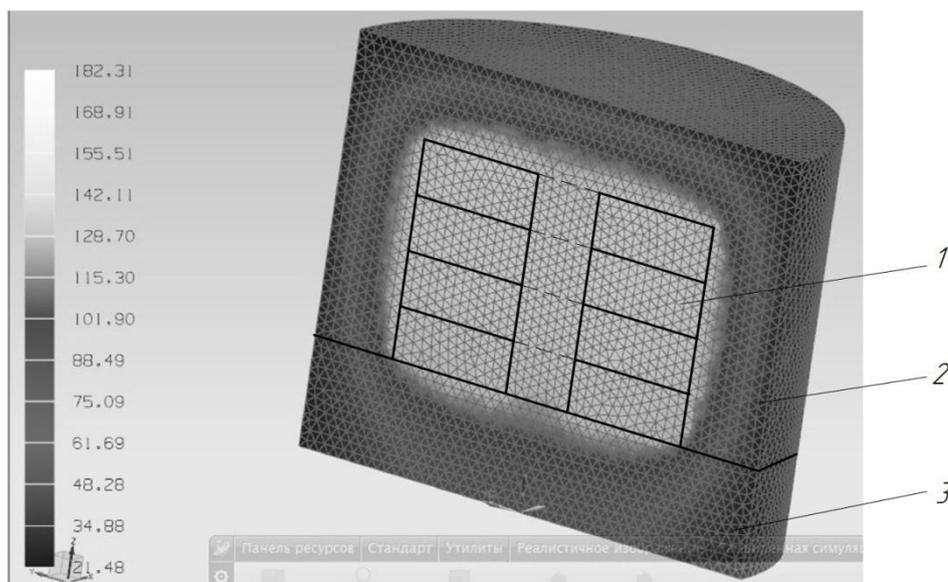


Рис. 3. Температурное распределение в стопке полуфабрикатов в процессе нагрева с применением теплоизоляции под воздействием микроволнового излучения:
1 – полуфабрикаты АИ, 2 – теплоизолятор, 3 – диатомитовое основание

Решить описанную выше математическую модель аналитическим путем не представляется возможным, в связи с чем решение было осуществлено численным методом при помощи ЭВМ: в программной среде NX 7.5 была создана геометрическая модель в виде трехмерной сборки, состоящей из различных тел; каждому телу задавали свои теплофизические характеристики, соответствующие реальным материалам; затем была создана конечно-элементная модель, заданы начальные и граничные условия, указаны источники выделения теплоты и зависимости изменения их удельной мощности от времени. Результатом численного моделирования явилось нестационарное температурное поле в стопке полуфабрикатов АИ. Анализ моделей микроволнового нагрева полуфабрикатов АИ, теплоизолированных различными материалами, показал, что наиболее эффективным теплоизолятором среди отобранных является вермикулит вспученный фракционированный ВВФ-2 ТУ 5712-091-00281915-2007. На рис. 3 показано распределение температуры в стопке полуфабрикатов АИ, теплоизолированных вермикулитом, после двух часов воздействия микроволнового излучения. Анализ модели, показанной на рис. 3, свидетельствует о том, что благодаря применению теплоизоляции нагреваемых полуфабрикатов АИ на бакелитовой связке удалось снизить градиент температур по сечению стопки полуфабрикатов АИ с 35 до 9 %. Путем численного моделирования процессов микроволновой термообработки выявлены режимы, обеспечивающие требуемые скорости нагрева полуфабрикатов АИ на различных этапах цикла термообработки. На этих режимах экспериментально исследовали влияние теплоизоляции на равномерность нагрева полуфабрикатов АИ в микроволновом поле. Выявлено, что расхождение теоретических и экспериментальных значений температур не превышает 5 %.

Таким образом, доказана возможность применения радиопрозрачного теплоизолятора для снижения неоднородности микроволнового нагрева полуфабрикатов и разработана методика корректировки режимов термообработки в зависимости от внешних условий. Снижение неоднородности микроволнового нагрева позволило резко сократить длительность цикла термообработки, снизить энергоемкость этой операции и улучшить качество АИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М. Сверхвысокочастотная энергетика в производстве абразивных инструментов и их работоспособность. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 307 с.
2. Худобин Л.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М., Сапунов В.В. Работоспособность шлифовальных кругов с наполнителями из углеродсодержащих материалов, бакелизованных в СВЧ-поле // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 1. С. 56–62.
3. Веткасов Н.И., Худобин Л.В., Сапунов В.В. Модификация связки абразивных инструментов для ускорения полимеризации полуфабрикатов при нагреве в сверхвысокочастотном поле // Инжиниринг техно 2014: сборник трудов II междунар. научно-практ. конф. Саратов, 2014. Т. 2. С. 216–224.
4. Морозов Г.А., Морозов О.Г. Микроволновые технологии. Результаты и новые задачи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. № 3. С. 82–91.
5. Нефедов В.Н. Высокоэффективные СВЧ-технологии термообработки материалов с малыми диэлектрическими потерями // Производственные технологии 2001: материалы отчетной конференции-выставки. М., 2002. С. 340.

6. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. М.: Наука, 2000. 264 с.
7. Доценко А.В. Оптимизация ущерба и резервирования при СВЧ диэлектрическом нагреве // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 1. № 1. С. 131–137.
8. Толстов В.А. Повышение энергетической эффективности установок СВЧ диэлектрического нагрева // Электродинамические устройства и линии передачи СВЧ: межвуз. науч. сборник. Саратов, 2000. С. 109–113.
9. Быков Ю.В., Рыбаков К.И., Семенов В.Е. Микроволновая высокотемпературная обработка материалов // Вакуумная СВЧ электроника: сборник обзоров. Н. Новгород, 2002. С. 26–35.
10. Демьянчук Б.А. Микроволновый нагрев: особенности модернизации технологии // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 2. С. 41–45.
11. Михайлин С.М., Капустин А.И., Жданов С.В. Сверхвысокочастотные технологии в производстве абразивных инструментов на бакелитовой связке // Вестник машиностроения. 2008. № 10. С. 58–61.
12. Попов Е.М. Микроволновая сушка полезных ископаемых // Безопасность труда в промышленности. 2015. № 4. С. 33–35.
13. Кингстон Г.М., Джесси Л.Б. Пробоподготовка в микроволновых печах. Теория и практика. М.: Мир, 1991. 336 с.
14. Архангельский Ю.С., Воронкин В.А. Элементная база СВЧ электротермического оборудования. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.
15. Михайлин С.М. Моделирование распределения тепловой мощности сверхвысокочастотного излучения в камере поликонденсации композитных материалов // Вестник УлГТУ. 2009. № 1. С. 31–33.
16. Капустин А.И., Худобин Л.В., Сапунов В.В., Веткасов Н.И., Михайлин С.М., Капустин А.А. Способ СВЧ-термообработки полуфабрикатов из композиционных материалов на органических терморезистивных связках : патент на изобретение РФ № 2545939 от 10.04.2015.
17. Резник С.В., Румянцев С.А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 1. С. 6–21.
18. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
19. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Романов А.В. Комплексная диэлектрическая проницаемость композитов на основе диэлектрических матриц и входящих в их состав углеродных нанотрубок // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 1. С. 106–110.
20. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
- crowave energy in the manufacture of abrasive tools and their efficiency]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2013, 307 p.
2. Khudobin L.V., Vetkasov N.I., Mihaylin S.M., Sapunov V.V. The efficiency of the grinding wheels filled with carbonaceous materials, bakelite in a microwave field. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 1, pp. 56–62.
3. Vetkasov N.I., Khudobin L.V., Sapunov V.V. Modification bundles of abrasive tools to accelerate the polymerization of semi-finished products when heated in the microwave field. *Inzhiniring techno 2014: sbornik trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Saratov, 2014, vol. 2, pp. 216–224.
4. Morozov G.A., Morozov O.G. Microwave technology. Results and new tasks. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2006, no. 3, pp. 82–91.
5. Nefedov V.N. High-performance microwave technology heat treatment of materials with low dielectric loss. *Proizvodstvennye tekhnologii 2001: materialy otchetnoy konferentsii-vystavki*. Moscow, 2002, p. 340.
6. Didenko A.N. *SVCH-energetika: teoriya i praktika* [Microwave energy: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 2000, 264 p.
7. Dotsenko A.V. Optimization of the damage and the backup when the microwave dielectric heating. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 131–137.
8. Tolstov V.A. Improving the energy efficiency of microwave dielectric heating. *Elektrodinamicheskie ustroystva i linii peredachi SVCH: mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik*. Saratov, 2000, pp. 109–113.
9. Bykov Y.V., Rybakov K.I., Semenov V.E. Microwave high-temperature processing of materials. *Vakuumnaya SVCH elektronika: sbornik obzorov*. N. Novgorod, 2002, pp. 26–35.
10. Demyanchuk B.A. Microwave heating: especially the modernization of technologies. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2004, no. 2, pp. 41–45.
11. Mikhaylin S.M., Kapustin A.I., Zhdanov S.V. Microwave technology in the manufacture of abrasive tools on bakelite base. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 10, no. 58–61.
12. Popov E.M. Microwave drying of minerals. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2015, no. 4, pp. 33–35.
13. Kingston G.M., Jessie L.B. *Probopodgotovka v mikrovolnovykh pechakh. Teoriya i praktika* [Sample preparation in microwave ovens. Theory and practice]. Moscow, Mir Publ., 1991, 336 p.
14. Arkhangelskiy Y.S., Voronkin V.A. *Elementnaya baza SVCH elektrotermicheskogo oborudovaniya* [Element base of microwave electrothermal equipment]. Saratov, SSTU Publ., 2003, 212 p.
15. Mihaylin S.M. Modeling the distribution of thermal power microwave radiation in the chamber condensation composite materials. *Vestnik UIGTU*, 2009, no. 1, pp. 31–33.
16. Kapustin A.I., Khudobin L.V., Sapunov V.V., Vetkasov N.I., Mikhaylin S.M., Kapustin A.A. *Sposob SVCH-termoobrabotki polufabrikatov iz kompozitsionnykh materialov na organicheskikh termoreaktivnykh svyazkah* [Method of microwave heat treatment of semi-finished

REFERENCES

1. Khudobin L.V., Vetkasov N.I., Mihaylin S.M. *Sverkhvysokochastotnaya energetika v proizvodstve abrazivnykh instrumentov i ikh rabotosposobnost* [Mi-

- products made of composite materials based on organic thermosetting bundles]. Patent RF no. 2545939, 2015.
17. Reznik S.V., Rumyantsev S.A. Mathematical modeling of the thermal state of cylindrical workpieces from polymeric composite materials at microwave heating. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie*, 2014, no. 1, pp. 6–21.
18. Arkhangelskiy Y.S. *Spravochnaya kniga po SVCH elektrotermii: spravochnik* [Handbook of Microwave electrothermics: directory]. Saratov, Nauchnaya kniga Publ., 2011, 560 p.
19. Usanov D.A., Skripal A.V., Romanov A.V. Complex permittivity of composites based on dielectric matrices and their constituent carbon nanotubes. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2011, vol. 81, no. 1, pp. 106–110.
20. Lykov A.V. *Teplomassoobmen. Spravochnik* [Heat and Mass Transfer. Directory]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 480 p.

MATHEMATICAL MODELING OF MICROWAVE HEATING OF SEMIFINISHED ABRASIVE TOOLS

© 2015

V.V. Sapunov, assistant of the Department “Technology of machine building”

N.I. Vetkasov, Doctor of Engineering, Professor of the Department “Technology of machine building”

L.V. Khudobin, Doctor of Engineering, Professor of the Department “Technology of machine building”
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: microwave heating; abrasive tools; bakelite bond; thermostat control; mathematical model.

Abstract: The authors noted the advantages and disadvantages of microwave heat treatment of semi-finished abrasive tool (AT) and described the method of microwave heat treatment of semi-finished AT using heat insulation of heat units, which ensures uniform heating of the stack of semis. The article represents the physical model of microwave heating of AT bakelite bonded semis in the thermostat, which is the base for construction of mathematical model and determination of initial and boundary conditions. The authors specified the dependencies of thermal and physical characteristics of bakelite bonded semi-finished AT on temperature. The authors determined experimentally the dependence of specific capacity of heat energy released and absorbed in the process of AT polymerization by means of exothermic and endothermic effects on the time of heat treatment, carried out a numerical simulation of the microwave heating of semi-finished AT using the finite-element method in the NX 7.5 software environment. During this simulation, heat emission sources and the dependences of their specific capacity changes on the time are designated, initial and boundary conditions are given in accordance with the designed mathematical model. The article presents the results of numerical simulation in the form of temperature field in the stack of semi-finished AT. The most effective heat-insulator is selected on the basis of the analysis of models of microwave heating of semi-finished AT heat-insulated using various materials. During the microwave heating of AT semis using the radio transparent insulation the authors discovered the significant reduction in the temperature gradient. By means of numerical simulation of microwave heat treatment, the modes providing the required rates of heating of AT semis at various stages of the heat treatment cycle are revealed. Using these modes, the authors carried out the experimental study of the influence of heat insulation on the uniformity of AT semis heating within the microwave field.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В РЕЗОНАНСНОМ ВИБРАЦИОННОМ СТАНКЕ ДЛЯ ДОВОДКИ ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ

© 2015

Р.И. Силин, доктор технических наук, профессор, советник ректора

В.В. Третько, доктор педагогических наук, доцент, декан факультета «Международные отношения»

А.И. Гордеев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии машиностроения»
Хмельницкий национальный университет, Хмельницкий (Украина)

Ключевые слова: доводка плоских поверхностей; динамическая модель; вибрационный станок.

Аннотация: Среди различных способов механической обработки, которые обеспечивают выполнение высоких требований к качеству поверхностного слоя, точности формы и размеров обработанной поверхности, важное место занимает абразивная доводка и наиболее перспективным является использование метода вибрационной доводки.

Предложена конструкция резонансного вибрационного станка с электромагнитным приводом круговых поступательных колебаний притиров в плоскости. Исходя из того что жесткость виброизоляторов достаточно мала, причем они расположены вблизи той точки системы, колебания которой равны нулю, сделана предпосылка, что их динамическое давление на неподвижную основу можно не учитывать. Для предложенной конструкции оборудования составлены уравнения движения в обобщенных координатах и, применив метод Лагранжа, записано выражение для кинетической энергии системы, которая состоит из энергии поступательного движения масс системы и энергии вращательного движения вокруг центров масс. Анализ предложенной аналитической модели оборудования показал, что ее с достаточной степенью точности можно привести к одномассовой системе с одной степенью свободы. Это позволит значительно упростить определение аналитических расчетных зависимостей для расчета основных параметров конструкции и режимов работы привода станка и сократит дальнейшие экспериментальные исследования при отладке и настройке процесса доводки на таких станках. Разработан и внедрен вибрационный доводочный станок с электромагнитным виброприводом, в котором обработка плоских и цилиндрических деталей осуществляется при их установке в гнезда специальных кассет сепараторов, создающих сложное направленное движение обрабатываемых деталей относительно рабочих поверхностей притиров.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ процесса доводки плоских и плоскопараллельных поверхностей показал, что метод вибрационной доводки обладает существенными преимуществами перед традиционными методами доводки, обеспечивает высокую точность и качество обработки [1–11]. Создание новых конструкций вибрационных машин, методов их расчета является актуальной задачей машиностроительного комплекса.

Одним из наиболее перспективных направлений является применение резонансных вибрационных станков с электромагнитным приводом круговых поступательных колебаний притиров в плоскости обработки [12–18]. Колебания по круговым траекториям обеспечивают постоянство скоростей резания в каждой точке рабочей поверхности притира, а резонансный электромагнитный привод – удобный в управлении и позволяет реализовать процесс обработки в широком диапазоне параметров с минимальными энергетическими затратами [19; 20].

При проектировании и налаживании таких станков возникает задача – ускоренно провести конструкторские расчеты и с меньшими затратами по времени при отладке технологическими методами получить резонансную систему колебаний.

Целью исследования является построение и анализ динамической модели вибрационного доводочного станка с определением аналитических расчетных зависимостей для расчета основных параметров конструкции и режимов работы привода станка.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Плоская динамическая модель предложенного резонансного вибрационного доводочного станка, выполненная по трехмассовой схеме, представлена на рисунке 1.

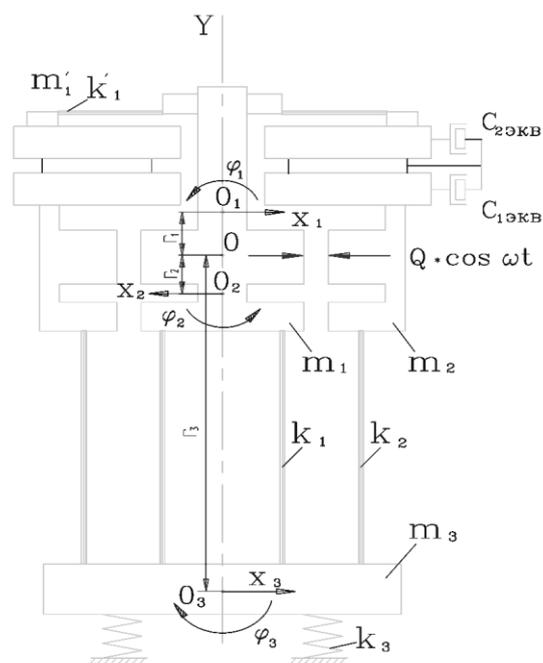


Рис. 1. Динамическая модель резонансного вибрационного доводочного станка

В этой модели – рабочие массы, связанные с верхним притиром m_1 и нижним притиром m_2 , с моментами инерции I_1, I_2 и центрами масс в точках O_1, O_2 , присоединенные к массе m_3 основы (центр O_3 , момент инерции I_3) с помощью упругих вертикальных стержней, работающих на изгиб и имеющих жесткость k_1 и k_2 . В центре масс колебательной системы расположим начало прямоугольной системы координат X, Y, Z с осью OX , направленной перпендикулярно к упругим стержням, и осью OY , которая направлена вдоль линии O_1O_2 .

При воздействии на массы m_1 и m_2 взаимно противоположных сил вибровозбудителя $Q \cdot \cos \omega t$, где ω – круговая частота колебаний, обе массы будут осуществлять антифазные поступательные колебания с амплитудой соответственно x_1 и x_2 вдоль линии OX . За счет упругого взаимодействия с массами m_1 и m_2 , масса m_3 будет совершать колебания параллельно оси OX с амплитудой x_3 .

Кроме того, вся система будет колебаться вокруг своего центра O с угловой амплитудой φ_1 и φ_2 для масс m_1 и m_2 соответственно. Угловые колебания массы m_3 – φ_3 будут определяться угловыми колебаниями масс m_1 и m_2 . Масса m_1 представляет собой сложную систему, в которой на упругих элементах жесткостью k'_1 присоединен верхний доводочный диск-притир массой m'_1 . Упругая подвеска верхнего притира в направлении действия, возмущающего усилия, имеет жесткость, что значительно превосходит жесткость этой же подвески в направлении нормально линии действия, возмущающего усилия. Вследствие этого можно предположить, что масса верхнего притира жестко связана с массой m_1 и является ее составной частью с возможностью перемещения верхнего притира нормально плоскости обработки по оси OY . Вследствие этого поступательные колебания рабочих масс, установившиеся в направлении оси OY , не возмущаются.

Таким образом, система имеет пять степеней свободы: x_1 – смещение m_1 относительно своего положения равновесия; x_2 – смещение m_2 относительно своего положения равновесия; x_3 – смещение m_3 относительно своего положения равновесия; φ_1 – поворот массы m_1 относительно общего центра масс O ; φ_2 – поворот массы m_2 относительно центра масс O . Поворот m_3 относительно центра масс определяется выражением $\varphi_3 = \varphi_1 - \varphi_2$.

Вследствие малости x_1, x_2 и x_3 по сравнению с линейными размерами системы можно считать центры масс O_1, O_2 и O , расположенные на одной линии. В динамической модели затухания представлены демпферами с коэффициентами эквивалентного вязкого трения C_{1EKV} и C_{2EKV} , расположенными между массами m_1, m_2 и деталями, которые обрабатываются. При этом в силу одинаковых условий взаимодействия деталей с верхним и нижним притирами $C_{1EKV} = C_{2EKV} = C_{EKV}$.

Далее предполагается, что жесткость виброизоляторов k_3 достаточно мала, причем сами виброизоляторы расположены вблизи той точки системы, колебания которой равны нулю, поэтому их динамическое давление на неподвижную основу можно не учитывать.

СОСТАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Соответственно изложенным выше предположениям, получим математическую модель рассматриваемой системы. Для составления уравнений движения в обобщенных координатах x_1, x_2, x_3, φ_1 и φ_2 воспользуемся методами Лагранжа. Запишем выражение для кинетической энергии T системы, которая состоит из энергии поступательного движения масс системы и энергии вращательного движения вокруг центров масс:

$$T = \left[m_1(x'_1 - r_1 \cdot \varphi'_1)^2 + m_2(x'_2 - r_2 \cdot \varphi'_2)^2 + m_3(x'_3 - r_3 \cdot \varphi'_3)^2 + I_1 \cdot \varphi_1'^2 + I_2 \cdot \varphi_2'^2 + I_3 \cdot \varphi_3'^2 \right] / 2, \quad (1)$$

где r_1, r_2, r_3 – расстояния центров масс O_1, O_2, O_3 до центра масс системы.

Потенциальную энергию системы составляет потенциальная энергия пружин, связывающих попарно массы m_1, m_3 и m_2, m_3 :

$$\Pi = [k_1 \cdot (x_1 - x_3)^2 + k_2 \cdot (x_2 + x_3)^2] / 2. \quad (2)$$

Поскольку в системе учтены затухания, для нее уравнения Лагранжа записываются следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + Q_i^F, \quad (3)$$

где q_i – избранные обобщенные координаты, Q_i^F – обобщенная сила, соответствующая не консервативным силам.

Для вычисления Q_i^F введем диссипативную функцию:

$$D_1 = (C_{1EKV} \cdot x_1'^2) / 2, \quad D_2 = (C_{2EKV} \cdot x_2'^2) / 2. \quad (4)$$

Подставив в (3) выражения для кинетической (1) и потенциальной (2) энергии и вычислив обобщенные силы по диссипативной функции (4), с учетом влияния внешней гармонической силы, получим систему линейных дифференциальных уравнений относительно выбранных обобщенных координат:

$$\begin{cases} m_1 \cdot (x_1'' - r_1 \cdot \varphi_1'') + C_{EKV} \cdot x_1' + k_1 \cdot (x_1 - x_3) = Q \cdot \cos \omega t \\ m_2 \cdot (x_2'' - r_2 \cdot \varphi_2'') + C_{EKV} \cdot x_2' + k_2 \cdot (x_2 + x_3) = Q \cdot \cos \omega t \\ m_3 \cdot (x_3'' - r_3 \cdot \varphi_3'') + k_2 \cdot (x_2 + x_3) - k_1 \cdot (x_1 - x_2) = 0 \\ 2 \cdot (I_1 + I_3) \cdot \varphi_1'' - 2 \cdot I_3 \cdot \varphi_2'' - m_1 \cdot r_1 \cdot x_1'' + m_3 \cdot r_3 \cdot x_3'' = 0 \\ 2 \cdot (I_2 + I_3) \cdot \varphi_2'' - 2 \cdot I_3 \cdot \varphi_1'' - m_2 \cdot r_2 \cdot x_2'' + m_3 \cdot r_3 \cdot x_3'' = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Упростим динамическую модель, сделав ее симметричной, то есть удовлетворяющей условиям $\varphi_1 = \varphi_2, x_1 = x_2$; описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \cdot (x_1'' - r_1 \cdot \varphi_1'') + C_{EKV} \cdot x_1' + k_1 \cdot (x_1 - x_3) = Q \cdot \cos \omega t \\ m_2 \cdot (x_2'' - r_2 \cdot \varphi_2'') + C_{EKV} \cdot x_2' + k_2 \cdot (x_2 + x_3) = Q \cdot \cos \omega t \\ m_3 \cdot x_3'' + (k_1 + k_2) \cdot x_3 = 0 \\ 2 \cdot I_1 \cdot \varphi_1'' - m_1 \cdot r_1 \cdot x_1'' = 0 \\ 2 \cdot I_2 \cdot \varphi_2'' - m_2 \cdot r_2 \cdot x_2'' = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Из уравнений 4 и 5 системы (6) определяем:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{m_1 \cdot r_1}{2 \cdot I_1} \cdot x_1, & x_1 &= \frac{1}{2 \cdot r_1} \cdot x_1, \\ \varphi_2 &= \frac{m_2 \cdot r_2}{2 \cdot I_2} \cdot x_2, & x_2 &= \frac{1}{2 \cdot r_2} \cdot x_2. \end{aligned} \quad (7)$$

С учетом того что $r_1 \gg x_1$ и $r_2 \gg x_2$, для упрощения дальнейших расчетов принимаем $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$. Итак, пренебрегая практически малыми угловыми колебаниями динамической модели, считаем, что массы совершают колебательные движения только параллельно оси OX . Тогда система линейных дифференциальных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} m_1 \cdot (x_1'' - r_1 \cdot \varphi_1'') + C_{EKV} \cdot x_1' + k_1 \cdot (x_1 - x_3) = Q \cdot \cos \omega t \\ m_2 \cdot (x_2'' - r_2 \cdot \varphi_2'') + C_{EKV} \cdot x_2' + k_2 \cdot (x_2 + x_3) = Q \cdot \cos \omega t \\ m_3 \cdot x_3'' + (k_1 + k_2) \cdot x_3 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Найдем собственные частоты колебательной системы как корни характеристического однородного уравнения системы (8) без учета сил сопротивления:

$$\omega_{01} = \frac{k_1}{m_1}; \quad \omega_{02} = \frac{k_2}{m_2}; \quad \omega_{03} = \frac{k_1 + k_2}{m_3}. \quad (9)$$

Эффективная работа вибрационного доводочного станка достигается при выполнении условий:

$$\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0 \quad \text{или} \quad \frac{k_1}{m_1} = \frac{k_2}{m_2}, \quad (10)$$

которые обеспечивают работу обеих рабочих масс в резонансном режиме с равными динамическими коэффициентами, при этом массы будут осуществлять противофазные колебания с равными амплитудами. Практически наиболее приемлемый вариант при $m_1 = m_2$ и $k_1 = k_2$.

Из выражения (9) видно, что значение собственной частоты ω_{03} будет больше частот ω_{01} и ω_{02} , поэтому при настройке станка в резонанс с частотой ω_0 динамический коэффициент по частоте ω_{03} будет равен $\mu = 1,0$ и ее влиянием на работу станка можно пренебречь. Итак, с достаточной для практических целей вероятностью можно считать рабочей, для принятой динамической модели вибрационного доводочного станка (рис. 1), собственную частоту, которая определяется массами m_1, m_2 и жесткостью упругих подвесок k_1, k_2 . Соотношение между амплитудами колеблющихся масс можно определить из уравнений (8):

$$A_3 = \frac{k_1 - m_1 \cdot \omega^2}{k_1} \cdot A_1. \quad (11)$$

Тогда из (11) вытекает, что при $\omega_0^2 = \frac{k_1}{m_1}$ амплитуда

$A_3 = 0$, то есть колебания основы (масса m_3) отсутствуют ($x_3 = 0$).

Итак, предложенную динамическую модель резонансного вибрационного доводочного станка с достаточной степенью точности можно привести к одномассовой системе с одной степенью свободы, что позволит значительно упростить все дальнейшие аналитические расчеты элементов машины и определения параметров работы привода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе предложенной динамической модели резонансного вибрационного доводочного станка разработана методика проектирования такого оборудования, на основе которой изготовлен вибродоводочный станок (рис. 2) и предложена технология доводки высокоточных деталей из различных материалов: корпуса магнитных головок из керамики и феррита, подложки интегральных микросхем, деталей гидро- и пневмоаппаратуры (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид резонансного вибрационного доводочного станка

В вибрационных резонансных доводочных станках используется электромагнитный вибропривод. Он придает притирам поступательные колебательные движения по круговым траекториям в плоскости, параллельной рабочим поверхностям притиров. Благодаря конструктивным особенностям станка (рис. 2) достигается равенство скоростей и цикловых путей резания для каждой точки рабочей поверхности притиров, равномерное распределение траекторий по обрабатываемым поверхностям и неповторяемость следов обработки, создаются условия для равномерного износа притиров, что значительно повышает точность и качество обработки [12; 20].

Обработка плоских и цилиндрических деталей на станке осуществляется при их установке в гнезда специальных кассет сепараторов, которые создают сложное

направленное движение обрабатываемых деталей относительно рабочих поверхностей притиров. Для вращения сепаратора и кассет применяются преобразователи колебаний, которые используют круговые поступательные колебания притиров. Давление доводки регулируется с помощью электромагнитного и пневматического зажимов, которые обеспечивают равномерное его распределение по обрабатываемой поверхности. В станках предусмотрена силовая разгрузка сепаратора, которая позволяет обрабатывать особо тонкие детали (толщиной менее 0,1 мм) из хрупких материалов.

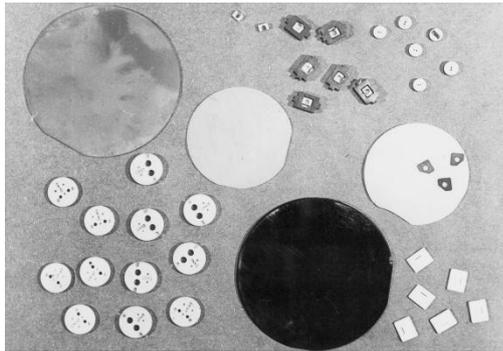


Рис. 3. Детали, обрабатываемые на вибродоводочных станках

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Предложенная динамическая модель позволяет ускорить процесс проведения расчетов основных характеристик оборудования и обеспечивает оптимальное соотношение параметров качества и точности обработки на каждом этапе. Внедрены технология и резонансное вибрационное оборудование для доводки высокоточных деталей из различных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение, 1988. 384 с.
2. Матегорин Н.В., Чумаченко Г.В. Изменение макрогеометрии поверхности цилиндрических деталей в процессе обработки методом вибродоводки по плоской колеблющейся поверхности // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 4. С. 513–518.
3. Бабичев А.П., Матегорин Н.В., Бабичев И.А. О возможности вибродоводки (притирки) цилиндрических деталей путем обкатывания по колеблющейся плоской поверхности // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2006. С. 186–189.
4. Физико-технологические основы методов обработки / под ред. А.П. Бабичева. Ростов н/Д.: Феникс, 2006. 410 с.
5. Яцун С.Ф. Вибрационные машины и технологии. Баку: Элм, 2004. 408 с.
6. Бабичев А.П., Матегорин Н.В., Чумаченко Г.В. Метод вибрационной обработки цилиндрических деталей путем обкатывания по плоской колеблющейся поверхности, покрытой абразивным материалом,

с ограничением боковых смещений // Вібрації в техніці та технологіях. 2009. № 4. С. 71–74.

7. Повидайло В.А., Сорочак О.З. Пути повышения точности плоскопараллельной обработки деталей на вибродоводочных станках // Вибрации в технике и технологиях. 1995. № 2. С. 38–45.
8. Дальский А.М. Механическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1981. 264 с.
9. Бабичев А.П., Матегорин Н.В., Мамонов Д.В. О возможности вибродоводки цилиндрических деталей путем обкатывания по плоской колеблющейся поверхности // Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки. Волгоград: Волж. ин-т стр-ва и технологий, 2007. С. 280–284.
10. Третько В.В., Гордеев А.И., Урбанюк Є.А., Сідлецький І.О. Обладнання для вібраційної доводки високоточних поверхонь // Materiali Y miedzynarodowej naukowo-practicznej konferencji «WYKSTALCENIE I NAUKA BEZ GRANIC–2008». Vol. 18. Techniczne nauki. Przemysl: Nauka I studia, 2008. P. 45–47.
11. Повидайло В.А., Третько В.В. Высокоточная вибрационная доводка деталей с плоскопараллельными поверхностями // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 14. Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1986. С. 107–111.
12. Повидайло В.А., Третько В.В., Кеча А.А., Сахно Р.Я. Устройство для доводки плоских поверхностей деталей: а. с. СССР № 1458187. Оpubл. 15.02.1989.
13. Повидайло В.А., Уфимцев В.Д. Резонансная вибромашина: а. с. СССР № 846244. Оpubл. 15.07.1981.
14. Повидайло В.А., Картышев Б.Н., Сахно Р.Я., Картышев Е.Б. Устройство для вибрационной обработки: а. с. СССР № 1345512. Оpubл. 12.06.1987.
15. Повидайло В.А., Щигель В.А., Картышев Б.Н. Способ вибрационной обработки деталей: а. с. № 1009728. Оpubл. 07.04.1983.
16. Повидайло В.А., Уфимцев В.Д., Щигель В.А. Резонансная вибромашина: а. с. СССР № 526495. Оpubл. 30.08.1976.
17. Повидайло В.А., Уфимцев В.Д. Резонансная вибромашина: а. с. СССР № 984833. Оpubл. 30.12.1982.
18. Щигель В.А. Устройство для вибрационной обработки: а. с. СССР № 1311857. Оpubл. 23.05.1987.
19. Матегорин Н.В., Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Чумаченко Г.В. Устройство для вибрационной абразивной обработки цилиндрических деталей: патент на полезную модель РФ № 74333. Оpubл. 27.06.2008.
20. Сілін Р.І., Гордеев А.И., Третько В.В., Сілін Р.С. Комплексна технологія та обладнання для високоточної вібраційної доводки поверхонь // Вісник ХНУ. Технічні науки. 2012. № 5. С. 7–13.

REFERENCES

1. Orlov P.N. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley metodami dovodki* [Engineering support of parts quality by grinding methods]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 384 p.

2. Mategorin N.V., Chumachenko G.V. Changing barrel surface macrogeometry through vibrofinishing treatment on flat oscillating surface. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 513–518.
3. Babichev A.P., Mategorin N.V., Babichev I.A. About the feasibility of vibration grinding (lapped finishing) of cylindrical parts using the burnishing against the oscillating flat surface. *Mezhvuz. sbornik nauch. statey "Voprosy vibratsionnoy tekhnologii"*. Rostov-na-Donu, DGTU Publ., 2006, pp. 186–189.
4. Babichev A.P., ed. *Fiziko-tekhnologicheskie osnovy metodov obrabotki* [Physical and technological basics of processing techniques]. Rostov-na-Donu, Finiks Publ., 2006, 410 p.
5. Yatsun S.F. *Vibratsionnie mashiny i tekhnologii* [Vibration machines and technologies]. Baku, Elm Publ., 2004, 408 p.
6. Babichev A.P., Mategorin N.V., Chumachenko G.V. Method of vibration treatment of cylindrical parts using the burnishing against the oscillating flat surface coated with abrasive material curbing the lateral displacements. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, 2009, no. 4, pp. 71–74.
7. Povidaylo V.A., Sorochak O.Z. Ways of accuracy improvement of plane-parallel treatment of parts on vibration grinding machines. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh*, 1995, no. 2, pp. 38–45.
8. Dal'sky A.M. *Mekhanicheskaya obrabotka metallov* [Mechanical treatment of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 264 p.
9. Babichev A.P., Mategorin N.V., Mamonov D.V. About the feasibility of vibration grinding of cylindrical parts using the burnishing against the oscillating flat surface. *Materialovedenie i tekhnologiya konstruktivnykh materialov – vazhneyshie sostavlyayushchie kompetentsii sovremennogo inzhenera. Problemy kachestva tekhnologicheskoy podgotovki*. Volgograd, Volzhskiy institut stroitelstva i tekhnologiy Publ., 2007, pp. 280–284.
10. Tret'ko V.V., Gordeev A.I., Urbanyuk E.A., Sidletsky I.O. The equipment for vibration grinding of high-accuracy surfaces. *Materiali Y miedzynarodowej naucowi-practicznej konferencji "WYKSTALCENIE I NAUKA BEZ GRANIC–2008"*. *Techniczne nauki. Przemysl, Nauka I studia*, 2008, vol. 18, pp. 45–47.
11. Povidaylo V.A., Tret'ko V.V. High-accuracy vibration grinding of parts with plane-parallel surfaces. *Mezhvuz. sbornik nauch. trudov "Almaznaya i abrazivnaya obrabotka detaley mashin i instrumenta"*. Penza, Penz. politekhn. institut Publ., 1986, vyp. 14, pp. 107–111.
12. Povidaylo V.A., Tret'ko V.V., Kecha A.A., Sakhno R.Ya. *Ustroystvo dlya dovodki ploskikh poverkhnostey detaley* [The device for grinding of flat surfaces of parts]. Author's certificate USSR, no. 1458187, 1989.
13. Povidaylo V.A., Ufimtsev V.D. *Rezonansnaya vibromashina* [Resonant vibration machine]. Author's certificate USSR, no. 846244, 1981.
14. Povidaylo V.A., Kartyshev B.N., Sakhno R.Ya., Kartyshev E.B. *Ustroystvo dlya vibratsionnoy obrabotki* [The device for vibration treatment]. Author's certificate USSR, no. 1345512, 1987.
15. Povidaylo V.A., Shchigel V.A., Kartyshev B.N. *Sposob vibratsionnoy obrabotki detaley* [Method of vibration treatment of parts]. Author's certificate USSR, no. 1009728, 1983.
16. Povidaylo V.A., Ufimtsev V.D., Shchigel V.A. *Rezonansnaya vibromashina* [Resonant vibration machine]. Author's certificate USSR, no. 526495, 1976.
17. Povidaylo V.A., Ufimtsev V.D. *Rezonansnaya vibromashina* [Resonant vibration machine]. Author's certificate USSR, no. 984833, 1982.
18. Shchigel V.A. *Ustroystvo dlya vibratsionnoy obrabotki* [The device for vibration treatment]. Author's certificate USSR, no. 1311857, 1987.
19. Mategorin N.V., Babichev A.P., Motrenko P.D., Chumachenko G.V. *Ustroystvo dlya vibratsionnoy abrazivnoy obrabotki tsilindricheskikh detaley* [The device for vibration abrasive treatment of cylindrical parts]. Patent RF, no. 74333, 2008.
20. Silin P.I., Gordeev A.I., Tret'ko V.V., Silin R.S. Complex technology and equipment for high-accuracy vibration grinding of surfaces. *Visnik KhNU. Tekhnichni nauki*, 2012, no. 5, pp. 7–13.

**DYNAMIC MODEL AND ITS IMPLEMENTATION IN RESONANT VIBRATION MACHINE
FOR FLAT ARTICLES GRINDING**

© 2015

R.I. Silin, Doctor of Science (Engineering), Professor, adviser of rector

V.V. Tret'ko, Doctor of Science (Pedagogy), Associate Professor, Dean of faculty "International relations"

A.I. Gordeev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair "Engineering technology"
Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi (Ukraine)

Keywords: flat articles grinding; dynamic model; vibration machine.

Abstract: Abrasive grinding takes the important place among various methods of mechanical treatment which provide meeting the requirements to the surface layer quality, shape and dimensions accuracy of the treated surface; and the use of vibration grinding method is considered to be the most advanced.

The authors offered the design of resonant vibration machine with magnetic actuator of circular translational vibrations of laps in flatness. Basing on the fact that the vibration isolators' hardness is rather weak and they are located in the system close to the point which vibrations are equal to zero, the authors made a supposition that it is possible not to take into account their dynamic pressure on immovable base. For the suggested design of equipment, the authors set up the equations of motion in joint coordinates and, applying the method of Lagrange, recorded the expression for kinetic energy of the system which consists of the energy of translational motion of system masses and the energy of rotational motion around the mass centers. The analysis of the suggested analytical model showed that it can be worked out to a single-mass system with a single degree-of-freedom. It will allow considerable simplification of determination of analytical estimated dependences for calculation of major structure parameters and working modes of machine drive and will reduce further experimental studies during the adjusting and setting of grinding process on such machines. The authors developed and implemented a vibration grinding machine with magnetic vibration actuator where the grinding of flat and cylindrical parts is carried out during their positioning to the slots of separator buckle plates creating complex ordered motion of treated parts against the working surfaces of grinding tools.

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОЙ ТЕХНИКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2015

Е.М. Табакин, кандидат технических наук

Г.В. Мирошниченко, инженер

А.В. Каплин, инженер

С.А. Андреев, инженер

Государственный научный центр –

Научно-исследовательский институт атомных реакторов, Димитровград (Россия)

Ключевые слова: аргонодуговая сварка; лазерная сварка; радиоизотопные мишени; малогабаритные изделия; сварка в вакууме.

Аннотация: В статье приводятся способы и технологические приемы, позволяющие повысить качество сварных соединений малогабаритных изделий атомной техники, изготовленных из алюминиевых сплавов. Приведено описание типовых конструкций и размеров таких изделий. Представлена особенность сварки малогабаритных изделий атомной техники – образование выплеска. Описан эксперимент, при котором определяли температуру изделия в момент выплеска. Другие особенности сварки изделий из алюминиевых сплавов связаны с наличием оксидной пленки на их поверхностях. Это приводит к появлению дефектов, нарушающих сплошность сварных соединений. Рассмотрены способы и технологические приемы, позволяющие снизить вероятность образования выплеска при сварке торцовых и кольцевых швов. Установлено, что наиболее эффективным способом будет применение импульсной лазерной сварки. Для вывода оксидной пленки за рабочее сечение сварного шва предложено выполнять проточку в посадочном месте канавки. Установлено, что при сварке ампул с толщиной стенки до 1 мм наилучший эффект достигается при глубине канавки 1 мм. Для этой же цели применено специализированное сварочное оборудование – модулятор тока УДГИ-161. Экспериментально доказано, что при использовании УДГИ-161 количество оксидных включений и пор браковочного размера уменьшается в 2 раза. Установлена зависимость вылета изделия из цанги от качества сварного соединения. Рассмотрена возможность снижения роста пор при сварке алюминия за счет снижения времени нахождения в расплавленном состоянии при применении импульсной лазерной сварки. Представлено оборудование, позволяющее производить импульсную лазерную сварку в условиях вакуума.

Одним из важных направлений деятельности АО «ГНЦ НИИАР» является производство радиоизотопной продукции. Технология производства заключается в облучении стартового материала в ядерном реакторе с последующей его переработкой и извлечением необходимого изотопа.

Облучение, как правило, выполняется в специальных ампулах трубчатой конструкции. Условия эксплуатации таких изделий предполагают постоянное действие радиационного облучения, внутреннее и внешнее избыточные давления, достигающие значений 7 МПа и 0,4...0,7 МПа соответственно, наличие термических напряжений, физико-химическое взаимодействие продуктов деления с оболочкой и т. д. Исходя из условий эксплуатации, к качеству сварных соединений таких изделий предъявляются высокие требования по герметичности и сплошности [1; 5].

Перспективными материалами для изготовления облучательных ампул показали себя сплавы алюминия благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. К числу таких свойств следует отнести достаточную прочность, высокую теплопроводность, пластичность, минимальное сечение захвата нейтронов, исключительную стойкость к взаимодействию большого числа химических элементов [2]. Эти преимущества алюминия как реакторного конструкционного материала позволяют обеспечить высокие значения потоков нейтронов на облучаемом материале и повысить эффективность облучения [3].

Склонность к образованию пор, наличие на поверхности оксидной пленки, особенности конструкций из-

делий активных зон атомных реакторов в совокупности с жесткими требованиями к качеству сварных соединений обуславливают сложность сварки изделий из алюминиевых сплавов.

Целью данной работы является повышение качества сварных соединений изделий атомной техники из алюминиевых сплавов.

Основная масса изделий, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, представляет собой корпус в виде цилиндрической оболочки с размещенным внутри облучаемым материалом, герметизируемый по торцам сваркой [4]. Диаметр оболочек находится в пределах 12,0...38,0 мм, толщина стенок – от 0,6 до 2 мм, длина – от 100 до 1300 мм.

Типовыми конструкциями сварных соединений являются: стыко-замковые, торцовые кольцевые и торцовые точечные соединения (рис. 1) [1; 5].

Одной из особенностей сварки малогабаритных изделий атомной техники является высокая вероятность образования выплесков расплавленного металла сварочной ванны при выполнении кольцевых швов. Например, при использовании аргонодуговой сварки неплавящимся электродом (АДС) происходит разогрев и рост давления газа, находящегося во внутреннем объеме. Это, в свою очередь, приводит к появлению выплесков металла, свищей, газовых полостей и других дефектов, нарушающих герметичность и сплошность сварных соединений [6; 7].

Для измерения температуры в свободном объеме изделия, при которой происходит выплеск, был проведен эксперимент. Образец из сплава алюминия АД1

диаметром 6,0 мм с толщиной стенки 0,5 мм со стыко-замковой конструкцией сварного соединения устанавливался в цангу сварочного вращателя. Термопару помещали в отверстие заглушки на максимально возможную глубину, не нарушая герметичности корпуса. Режимы сварки определялись экспериментально с учетом выполнения требований к форме сварного соединения. В результате установлено, что в момент выплеска металла температура внутри корпуса составляет $(510 \pm 15)^\circ\text{C}$.

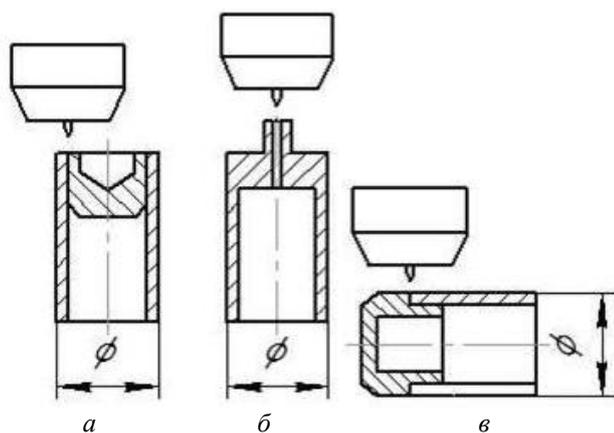


Рис. 1. Конструкции сварных соединений герметизирующих узлов:

a – торцовое кольцевое; *б* – торцовое точечное; *в* – стыко-замковое

Для того чтобы снизить вероятность образования выплесков, были разработаны способы сварки и технологические приемы, позволяющие снизить температуру и, соответственно, давление газа во внутреннем объеме.

Разработанный на предприятии способ дуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа оплавлением торца получил большое распространение при герметизации малогабаритных изделий атомной техники. В процессе сварки изделие и сварочная горелка остаются неподвижными и часть пробки совместно с торцом корпуса оплавляется [7]. Шов формируется в полусфере, опирающуюся на оплавляемую

поверхность [8]. Ограничением применения предложенного способа является то, что формирование сварного соединения возможно только для изделий диаметром менее 12 мм.

В некоторых случаях выполнение сварных соединений осуществляется без применения заглушек (рис. 1 в). При такой конструкции сварного соединения значительно упрощается операция подготовки изделия под сварку [9]. Однако для обеспечения требуемой формы сварного шва необходимо определить соотношения диаметра и толщины стенки свариваемого торца оболочки. Установлено, что для такой конструкции качественное формирование сварного соединения происходит при отношении толщины кромки к диаметру корпуса не менее 0,3 ($c/d > 0,3$), при этом максимальный диаметр не должен превышать 8 мм. К преимуществам данного способа сварки можно отнести пониженное тепловое воздействие на свариваемое изделие (рис. 2).

При сварке кольцевых соединений выплеск происходит в момент замыкания сварного шва, когда температура в корпусе максимальна [10]. Исходя из этого, было предложено производить остановку перед замыканием кольцевого шва, а завершить процесс сварки после остывания изделия. Экспериментально доказано, что применение аргонодуговой сварки кольцевым швом с остановкой позволяет снизить тепловое воздействие и вероятность образования выплеска. Максимальная температура внутри корпуса изделия на окончании процесса сварки не превышала $430...450^\circ\text{C}$.

Значительно снизить тепловое воздействие на изделие возможно с применением импульсной лазерной сварки [11]. Были проведены эксперименты, показывающие, что максимальный разогрев детали в непосредственной близости от сварного шва после сварки не превышает 100°C .

Таким образом, из рассмотренных вариантов и технологических приемов снижения вероятности образования выплесков наиболее эффективным следует считать применение лазерной сварки в импульсном режиме (рис. 2).

Помимо высокой склонности к образованию выплесков при герметизации ампул существует опасность образования пор и оксидных включений в сварном шве [12; 13]. Известно, что полностью избавиться от оксидной пленки на поверхности алюминиевых

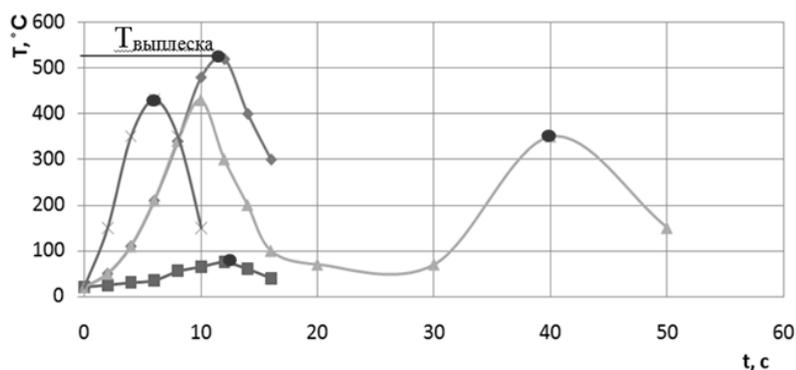


Рис. 2. Изменение температуры при герметизации капсулы источника способами:
 ■ – лазерной импульсной сварки, × – АДС оплавлением торца, ◆ – АДС кольцевым швом,
 ▲ – АДС кольцевым швом с остановкой; ● – завершение процесса сварки

сплавов практически невозможно из-за высокой скорости ее образования. Так как при сварке разрушение оксидной пленки на закрытых поверхностях стыковых соединений затруднено [14; 15], была разработана конструкция стыко-замкового кольцевого соединения с применением канавки, выполненной на посадочном месте заглушки (рис. 3 а). Наличие такой канавки позволяет вытеснить неразрушенную оксидную пленку за рабочее сечение сварного шва (рис. 3 б). Было установлено, что с наибольшей вероятностью такого эффекта при сварке ампул с толщиной стенки до 1 мм можно достичь при глубине канавки b , равной 1 мм (рис. 3 в). Изменение глубины канавки в большую сторону может привести к нарушению формы сварного шва. Такая конструкция сварного соединения применима и при лазерной сварке, и при АДС.

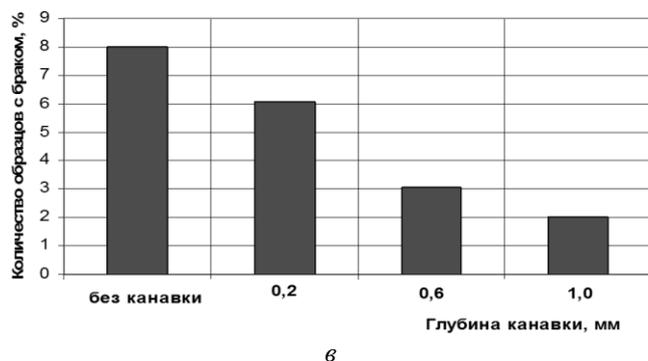
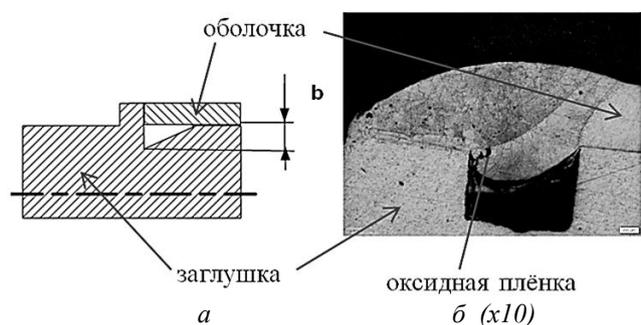


Рис. 3. Стыко-замковое соединение с канавкой:

а – конструкция соединения;

б – макроструктура соединения с канавкой (АДС);

в – влияние глубины канавки на количество дефектов

Для уменьшения влияния оксидной пленки на качество сварных соединений разработано оборудование УДГИ-161 – модулятор сварочного тока. Модулятор предназначен для дуговой сварки неплавящимся электродом деталей малой толщины из алюминия и его сплавов переменным прямоугольным током с программируемым алгоритмом его изменения.

Положительный эффект импульсного режима АДС при использовании модулятора достигается за счет колебания расплава сварочной ванны. В результате таких колебаний оксидная пленка заворачивается в спираль или принимает компактную форму (рис. 4).

Была проведена сравнительная оценка качества швов, выполненных АДС в импульсном режиме с использованием модулятора УДГИ-161 и стационарной

дугой переменного прямоугольного тока. Анализ результатов показал снижение примерно в 2 раза количества оксидных включений и пор браковочного размера при использовании модулятора тока.

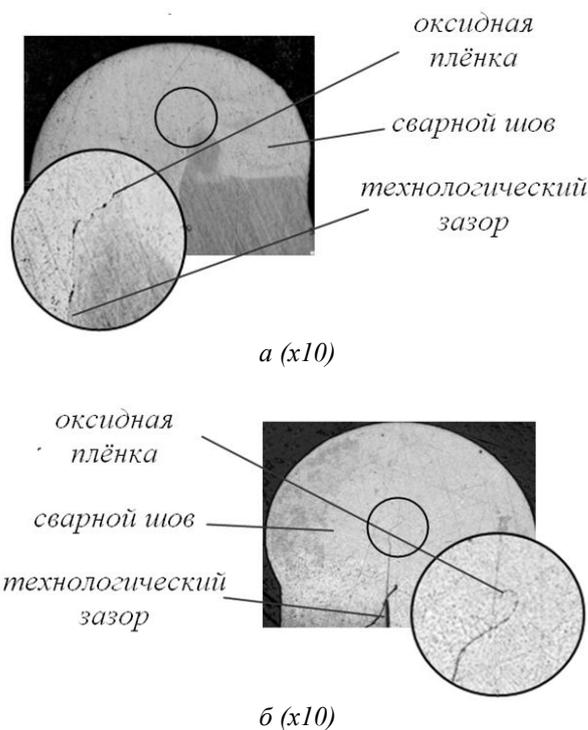


Рис. 4. Макроструктура торцового сварного соединения:

а – АДС переменным прямоугольным током;

б – АДС модулятором в импульсном режиме

Поскольку алюминий и его сплавы обладают высокой теплопроводностью, значительное влияние на формирование сварного шва оказывает отвод тепла от изделия в процессе сварки медной зажимной цангой [16]. Изменить это влияние можно вылетом изделия из цанги h . При аргонодуговой сварке на одних и тех же режимах уменьшение величины вылета приводит к непроплавлению, а при больших – к нарушению формы шва, наплывам. Исследования влияния вылета изделий из цанги выполняли для ампул диаметром 12 и 16 мм (рис. 5). Конструкция сварного соединения – стыко-замковое.

Ограничение роста пор при сварке алюминия достигается за счет уменьшения нахождения сварочной ванны в расплавленном состоянии [14; 17]. Как показали исследования, кратковременный импульсный цикл при лазерной сварке, равный 4 мс, сокращает рост пор до размеров меньше предельно допустимых. Исследование сварного шва на электронном микроскопе при увеличении $\times 10000$ показало наличие мелких пор, размер которых не превышал 1 мкм.

В ряде случаев в атомной технике сварку изделий необходимо проводить в условиях вакуума [18]. Для этих целей на предприятии была разработана установка импульсной лазерной сварки в условиях вакуума [19]. Такое оборудование было использовано при изготовлении ампул, предназначенных для накопления

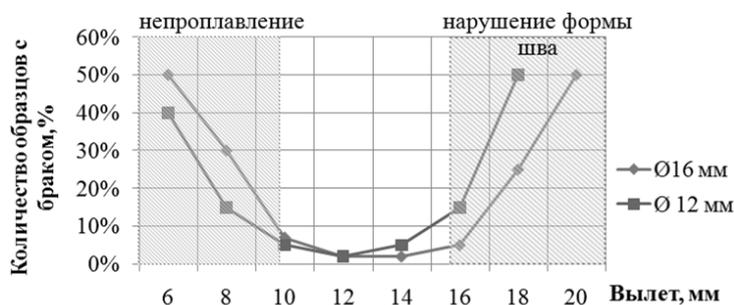


Рис. 5. Зависимость качества сварных соединений от величины вылета изделия из цанги для изделий диаметром 12 и 16 мм

радиоизотопа Мо-99 при облучении в активных зонах реакторов. Ампула представляет собой изделие плоской конструкции в виде конверта габаритными размерами 200x60 мм, состоящее из двух оболочек (стенок) из сплава алюминия АД1, толщиной 0,25 мм и расположенным между ними сердечником из алюминиево-плутониевой композиции толщиной 2 мм (рис. 6).

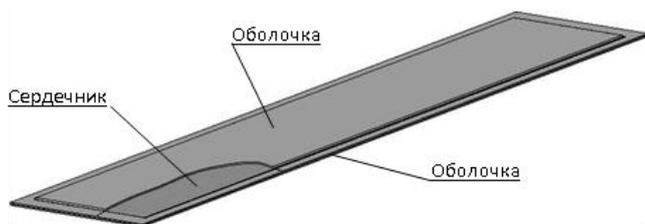


Рис. 6. Внешний вид ампулы плоской конструкции

Перед сваркой в камере создается разрежение до $P=1 \times 10^{-2}$ мм рт. ст. Сварка изделия выполняется по периметру стенок оболочки до полной ее герметизации. Таким образом, после изъятия изделия из камеры за счет разницы давления внутри и снаружи изделия происходит прижатие стенок конверта к сердечнику и создается плотный контакт между ними. В этом случае обеспечивается безопасность эксплуатации ампулы в условиях высоких тепловых нагрузок [20].

Все представленные разработки были успешно внедрены в производство для выпуска изделий радионуклидной продукции медицинского и общепромышленного назначения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Из рассмотренных вариантов и технологических приемов снижения вероятности образования выплесков при герметизации малогабаритных изделий атомной техники из алюминиевых сплавов наиболее эффективным следует считать применение лазерной сварки в импульсном режиме.

Для вывода оксидных пленок из рабочей части стыко-замкового сварного соединения предложено выполнять проточку в посадочном месте заглушки. Для изделий с толщиной стенки до 1 мм наибольшего эффекта удается достичь при глубине канавки 1 мм. Превышение указанного размера может привести к нарушению формы шва.

Установлено, что снижение вероятности образования пор при импульсной лазерной сварке тонкостенных малогабаритных изделий из сплавов алюминия достигается за счет снижения времени нахождения сварочной ванны в расплавленном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1 / под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
2. Полосков С.И., Ковешников С.П., Павлов В.Ф., Таран В.И. Особенности сварки алюминиевых сплавов стабилизированной дугой обратной полярности // Труды НИКИМТ. Т. 2. Сварка в атомной промышленности и энергетике. М.: ИздАТ, 2002. С. 266–280.
3. Ма Б.М. Материалы ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 194 с.
4. Производство изотопов / отв. ред. В.В. Бочкарев. М.: Атомиздат, 1973. 597 с.
5. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 2 / под ред. Ф.Г. Решетникова. М.: Энергоатомиздат, 1995. 336 с.
6. Зинковский В.И., Табакин Е.М., Фролов С.А. Сварка малогабаритных источников нейтронного излучения из калифорния // Сварка и смежные технологии: сб. докладов Всерос. научно-техн. конф. М., 2000. С. 220–225.
7. Казаков Ю.В., Костюченко Н.А., Каплин А.В., Андреев С.А. Технология дуговой сварки малогабаритных изделий атомной техники в среде повышенного давления защитного газа // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: труды IV междунар. научно-техн. конф. (Резниковские чтения). Ч. 2. Тольятти, 2015. С. 73–80.
8. Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Каплин А.В. Способ дуговой сварки : патент РФ на изобретение № 2533616, заяв. 11.04.2013, опубл. 22.09.2014.
9. Зинковский В.И., Крылов Е.А., Акулышев А.С. Технологические особенности дистанционной сборки малогабаритных источников нейтронного излучения из калифорния-252 : препринт / НИИАР-31. М., 1983. 16 с.
10. Иванович Ю.В., Табакин Е.М., Казаков Ю.В. Способы предотвращения образования дефектов в сварных швах корпусов малогабаритных источников ио-

- низирующих излучений // Сварка и диагностика. 2011. № 3. С. 43–47.
11. Технологические процессы лазерной обработки / под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
 12. Сварка в машиностроении. Т. 2 : справочник / под ред. А.И. Акулова. М.: Машиностроение, 1978. 463 с.
 13. Сварка и свариваемые материалы. Т. 1 : справочник / под ред. Э.Л. Макарова. М.: Metallurgiya, 1991. 526 с.
 14. Никифоров Г.Д. Metallurgiya сварки плавлением алюминевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 264 с.
 15. Банов М.Д., Казаков Ю.В., Козулин М.Г., Короткова Г.М., Корягин К.Б. Сварка и резка материалов. 6-е изд. М.: Академия, 2007. 400 с.
 16. Зинковский В.И., Шпак И.К. Качество сварных швов при герметизации трансурановых радионуклидов // Обзор. НИИАР. М.: ЦНИИатоминформ, 1989. 23 с.
 17. Редчиц В.В., Лебедев Г.Т., Вакс И.А. Оценка эффективности мер предупреждения пор в швах активных металлов при сварке плавлением различными способами // Сварочное производство. 1979. № 10. С. 12–15.
 18. Череватенко Г.А., Чистов Е.Д., Кодюков В.М. Радионуклидные источники в радиационной технике. М.: Энергоатомиздат, 1989. 279 с.
 19. Каплин А.В., Назаров А.Н., Мирошниченко Г.В., Костюченко Н.А., Табакин Е.М. Установка для импульсной лазерной сварки в условиях вакуума : патент РФ на полезную модель № 138245, заявл. 26.09.2013, опубл. 10.03.2014.
 20. Табакин Е.М., Иванович Ю.В., Каплин А.В., Андреев С.А., Назаров А.Н. Сварка изделий из перспективных конструкционных материалов исследовательских ядерных реакторов // Новые материалы для инновационного развития атомной энергетики: тезисы докладов науч. конф. Димитровград, 2014. С. 86–88.
 21. Zinkovskiy V.I., Tabakin E.M., Frolov S.A. Welding of californium small-sized neutron irradiation sources. *Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhn. konf. «Svarka i smezhnie tekhnologii»*. Moscow, 2000, pp. 220–225.
 22. Kazakov Yu.V., Kostyuchenko N.A., Kaplin A.V., Andreev S.A. The technology of arc welding of small-sized components for nuclear plants under the shielding gas high-pressure. *Trudy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhn. konf. «Teplofizicheskie i tekhnologicheskie aspekti povsheniya effektivnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva» (Reznikovskie chteniya)*. Togliatti, 2015, vol. 2, pp. 73–80.
 23. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Kaplin A.V. *Sposob dugovoy svarki* [Arc welding method]. Patent RF, no. 2533616, 2013.
 24. Zinkovskiy V.I., Krylov E.A., Akulyshv A.S. Technological characteristics of distance mounting of californium-252 small-sized neutron irradiation sources. Moscow, 1983, 16 p. (In Russian, unpublished).
 25. Ivanovich Yu.V., Tabakin E.M., Kazakov Yu.V. Methods to prevent the defects formation in the welded joints of bodies of small-sized neutron irradiation sources. *Svarka i diagnostika*, 2011, no. 3, pp. 43–47.
 26. Grigor'yants A.G., ed. *Tekhnologicheskie protsessi lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser treatment]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2006, 664 p.
 27. Akulov A.I., ed. *Svarka v mashinostroenii. Spravochnik* [Welding in machine engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, vol. 2, 463 p.
 28. Makarov E.L., ed. *Svarka i svarivaemiy materialy. Spravochnik* [Welding and welded materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, 526 p.
 29. Nikiforov G.D. *Metallurgiya svarki plavleniem alyuminievikh splavov* [Aluminum alloys fuse welding metallurgy]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 264 p.
 30. Banov M.D., Kazakov Yu.V., Kozulin M.G., Korotkova G.M., Koryagin K.B. *Svarka i rezka materialov* [Welding and cutting of materials]. 6th ed. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 400 p.
 31. Zinkovskiy V.I., Spak I.K. Welded seams quality when sealing transuranic radionuclides. *Obzor. NIIAR*. Moscow, TsNIAtominform Publ., 1989, 23 p.
 32. Redchits V.V., Lebedev G.T., Vaks I.A. Assessment of efficiency of measures for pores prevention in the seams of active metals when using various types of fuse welding. *Svarochnoye proizvodstvo*, 1979, no. 10, pp. 12–15.
 33. Cherevatenko G.A., Chistov E.D., Kodyukov V.M. *Radionuklidnye istochniki v radiatsionnoy tekhnike* [Radionuclide sources in radiation machines]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1989, 279 p.
 34. Kaplin A.V., Nazarov A.N., Miroshnichenko G.V., Kostyuchenko N.A., Tabakin E.M. *Ustanovka dlya impulsnoy lazernoy svarki v usloviyakh vakuuma* [Plant for pulse laser welding under vacuum conditions]. Patent RF, no. 138245, 2013.
 35. Tabakin E.M., Ivanovich Yu.V., Kaplin A.V., Andreev S.A., Nazarov A.N. Welding of advanced structural materials of components for research nuclear reactors. *Tezisy dokladov nauch. konf. «Noviy materialy dlya innovatsionnogo razvitiya energetiki»*. Dimitrovgrad, 2014, pp. 86–88.

REFERENCES

1. Reshetnikov F.G., ed. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovydelyayushchikh elementov energeticheskikh reaktorov* [Development, production and operation of heat-generating elements of power reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, vol. 1, 320 p.
2. Poloskov S.I., Koveshnikov S.P., Pavlov V.F., Taran V.I. Special aspects of aluminum alloys welding using the balanced arc of reversed polarity. *Trudy NIKIMT. T. 2. Svarka v atomnoy promyshlennosti i energetike*. Moscow, IzdAT Publ., 2002, pp. 266–280.
3. Ма В.М. *Materialy yadernikh energeticheskikh ustanovok* [Materials for nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 194 p.
4. Bochkarev V.V., ed. *Proizvodstvo izotopov* [Isotopes production]. Moscow, Atomizdat Publ., 1973, 597 p.
5. Reshetnikov F.G., ed. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovydelyayushchikh elementov energeticheskikh reaktorov* [Development, production and operation of heat-generating elements of power reactors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995, vol. 2, 336 p.

**SPECIAL ASPECTS OF WELDING OF ALUMINUM ALLOYS COMPONENTS
FOR NUCLEAR PLANTS**

© 2015

E.M. Tabakin, candidate of technical sciences

G.V. Miroshnichenko, engineer

A.V. Kaplin, engineer

S.A. Andreev, engineer

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

Keywords: argon-arc welding; laser welding; radioisotopic targets; small-sized components; welding in vacuum.

Abstract: The article presents the techniques and processing technologies that allow improvement of quality of welded joints of small-sized aluminum alloys components for nuclear plants. The authors give the description of standard designs and sizes of such components and show the characteristic feature of welding of small-sized components for nuclear plants – the splash formation. The article describes an experiment when the component temperature was measured during the splash. Other features of welding of aluminum alloys components are concerned with the presence of oxide film on their surfaces. It causes the defects disturbing the welded joints continuity. The authors considered the methods and processing technology that allow reduction of the probability of splash formation during the welding of edge and girth seams. The application of pulse laser welding was considered to be the most effective method. To remove the oxide film out of the throat area, the authors suggested making a cavity in the groove mounting seat. The authors found out that the best effect when welding the ampoules with a wall thickness of 1 mm is achieved in case of the groove depth of 1 mm. UDMI-161 slope controller, a special-purpose welding equipment, was used for the same purpose. The authors proved experimentally that, when using the UDMI-161, the number of oxide inclusions and pores of rejection size is reduced by half. The experiment determined the dependence of the component extension out of the collet insert on the quality of welded joint. The authors considered the possibility of reducing the growth of pores when welding aluminum through the molten state time reduction when using pulse laser welding. The article presents the equipment allowing to perform pulse laser welding under vacuum conditions.

ИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИОННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

© 2015

М.И. Фесина, кандидат технических наук,
профессор кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью»
А.В. Краснов, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью»
Л.Н. Горина, доктор педагогических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Управление промышленной и экологической безопасностью»
Е.Н. ШUTOва, магистрант кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: автомобильная аккумуляторная батарея; отходы; утилизация; патент на изобретение.

Аннотация: Рассмотрена актуальная задача определения стратегии эффективной и экологически чистой утилизационной переработки автомобильных аккумуляторных батарей (ААБ) как одного из наиболее вредного для окружающей среды составного компонента утилизируемых автотранспортных средств. С этой целью был проведен обзорный информационный анализ известных инновационных технологий утилизационной переработки ААБ по материалам описаний патентов на изобретения. Рассмотрены технологические процедуры утилизационной переработки ААБ, представленные в описаниях отечественных патентов на изобретения способов и технических устройств по их осуществлению. Выполнен также патентный поиск и выявлены номера патентов и патентных заявок на изобретения ведущих западных стран по указанной тематике. Они включают как способы и технические устройства утилизационной сепарации ААБ на отдельные составные компоненты – свинцовосодержащие (цинкосодержащие), электролитные растворы, полимерные корпусные элементы, так и непосредственную утилизационную рециклированную переработку каждого указанного составного элемента ААБ. Наибольшим разнообразием отличаются известные технологические процедуры утилизационной переработки свинцовосодержащего аккумуляторного лома, которые базируются на реализациях разнообразных термохимических преобразований, с получением исходного сырьевого продукта, пригодного для повторного использования. В наименьшей степени раскрыты процедуры утилизационной переработки электролитных растворов и полимерных корпусных элементов ААБ. Очевидно, это вызвано в первую очередь востребованностью и экономическим интересом в получении существенно более ценного сырьевого продукта из свинцовосодержащего (цинкосодержащего) лома. В это же время учащаются экологическое законодательство вынуждает разработчиков и производителей ААБ создавать более эффективные технологические процедуры утилизационной переработки всех составных элементов ААБ. Указано на возможное перспективное направление развития экологически чистой утилизации твердых отходов полимерных материалов, базирующихся на их рециклированной переработке, с получением соответствующих полуфабрикатных дробленых фрагментов полимерных материалов, которые могут применяться в качестве эффективных звукопоглощающих веществ, используемых в составе различного типа конструкций шумозаглушающих устройств.

ВВЕДЕНИЕ

С сентября 2012 года в РФ начали действовать утилизационные сборы для легковых и грузовых автомобилей и/или их составных компонентов, впервые выпускаемых в обращение (произведенных и/или ввезенных) на территории России. Утилизационная переработка автомобильных аккумуляторных батарей (ААБ) является одной из наиболее сложных технических и экологических проблем. В настоящее время ежегодный объем реализации ААБ на территории РФ, с охватом первичного и вторичного рынков, составляет около 10 млн штук. С учетом того факта, что «средний возраст» автомобилей, завершивших свой жизненный цикл, составляет 15...17 лет, а за период времени эксплуатации автомобиля замена ААБ осуществляется в среднем каждые 3 года (гарантийный срок эксплуатации ААБ также составляет 3 года), то общее количество утилизируемых ААБ, по крайней мере, в 5 раз превышает число утилизируемых автомобилей [1; 2]. Информационному поиску и анализу отдельных инновационных технологических приемов утилизационной переработки автокомпонентов на примерах ААБ, содержащих трудно утилизируемые вредные и опасные вещества,

базирующемуся на описаниях патентов на изобретения, посвящена представленная работа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФОРМАЦИОННОГО АНАЛИЗА

Согласно результатам проведенного информационного патентного поиска было обнаружено 78 отечественных и зарубежных патентов на изобретения, рассматривающих разнообразные способы (технологии) и технические устройства утилизационной переработки ААБ. По приведенной на рисунке 1 схеме, в частности из 33 рассмотренных отечественных разработок, анализируемые способы и технические устройства по осуществлению утилизационной переработки ААБ можно подразделить на четыре реализуемых направления.

Рассмотренные способы и технические устройства утилизации ААБ могут быть подразделены на отдельную сепарацию их составных компонентов с последующей переработкой свинцовосодержащих (цинкосодержащих) веществ, электролитных растворов и полимерных корпусных элементов ААБ. Известные способы отдельной сепарации составных компонентов ААБ базируются, в частности, на последовательных

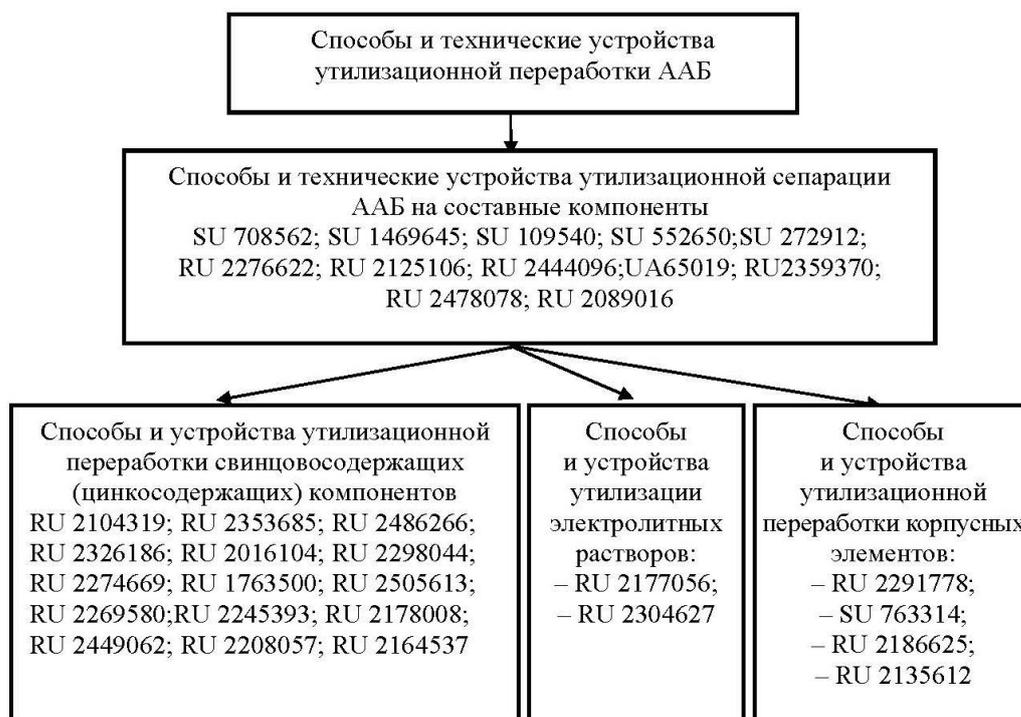


Рис. 1. Примеры отечественных разработок инновационных способов и технических устройств утилизационной переработки ААБ

технологических процедурах предварительного разрушения их полимерных корпусов с последующей реализацией технологий гидродинамической сепарации, использующей моечную камеру с форсунками, ситовибротранспортер, вращающиеся пыльные диски, устройства разделения тяжелых и легких фракций (см. патент RU 2276622) или базирующихся на избирательном механическом дроблении корпусов ААБ, предварительно нагретых до температуры 35...50 °С механическими ударными импульсами заданной частоты следования, просеивании дробленых фрагментов ААБ через сито заданных размеров ячеек, после чего осуществляется флотационное отделение неметаллических компонентов от металлических в водной суспензии плотностью в 1,1...2 раза большей плотности неметаллических компонентов (см. патент SU 272912). Один из известных утилизационных способов переработки ААБ включает этапы проведения технологической процедуры механического дробления корпусов на отдельные фрагменты, последующую габаритную сортировку дробленых частиц с помощью оригинального шнекового устройства (см. патент RU 2444096). Представляет интерес также способ, реализующий технологическую процедуру утилизации ААБ путем операций их механического дробления, сушки и пневмосепарации на металлические и неметаллические фракции, с использованием соответствующего газообразного теплоносителя, нагретого до температуры 150...200 °С (см. патент SU 552650).

Оригинальный способ извлечения кремнезема, содержащегося в сепараторах свинцово-кислотных батарей, рассмотрен в описании патента на изобретение RU 2359370. Он предусматривает выполнение технологических операций промывки тяжелых пластиков для

удаления соединений свинца и других инородных включений, отделения пластиков от промывочного раствора, извлечение свинца и регенерацию промывочного раствора, ополаскивание пластиков, сушку пластиков, отделение зернистых пластиков от тонких пластиков (полиэтилена с кремнеземистым наполнителем, поливинилхлорида, тканей), отделение поливинилхлорида и тканей от полиэтилена с кремнеземистым наполнителем фрагментацией, пиролиз полиэтилена с кремнеземистым наполнителем, крекинг пиролитических газов и паров.

В патенте на изобретение RU 2089016 рассмотрено техническое устройство для сепарационного отделения уплотнительного материала от несущей металлической сетчатой основы, в частности, электродов утилизируемых ААБ. Для этих целей используются вращающиеся шипованные барабаны, выдавливающие уплотненный материал из ячеек несущего металлического сетчатого основания электродов ААБ.

Согласно описанию патента на изобретение RU 2186625 технологическая процедура выделения легкой фракции (полипропилена) из аккумуляторного лома производится с использованием гидродинамического сепаратора, что позволяет повысить качество сепарации легкой фракции с исключением мелких частиц тяжелой фракции свинца, эбонита и др.

В патенте на изобретение RU 2164537 заявлен «Способ переработки свинцового аккумуляторного лома». Он предусматривает, в частности, его измельчение в потоке оборотной воды, мокрый рассев частиц материала по их крупности на фракции, разделение фракций на органическую, окисно-сульфатную и металлизированную с последующей электроплавкой двух последних, с образованием легкой и тяжелой составляющих

органической фракции. Окисло-сульфатную фракцию перед электроплавкой подвергают дополнительному измельчению до крупности $\leq 0,04$ мм и выделяют из нее фракцию окислов свинца, которую затем выводят из технологического процесса в виде товарного продукта.

В патенте на изобретение RU 2208057 рассмотрен «Способ извлечения свинца из вторичного сырья» применительно к утилизационной переработке ААБ, завершивших свой жизненный цикл. Он, в частности, предусматривает подачу окисульфатной пасты, выделяемой при сепарационной разделке ААБ, с соответствующим количеством углесодержащего восстановителя в отражательную печь свинцовой ванны. Свинец, получаемый в результате плавки, подвергают соответствующему кондиционированию и удалению с его поверхности оксидов. Один из известных способов утилизационной переработки ААБ базируется на технологических процедурах обработки фрагментируемого свинцовосодержащего лома и образующейся в процессе фрагментации свинцовой пыли в расплаве карбоната калия и гидроксида щелочного металла, выполняемых в присутствии углесодержащего восстановителя свинцовосодержащего лома и свинцовой пыли при температурах, превышающих температуру плавления расплава на $0...200$ °С (см. патент RU 2104319). Известен также способ, включающий размещение неразрушенных свинцовых пластин ААБ в электролите, представленном малеиновой кислотой, с последующим осуществлением электрохимического выделения свинца при плотности тока $5...15$ мА/см² (см. патент RU 2353685). Предлагается к использованию технологический процесс утилизации ААБ, базирующийся на извлечении свинца из свинцовосодержащих отходов водным раствором лимонной кислоты, с получением нитрата свинца, его последующим выделением и превращением в свинец (Pb) и/или оксид свинца (PbO) (см. патент RU 2486266). Рассматривается способ осуществления утилизационной переработки свинцовых пластин ААБ, включающий электрохимическое растворение свинца в растворе электролита на основе уксусной кислоты, с последующим отделением раствора от нерастворимых остатков и выделением соединений свинца в виде товарного продукта – трехосновного сульфата свинца путем его осаждения концентрированной серной кислотой (см. патент RU 2326186). Утилизационные способы сепарации отдельных составных компонентов ААБ могут включать десульфуризацию раствором, содержащим щелочь, с последующей плавкой свинцовосодержащих продуктов. Такого типа десульфуризацию осуществляют совместно с разделением лома в суспензии на металлизированную, окисно-сульфатную и органическую фазу. Последнюю подвергают выщелачиванию в щелочном растворе. Полученный от выщелачивания органической фазы раствор используется на стадии разделения лома для приготовления суспензии и десульфуризации лома. При этом осуществляют регенерацию щелочи в оборачиваемом растворе серной кислоты электролизом, который утилизируют в производстве технического гипса (см. патент RU 2016104). Известен также способ утилизационной переработки ААБ, отличающийся одновременным растворением неразрушенных свинцовых пластин с активной массой в электролите при электрохимическом выделении

свинца. В этом случае в качестве электролита используют раствор гидротетрата натрия и гидроксида натрия, а электрохимическое выделение свинца проводят при плотности тока $5...15$ мА/см² (см. патент RU 2298044). Также известен технологический процесс утилизационной переработки ААБ, базирующийся на операциях дисульфатизации сульфатно-оксидной фракции, с получением твердого десульфатированного продукта и раствора солей, с последующим выщелачиванием свинца, получением растворов концентрата сурьмы и промежуточных продуктов в виде соответствующих растворов (см. патент RU 2274669). В этом случае процесс выщелачивания свинца осуществляют в две последующие технологические стадии. На первой стадии десульфатированный продукт обрабатывают раствором азотной кислоты совместно с металлической фракцией лома с получением сурьмано-свинцового кек и промежуточного раствора нитрата свинца. Нитрат свинца в дальнейшем обрабатывают серноокислым раствором с получением оборотного раствора азотной кислоты и промежуточного продукта в виде сульфата свинца. Сульфат свинца обрабатывают аммиачными растворами с получением товарного продукта в виде трехосновного сульфата свинца и аммиачного раствора сульфата аммония. На второй стадии выщелачивания свинца сурьмано-свинцовый кек обрабатывают аммиачным раствором сульфата аммония с получением товарного сурьмяного концентрата и аммиачного раствора свинца, предназначенного для получения трехосновного сульфата свинца. Еще один известный способ утилизационной переработки свинцовосодержащих компонентов ААБ базируется на электрогидравлическом разделении лома на свинец и пасту с их последующей переработкой. При этом лом до процесса электрогидравлического разделения подвергают брикетированному прессованию с целью получения равномерного по толщине и плотности сырьевого полуфабрикатного слоя (см. патент SU 1763500). Известны также способы утилизационной переработки ААБ, заключающиеся в электрохимическом извлечении свинца из свинцовокислотных отходов ААБ. Они, в частности, включают электролитическое осаждение свинца из щелочных растворов, которые ведут с использованием асимметричного импульсного тока при варьировании заданной периодической последовательности пакетов положительных $n+$ и отрицательных $n-$ импульсов тока. Причем, согласно техническому описанию патента на изобретение RU 2505613, количество генерируемых положительных импульсов тока должно быть равно двадцати, в то время как временным интервалом для отрицательных импульсов является промежуток 1:10. Известен способ переработки свинцовых аккумуляторов по патенту на изобретение UA 65019, отличительной особенностью которого является предварительное заполнение корпусных полостей ААБ, соответствующей электропроводной жидкостью и создание электрогидравлического импульсного разряда напряжением $200...1000$ В. Энергия электрического импульса в канале разряда принимается численно равной $8...20$ -кратной емкости ААБ. В этом случае корпуса ААБ используются как технологические сосуды, а свинцовые пластины ААБ – как разрядник. Может быть также использована утилизационная переработка ААБ, включающая электрохимическое

растворение неразрушенных свинцовых пластин с активной массой в сульфаминовой кислоте (см. патент RU 2245393). В этом случае после осуществления соответствующей технологической процедуры электрохимического растворения выполняют операцию электролитического выделения свинца при одновременном растворении неразрушенных свинцовых пластин. Технологический процесс осуществляется при плотности тока 10...20 мА/см².

Способ переработки аккумуляторного лома, описанный в патенте на изобретение RU 2178008, включает двустадийную плавку металлической и сульфатно-окисной фракции с получением черного свинцово-сурьмянистого сплава и штейно-шлакового отвального продукта. При этом плавку разделанного аккумуляторного лома ведут в сульфидно-сульфатном натриевом расплаве. Плавку металлической фракции на первой стадии и плавку сульфатно-окисной фракции на второй стадии ведут в непрерывно циркулирующем расплаве, а циркуляцию расплава осуществляют газлифтным способом и совмещают с окислительной или восстановительной обработкой расплава.

Наряду с известными инновационными технологическими процедурами утилизационной переработки свинцовосодержащего лома представляют интерес способы и технические устройства утилизационной переработки электролитных растворов ААБ. Один из таких известных способов предусматривает нейтрализацию раствора электролита, которую производят конвертным шламом при массовом соотношении (0,65...0,95):1 (см. патент RU2177056). В образующуюся в течение периода 2...5 часов стеклообразную вязкую массу при процессе ее перемешивания добавляют гранулированный доменный шлак в качестве вяжущего вещества. При массовом соотношении указанных компонент (0,65...0,95):(0,10...0,20) в процессе их перемешивания в течение 60...90 секунд из полученной смеси готовят обрезки, которые подвергают сушке в атмосферных условиях. Еще один известный способ утилизации электролитных растворов ААБ базируется на реализациях технологических процессов десульфуризации растворов гидроксида натрия, промывке органической фракции образующихся растворов электролизом, с регенерацией гидроксида натрия и получением серной кислоты (см. патент RU 2304627). Процесс электролиза проводят в камерах электролизного аппарата, содержащего биполярные мембраны, при постоянном напряжении 30 В, с получением органической фракции и слабоминерализованной воды соледержанием не более 0,3 г/л, которую направляют на промывку активной массы.

Представляют также интерес известные инновационные технологии утилизационной переработки твердых полимерных материалов, в частности полипропиленов, являющихся типичным современным конструкционным материалом для изготовления корпусов ААБ. Известные способы и технические устройства утилизационной переработки полимерных корпусов ААБ, в частности, изготовленных из некристаллических полимеров пропилен, путем их экструзии при нагревании за счет выделяющегося тепла в процессе внутреннего трения утилизируемого материала отличаются тем, что производится дополнительное нагревание по-

лимеров до температуры 100° С. При этом могут производиться технологические операции перевода утилизируемых смесей полимеров или с дополнительно введенным наполнителем в высокоэластичное состояние. Их осуществление производится путем преднамеренного создания соответствующего искусственного сопротивления движению полимеров в экструдере, которое обеспечивается определенным соотношением габаритных размеров длины и диаметра шнека. Одновременно осуществляется интенсивное перемешивание полимера в камере регулируемой длины с последующим формированием полимера (см. патент RU 2291778). Другой известный способ утилизационной переработки корпусных элементов ААБ заключается в том, что исходное утилизируемое сырье подвергают соответствующей термической обработке при более высокой температуре 170...220 °С, осуществляемой при избыточном давлении 20...100 мм рт. ст., с конечным получением дистиллятной фракции и выделением из нее стирола (см. патент RU 2186625).

Проведенный на сервере Европейского патентного ведомства esp@cenet по адресу <http://ru.espacenet.com> поиск инновационных технологических приемов утилизационной переработки ААБ выявил 37 патентов на изобретения, выданных ведущими западными странами (США, Японии, Англии, Германии, Франции, Канаде, Швейцарии), которые представлены следующими номерами патентов: US 5575907; US 2013/0063073; US 4571261; US 5788739; US 4107007; US 4409072; US 4769116; US 4597841; US 5437705; JP 9-117748; JP 10-189063; JP 10-211446; JP 10-211447; JP 9-082371; JP 7-508927; JP 60172180; JP 10-158751; JP 58-048645; JP 11102733; GB 1299902; GB 1558230; GB 2078138; GB 1535025; GB 1486738; GB 1471640; DE 3700143; DE 1972780; DE 4407768; DE 3612491; DE 2706056; DE 4407763; DE 4445495; FR 243052; FR 2592662; CA 1292203; CA 1169122; CH 681401. Также выявлено 8 европейских и международных заявок и патентов на изобретения по отмеченной тематике: EP 1049190; EP 652811; EP 842304; EP 0132243; EP 0196800; WO 2011/090458; WO 2008/043162; WO 02/222348.

Рассмотренные выше инновационные разработки должны решать не только технологические процедуры их продуктивного осуществления, но и в максимальной степени учитывать экологические и экономические последствия их реализаций. Используемое рециркулированное термохимическое разложение твердых полимерных отходов, базирующееся на получении полуфабрикатных продуктов деструкции, вплоть до осуществления полной деполимеризации, как правило, требует существенных капитальных и энергетических затрат. В связи с этим более привлекательными, на наш взгляд, являются инновационные технологические решения по применению полуфабрикатных утилизационных продуктов, полученных, в частности, механическим дроблением полимерных материалов ААБ на соответствующие габаритные фрагменты, образующие оригинальные звукопоглощающие вещества. В отличие от известных типичных пористых звукопоглощающих веществ монолитного типа [2–5], они в дальнейшем могут продуктивно использоваться в составе разнообразных конструкций шумопоглощающих модулей, которыми

могут комплектоваться различного типа шумогенерирующие технические объекты, как это, в частности, отражено в опубликованных работах [6–13]. Производимые из твердых полимерных отходов дробленые фрагментированные элементы (в данном случае из полипропилена) могут быть, в частности, использованы в качестве составного звукопоглощающего вещества насыпных шумопоглощающих модулей [9] или в составе отдельных элементов конструкций различных шумозаглушающих устройств, выполненных согласно патентам на изобретения: RU 2490150; RU 2525709; RU 2542607; RU 2504488; RU 2487020; RU 2494266; RU 2512134; RU 2442705; RU 2468934; RU 2481976; RU 2465390. Предпочтительным конструктивно-технологическим исполнением такого типа акустических (шумопонижающих) модулей может являться заданное дозированное применение комбинированных смесей утилизируемых дробленых фрагментов твердых плотных воздухонепродуваемых структур полимерных материалов в составе с дроблеными пористыми (вспененными открытоячеистыми и/или волокнистыми) воздухопродуваемыми звукопоглощающими структурами материалов (RU 2490150, RU 2525709, RU 2542607).

Полные описания патентов на изобретения, на которые производятся ссылки в представленной статье, содержатся в электронных библиотеках Федеральной службы по интеллектуальной собственности (ФИС) и выложены на сервере Федерального института промышленной собственности (ФИПС) по адресу <http://www1.fips.ru/> и/или на сервере Европейского патентного ведомства esp@cenet по адресу <http://ru.espacenet.com/>.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный обобщенный информационный анализ инновационных технологий утилизационной переработки ААБ может представлять интерес в первую очередь для начальных стадий разработок технических проектов концептуального выбора тех или иных эффективных технологических процессов и/или производственного оборудования, а также для целей совершенствования уже функционирующих. Весьма перспективной представляется комплексная рециклированная утилизационная переработка ААБ, базирующаяся не только на получении исходных вторичных сырьевых материалов, но и на производстве востребованных полуфабрикатных промышленных продуктов, в достаточной степени пригодных для непосредственного применения в различных технических устройствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петров Р.Л., Седугин В.И. Экономические и экологические аспекты вторичной переработки отслуживших автомобилей в Европе // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 4. С. 7–13.
- Formulas of Acoustics / ed. F.P. Mechel. Verlag: Springer, 2001. 1175 p.
- Harris C.M. Handbook of Noise Control. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1979. 1052 p.
- Helmut V. Fuchs. Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen. Verlag: Springer, 2007. 546 p.
- Everest F.A. Master Handbook of Acoustics. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1994. 528 p.
- Фесина М.И., Краснов А.В., Горина Л.Н. Безопасность и экологичность автотранспортных средств. Тольятти: ТГУ, 2010. 202 с.
- Фесина М.И., Краснов А.В., Горина Л.Н. Автомобильные акустические материалы: Проектирование и исследование низкошумных конструкций автотранспортных средств. Ч. 2. Тольятти: ТГУ, 2010. 352 с.
- Фесина М.И., Краснов А.В., Горина Л.Н. Практические приемы повышения звукопоглощающих свойств материалов и конструкций деталей машин. Тольятти: ТГУ, 2012. 228 с.
- Краснов А.В., Фесина М.И., Горина Л.Н. Акустическая эффективность дробленых непористых полимерных материалов в составе насыпных шумопонижающих модулей // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2. № 5. С. 42–51.
- Фесина М.И., Краснов А.В., Горина Л.Н. Результаты экспериментальных исследований звукопоглощающих свойств дробленых пористых структур акустических пенополиуретанов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 2. С. 163–172.
- Краснов А.В., Фесина М.И., Балуев А.А. Цельноформованные шумопоглощающие структуры для улучшения акустического комфорта автотранспортных средств // Динамика и виброакустика машин: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конференции. Т. 2. Самара, 2012. С. 130–131.
- Краснов А.В., Фесина М.И., Балуев А.А. Разработка семейств универсальных шумопоглощающих модулей // Динамика и виброакустика машин: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конференции. Т. 2. Самара, 2012. С. 132–133.
- Краснов А.В., Фесина М.И. Многослойные акустические структуры для снижения излучения звуковой энергии энергетических установок и транспортных средств // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конференции. Ч. 1. Самара, 2011. С. 139–146.

REFERENCES

- Petrov R.L., Sedugin V.I. Economic and ecological aspects of recycling of time-expired vehicles in Europe. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov*, 2013, no. 4, pp. 7–13.
- Mechel F.P., ed. *Formulas of Acoustics*. Springer, 2001, 1175 p.
- Harris C.M. *Handbook of Noise Control*. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 1979. 1052 p.
- Helmut V. Fuchs. *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative akustische Konzepte und Bauteile mit praktischen Anwendungen in konkreten Beispielen*. Springer, 2007, 546 p.
- Everest F.A. *Master Handbook of Acoustics*. 5th ed. New York, McGraw-Hill, 1994, 528 p.
- Fesina M.I., Krasnov A.V., Gorina L.N. *Bezopasnost' i ekologichnost' avtotransportnykh sredstv* [Safety and environmental friendliness of motor vehicles]. Tolyatti, TGU Publ., 2010, 202 p.
- Fesina M.I., Krasnov A.V., Gorina L.N. *Avtomobilnye akusticheskie materialy. Proektirovanie i issledovanie*

- nizkoshumnykh konstruksiy avtotransportnykh sredstv* [Automobile sound proof materials. Development and research of low noise designs of motor vehicles]. Tolyatti, TGU Publ., 2010, part 2, 352 p.
8. Fesina M.I., Krasnov A.V., Gorina L.N. *Prakticheskie priemy povysheniya zvukopogloshchayushchikh svoystv materialov i konstruksiy detaley mashin* [Practical methods of improvement of sound-proof properties of materials and vehicle parts]. Tolyatti, TGU Publ., 2012, 228 p.
 9. Krasnov A.V., Fesina M.I., Gorina L.N. Acoustic efficiency of Shredded nonporous polymeric materials as a part of bulk noise-attenuating modules. *Bezopasnost' v tekhnosfere*, 2013, vol. 2, no. 5, pp. 42–51.
 10. Fesina M.I., Krasnov A.V., Gorina L.N. Results of experimental investigations sound absorbing properties crushing porous structure of materials. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 163–172.
 11. Krasnov A.V., Fesina M.I., Baluev A.A. Integrally molded noise-absorbing structures for improvement of acoustical comfort of motor vehicles. *Sbornik trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Dinamika i vibroakustika mashin"*. Samara, 2012, vol. 2, pp. 130–131.
 12. Krasnov A.V., Fesina M.I., Baluev A.A. Development of population of universal noise-absorbing modules. *Sbornik trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Dinamika i vibroakustika mashin"*. Samara, 2012, vol. 2, pp. 132–133.
 13. Krasnov A.V., Fesina M.I. Multi-layer acoustic structures for reduction of sound energy radiation of energy machines and vehicles. *Materialy dokladov mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya"*. Samara, 2011, part 1, pp. 139–146.

INFORMATION ANALYSIS OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF UTILIZATION RECYCLING OF AUTOMOBILE BATTERIES

© 2015

M.I. Fesina, PhD (Engineering),
Professor of Chair "Management of industrial and environmental safety"
A.V. Krasnov, PhD (Engineering),
associate professor of Chair "Management of industrial and environmental safety"
L.N. Gorina, Doctor of Sciences (Pedagogy), Professor,
Head of Chair "Management of industrial and environmental safety"
E.N. Shutova, graduate student of Chair "Management of industrial and environmental safety"
Togliatti state University, Togliatti (Russia)

Keywords: automobile battery; waste products; utilization; patent for invention.

Abstract: The article considers the crucial task of determining a strategy for effective and ecologically friendly utilization of automobile accumulator batteries (AAB) being one of the most dangerous for the environment recoverable vehicle components. For this purpose, basing on the descriptions of invention patents, the authors carried out the general information analysis of known innovative AAB utilization technologies and considered the technological procedures of AAB recycling utilization represented in descriptions of national patents for inventions of methods and technical devices used for their implementation. Moreover, a patent search was performed and the numbers of patents and patent applications for inventions on this topic of leading Western countries were identified. They include both the methods and technical devices for AAB utilization separation into individual constituent components – plumbiferous (zinc-containing), electrolyte solutions, polymeric housing elements, and the direct utilization recycled processing of each noted AAB constituent element. There is a great variety of well-known technological procedures for utilization processing of plumbiferous battery scrap that are based on the implementation of various thermochemical transformations in order to get raw materials suitable for reuse. The procedures of utilization processing of AAB electrolyte solutions and polymeric housing elements are represented least of all. Obviously, it is caused by the demand and economic interest in obtaining a much more valuable commodity product from plumbiferous (zinc-containing) scrap. At the same time, the more stringent environmental legislation forces AAB developers and manufacturers to create more efficient technological procedures of utilization processing of all AAB components. The authors highlighted the feasibly prospective way of development of ecologically friendly disposal of polymeric solid waste, which is based on materials recycling resulting into production of corresponding semi finished polymeric crushed fragments which can be used as the effective sound-absorbing substances within different types of noise reducing device constructions.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НАНЕСЕНИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ В ИХ КОНТАКТЕ С ПОДЛОЖКОЙ

© 2015

А.А. Хафизов, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

Ю.И. Шакиров, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника»

С.Н. Тимергалиев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика»

В.И. Ильин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника»
*Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) Федерального университета,
Набережные Челны (Россия)*

Ключевые слова: математическая модель; плазменная струя; электрический разряд; жидкий катод; подложка; подслей; тепловой поток.

Аннотация: В данной работе приводятся результаты математического моделирования температурного состояния системы «подложка – подслей» при нанесении защитных покрытий из ферромагнитного порошка на стальные образцы. Рассматриваются вопросы распределения температуры и температурных градиентов в подложке и подслое и в области их контакта. Подробно описывается процесс нанесения покрытия плазменной струей, полученной в электрическом разряде с жидким катодом, а также плазменная установка, с помощью которой производили напыление ферромагнитного порошка. В работе также рассматривается способ получения ферромагнитного порошка. При решении задачи использовали метод Фурье. Приводятся исходные данные для реализации вычислительной схемы. Результаты численных расчетов приведены в виде зависимостей изменения во времени температуры на контакте подслоя с подложкой и временной зависимости величины $Q=q\cdot\varphi$, где q – плотность теплового потока, падающего на свободную поверхность подслоя; φ – плотность теплового потока на контакте подслоя с подложкой. Анализ приведенных данных показывает, что в системах контактного теплообмена «подслей – подложка» с близкими значениями теплофизических характеристик материалов составляющих наблюдается медленный рост во времени температуры контакта. В таких системах плотность теплового потока в области контакта подслоя с подложкой незначительно отличается от плотности потока, вызывающего разогрев свободной поверхности подслоя, причем с течением времени они стремятся к выравниванию. Указанные временные зависимости $t_1(\tau)$ и $Q(\tau)$ обусловлены тем, что в данном случае толщина подложки значительно превосходит толщину подслоя.

ВВЕДЕНИЕ

Прочность защитного покрытия и поверхностное упрочнение наносимого с помощью плазменной струи, полученного в электрическом разряде с жидким катодом [1; 2], и его сцепление с подложкой в значительной степени зависит от наличия остаточных напряжений [3; 4] в системе «покрытие – подложка». Изучению роли остаточных напряжений в сварных соединениях посвящено значительное количество как зарубежных, так и отечественных исследований [5–7]. Снизить уровень остаточных напряжений можно путем нанесения на подложку дополнительного подслоя [8]. Поскольку подложка и подслей обладают различными теплофизическими свойствами, то при тепловом воздействии на систему «подложка – подслей» при нанесении покрытий возникают температурные напряжения [9; 10]. Поэтому при разработке технологии нанесения покрытий (подложка+подслей) важное значение приобретает информация о распределении температуры и температурных градиентов в подложке и подслое и в области их контакта.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе приводятся результаты математического моделирования температурного состояния системы «подложка – подслей» при нанесении защитных покрытий из ферромагнитного порошка плазменной струей (рис. 1), полученной в электрическом разряде с жидким катодом на стальные образцы [11; 12]. Ферромагнитный порошок получен в высоковольтном

электрическом разряде между стальным электродом-анодом и жидким катодом при атмосферном давлении напряжением $U=1000-1300$ В, током $I=0,6-10$ А, при межэлектродном расстоянии $S=5-10$ мм [13; 14].

Тепловое воздействие частиц покрытия на свободную поверхность подслоя принимается эквивалентным разогреву этой поверхности тепловым потоком заданной мощности $q=\text{const}$. Температура t_0 подложки и подслоя в начальный момент времени одинакова, а толщина подложки $l-d \gg d$ толщины подслоя.

Можно считать, что распределение температурных полей в указанной системе осуществляется путем теплопроводности следующим образом:

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < d, \quad \tau > 0), \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \cdot \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (d < x < l, \quad \tau > 0), \quad (2)$$

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0, \quad (3)$$

$$t_1(d, \tau) = t_2(d, \tau), \quad (4)$$

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial t_1(d, \tau)}{\partial x} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial t_2(d, \tau)}{\partial x} = \varphi(\tau), \quad (5)$$

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = q, \tag{6}$$

где функции $t_1^*(x, \tau)$, $X_k(x)$, $T_k(\tau)$ даются формулами:

$$\frac{\partial t_2(l, \tau)}{\partial x} = 0, \tag{7}$$

$$t_1^*(x, \tau) = \frac{q - \varphi(\tau)}{2d\lambda_1} \cdot x^2 - \frac{q}{\lambda_1} \cdot x;$$

$$X_k(x) = \cos(\mu_k x), \mu_k = \left(\frac{\pi \cdot k}{d}\right)^2, k = 0, 1, \dots,$$

где $t_1(x, \tau), t_2(x, \tau)$ – температуры, соответственно, подслоя и подложки в точке x в момент времени τ ;
 d – толщина подслоя;
 $l-d$ – толщина подложки;
 a_j и $\lambda_j (j=1,2)$ – соответственно, коэффициенты теплопроводности;
 $q = const$ – тепловой поток заданной мощности;
 $\varphi(\tau)$ – плотность теплового потока на контакте подложки с подслоем;
 t_0 – начальная температура.

Задача заключается в нахождении температур $t_j(x, \tau), j=1,2$ и плотности $\varphi(\tau)$ из (1)–(7).

$$T_k(\tau) = \begin{cases} e^{-a_1 \mu_k \tau} \left[\int_0^\tau b_k(t) e^{a_1 \mu_k t} dt + a_k \right], & k = 1, 2, \dots, \\ \int_0^\tau b_0(t) dt + a_0, & k = 0; \end{cases}$$

$$b_k(\tau) = \begin{cases} \frac{2(-1)^k}{\lambda_1 \cdot \mu_k \cdot d} \cdot \varphi'(\tau), & k = 1, 2, \dots, \\ \frac{a_1(q - \varphi(\tau))}{d \cdot \lambda_1} + \frac{d}{6\lambda_1} \cdot \varphi'(\tau), & k = 0; \end{cases}$$

$$a_k = \begin{cases} -\frac{2q}{\lambda_1 \cdot d \cdot \mu_k}, & k = 1, 2, \dots, \\ t_0 + \frac{q \cdot d}{3\lambda_1}, & k = 0; \end{cases}$$

При выводе решения (8) мы учли, что $\varphi(0) = 0$.

Аналогичным образом находим решение уравнения (2), удовлетворяющее условиям в (3), (5), (7), которое имеет вид:

$$t_2(x, \tau) = \sum_{k=0}^{+\infty} \tilde{T}_k(\tau) \cdot \tilde{X}_k(x) + t_2^*(x, \tau), \tag{9}$$

где

$$t_2^*(x, \tau) = \frac{\varphi(\tau)}{2(l-d)\lambda_2} (x^2 - 2lx),$$

$$\tilde{X}_k(x) = \cos[\tilde{\mu}_k(x-d)], \quad \tilde{\mu}_k = \left(\frac{\pi \cdot k}{l-d}\right)^2, \quad k = 0, 1, 2, \dots;$$

$$\tilde{T}_k(\tau) = \begin{cases} e^{-a_2 \tilde{\mu}_k \tau} \left[\int_0^\tau \tilde{b}_k(t) e^{a_2 \tilde{\mu}_k t} dt \right], & k = 1, 2, \dots, \\ \int_0^\tau \tilde{b}_0(t) dt + t_0, & k = 0; \end{cases}$$

$$\tilde{b}_k(\tau) = \begin{cases} \frac{(-2)\varphi'(\tau)}{\lambda_2(l-d)\tilde{\mu}_k}, & k = 1, 2, \dots, \\ \frac{a_2}{\lambda_2(l-d)} \varphi(\tau) + \frac{2l^3 - 3ld^2 + d^3}{6\lambda_2(l-d)^2} \cdot \varphi'(\tau), & k = 0 \end{cases}$$

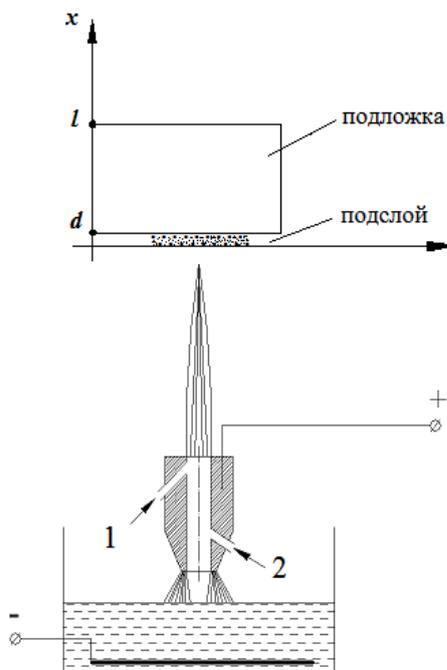


Рис. 1. Схема процесса напыления порошка плазменной струей: 1 – канал для подачи напыляемого порошка; 2 – канал для подачи плазмообразующего газа

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При решении задачи (1)–(7) будем использовать метод Фурье [15; 16]. Сначала находим решение уравнения (1), удовлетворяющее условиям в (3), (5), (6), считая $\varphi(\tau)$ временно известной. Это решение получаем в виде:

$$t_1(x, \tau) = \sum_{k=0}^{+\infty} T_k(\tau) X_k(x) + t_1^*(x, \tau), \quad 0 \leq x \leq d, \tau > 0, \tag{8}$$

Теперь решения (8), (9) подставим в условие (4). В результате для определения плотности $\varphi(\tau)$ получим интегральное уравнение Вольтерра первого рода [17; 18] вида:

$$\int_0^\tau \left\{ \theta \left[\frac{\pi a_1}{d^2} (\tau - t) \right] + \frac{\beta_0}{l-d} \theta \left[\frac{\pi a_2}{(l-d)^2} (\tau - t) \right] \right\} \varphi(t) dt = \psi(\tau), \quad (10)$$

где $\theta(x)$ – тэта-функция, определенная формулой:

$$\theta(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} e^{-\pi k^2 x},$$

$$\psi(\tau) = q(\tau) - \frac{d^2 q}{6\lambda_1} - \frac{2d^2 q}{a_1 \pi^2} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(-1)^k \cdot e^{-a_1 \mu_k \tau}}{k^2},$$

$$\beta_0 = \frac{d\lambda_1 a_2}{a_1 \lambda_2}.$$

Интегральное уравнение (10) решаем численно [19; 20]. Пусть $\tau \in [0, T]$, $\tau_j = j \cdot h$, $j = \overline{1, N}$, $h = T/N$. Для нахождения значений $\varphi(\tau_j)$ в узлах τ_j , $j = \overline{1, N}$, получаем рекуррентные соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi(\tau_{j+1}) = & \frac{\{\psi_m(\tau_{j+1}) - h \cdot [\varphi(\tau_1) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_1}{2}) + \\ & + \frac{\varphi(\tau_2) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_1 + \tau_2}{2}) + \dots + \\ & + \frac{\varphi(\tau_j) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_{j-1} + \tau_j}{2})]\}}{[h \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_j + \tau_{j+1}}{2})]} + \\ & + \frac{\varphi(\tau_j) \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_{j-1} + \tau_j}{2})]}{[h \cdot k_m(\tau_{j+1}; \frac{\tau_j + \tau_{j+1}}{2})]} \} \\ & j = 0, 1, \dots, N-1, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$k_m(\tau; t) = \theta_m \left[\frac{\pi a_1}{d^2} \cdot (\tau - t) \right] + \frac{\beta_0}{l-d} \theta_m \left[\frac{\pi a_2}{(l-d)^2} \cdot (\tau - t) \right],$$

$$\theta_m(x) = 1 + 2 \sum_{k=1}^m e^{-\pi k^2 x},$$

$$\psi_m(\tau) = q\tau - \frac{d^2 q}{6\lambda_1} - \frac{2d^2 q}{a_1 \pi^2} \sum_{k=1}^m \frac{(-1)^k e^{-a_1 \mu_k \tau}}{k^2},$$

m – достаточно большое натуральное число.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вычислительная схема (11) реализована при следующих исходных данных: $a_1 = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_1 = 20 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $a_2 = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\lambda_2 = 46 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $m = 100$, $d = 10^{-3} \text{ м}$, $q = 4 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$, $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Результаты численных расчетов приведены на рис. 2, 3.

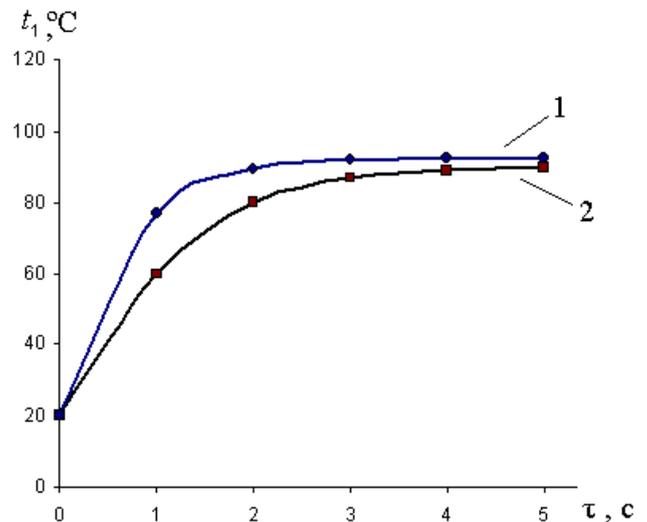


Рис. 2. Изменение во времени τ температуры t_1 на контакте подслоя с подложкой: 1 – при $l=10^{-2} \text{ м}$; 2 – при $l=2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$

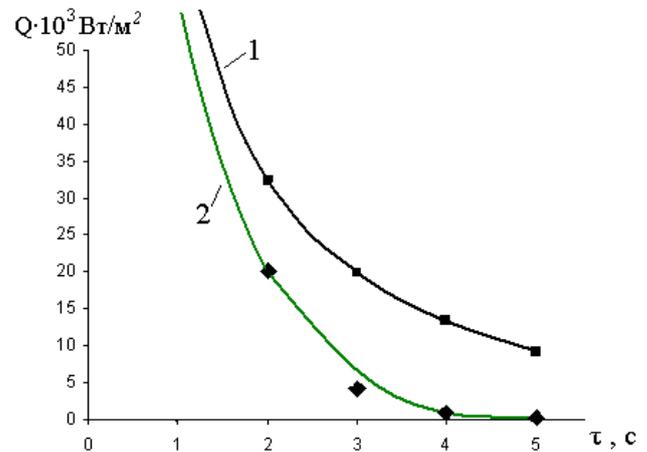


Рис. 3. Временная зависимость величины $Q=q-\varphi$: 1 – при $l=10^{-2} \text{ м}$; 2 – при $l=2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; q – плотность теплового потока, падающего на свободную поверхность подслоя; φ – плотность теплового потока на контакте подслоя с подложкой

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ приведенных данных показывает, что в системах контактного теплообмена «подслой – подложка» с близкими значениями теплофизических характеристик материалов составляющих наблюдается медленный рост во времени температуры контакта t_1 . В таких системах плотность теплового потока в области контакта

подслоя с подложкой (φ) незначительно отличается от плотности потока (q), вызывающего разогрев свободной поверхности подслоя, причем с течением времени φ и q стремятся к выравниванию (что соответствует падению кривых $Q=q\varphi$ на рис. 3). Указанные временные зависимости $t_f(\tau)$ и $Q(\tau)$ обусловлены тем, что в данном случае толщина подложки значительно превосходит толщину подслоя.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в процессах нанесения защитных покрытий на двухкомпонентные объекты решение задачи регламентированного управления тепловыми параметрами находится в прямой зависимости от соответствующего выбора составляющих систему в плане оптимизации соотношения между их размерами и теплофизическими свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Многоканальная плазменная установка с электролитическим катодом // Автомобильная промышленность. 2011. № 2. С. 36–38.
- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Нанесение покрытий и поверхностное упрочнение ферромагнитным порошком в электрическом разряде // Образование и наука – производству: сб. трудов междунар. науч.-техн. и образоват. конференции. Набережные Челны: ИНЭКА, 2010. С. 201–203.
- Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1974. 368 с.
- Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
- Колот В.А. Применение ресурсосберегающих вибрационных и отделочно-упрочняющих методов обработки нежестких деталей в тяжелом машиностроении // Технология, экономика, организация производства и управления. Серия 8. 1991. Вып. 24. С. 56.
- Гиренко В.С., Котенко Э.В. Влияние остаточных напряжений и деформационного старения на сопротивляемость стали образованию хрупких трещин // Автоматическая сварка. 1968. № 2. С. 34–37.
- Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 254 с.
- Матвеев Н.В., Краснов А.Н., Милосердов И.В., Орещенков Ю.В., Изволенский Е.В. Остаточные напряжения в покрытии из нитрида титана, осажденного в вакууме // Проблемы прочности. 1985. № 5. С. 90–93.
- Мрочек Ж.А., Антоненко А.Б., Вершина А.К. Распределение температуры и тепловых потоков на контакте подложки с подслоем при электродуговом нанесении защитных покрытий // Электронная обработка материалов. 1987. № 1. С. 23–26.
- Биргер И.А., Мавлютов Р.П. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.
- Khafizov A.A., Valiev R.A., Valiev R.I., Shakirov Yu.I. Steel surface modification with plasma spraying electrothermal installation using a liquid electrode //

- Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 567. doi:10.1088/1742-6596/567/1/012026.
- Khafizov A.A., Shakirov B.Yu., Shakirov Yu.I. Surface hardening of components by automatic plasma electrothermal installation with molten cathode // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 69. doi:10.1088/1757-899X/69/1/012019.
- Валиев Р.И., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Гумеров А.З., Насибуллин Р.Т., Садриев Р.Ш., Саримов Л.Р., Хафизов А.А. Некоторые особенности получения мелкодисперсных порошков оксида железа в низкотемпературной плазме электрического разряда с жидким катодом // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 3-3. С. 66–69.
- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Получение ферромагнитных порошков в электрическом разряде для изготовления деталей автомобилей // Автомобиль и техносфера: VI Междунар. науч.-практ. конференция. Казань, 2011. С. 140–141.
- Соболев С.Л. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. 444 с.
- Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 710 с.
- Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1982. 304 с.
- Лебедев Н.Н. Специальные функции и их приложения. Л.: Физматгиз, 1963. 358 с.
- Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 600 с.
- Хемминг Р. Численные методы. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 400 с.

REFERENCES

- Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Hafizov A.A., Shakirova G.Yu. Multi-channel plasma apparatus for processing of materials. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2011, no. 2, pp. 36–38.
- Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Hafizov A.A., Shakirova G.Yu. Applying of coatings and surface hardening with ferromagnetic powder in electric discharge. *Sbornik trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. i obrazovat. konf. "Obrazovanie i nauka – proizvodstvu"*. Naberezhnye Chelny: INEKA Publ., 2010, pp. 201–203.
- Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch. 2. Mekhanicheskie ispytaniya* [Mechanical properties of metals. P. 2. Mechanical tests]. 3rd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 368 p.
- Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 232 p.
- Kolot V.A. Use of resource-saving vibration and finishing-hardening methods of processing of non-hard parts in heavy engineering. *Tekhnologiya, ekonomika, organizatsiya proizvodstva i upravleniya. Seriya 8*, 1991, no. 24, p. 56.
- Girenko V.S., Kotenko E.V. The influence of residual stresses and age hardening on the resistance of steels to brittle fracture initiation. *Avtomaticheskaya svarka*, 1968, no. 2, pp. 34–37.
- Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh*

- [Control of residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989, 254 p.
8. Matveev N.V., Krasnov A.N., Miloserdov I.V., Oreshchenkov Yu.V., Izvolenskii E.V. Residual stresses in titanium nitride coating deposited in a vacuum. *Strength of Materials*, 1985, vol. 17, no. 5, pp. 692–696.
 9. Mrochek Zh.A., Antonenko A.B., Vershina A.K. Distribution of temperature and heat flow within the contact of base coat with interlayer during arc welding applying of protective coating. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1987, no. 1, pp. 23–26.
 10. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 560 p.
 11. Khafizov A.A., Valiev R.A., Valiev R.I., Shakirov Yu.I. Steel surface modification with plasma spraying electrothermal installation using a liquid electrode. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 567. doi:10.1088/1742-6596/567/1/012026.
 12. Khafizov A.A., Shakirov B.Yu., Shakirov Yu.I. Surface hardening of components by automatic plasma electrothermal installation with molten cathode. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 69. doi:10.1088/1757-899X/69/1/012019.
 13. Valiev R.I., Gaysin A.F., Gaysin F.M., Gumerov A.Z., Nasibullin R.T., Sadriev R.Sh., Sarimov L.R., Khafizov A.A. Some peculiarities of producing fine ferrous oxide powders in low-temperature plasma of electric discharge with fluid cathode. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 3–3, pp. 66–69.
 14. Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Khafizov A.A., Shakirova G.Yu. Production of ferromagnetic powders in electric discharge for manufacturing of vehicle parts. *Materialy VI Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Avtomobil i tekhnosfera"*. Kazan, 2011, pp. 140–141.
 15. Sobolev S.L. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equitation of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 444 p.
 16. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki* [Equitation in partial derivatives of mathematical physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 710 p.
 17. Volterra V. *Teoriya funktsionalov, integralnykh i integro-differentsialnykh uravneniy* [Theory of functionals and of integral and integro-differential equations]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 304 p.
 18. Lebedev N.N. *Spetsialnye funktsii i ikh prilozheniya* [Special functions and their applications]. Leningrad, Fizmatgiz Publ., 1963, 358 p.
 19. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 600 p.
 20. Hamming R.W. *Chislennye metody* [Numerical methods for scientists and engineers]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1972, 400 p.

TEMPERATURE DISTRIBUTION DURING POWDER COATINGS APPLYING USING PLASMA STREAM WITHIN THEIR CONTACT WITH THE SUBSTRATE LAYER

© 2015

A.A. *Khafizov*, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”

Yu.I. Shakirov, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Chair “Power and electrical engineering”

S.N. Timergaliev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Chair “Mathematics”

V. I. Ilyin, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Power and electrical engineering”

Branch of Kazan (Volga Region) Federal University in Naberezhnye Chelny, Naberezhnye Chelny (Russia)

Keywords: mathematical model; plasma stream; electrical discharge; liquid cathode; substrate layer; intermediate layer; heat flow.

Abstract: This paper presents the results of mathematical modeling of temperature state of the “substrate – intermediate layer” system when applying ferromagnetic powder protective coatings on the steel samples. The authors consider the issues of temperature and temperature gradients distribution in the substrate and the underlayer, and in the area of their contact and describe in detail the process of coating applying using the plasma stream produced by the electrical discharge with the liquid cathode, as well as the plasma sprayer for ferromagnetic powder applying. The paper considers the method of ferromagnetic powder producing. To solve the issue, the authors use Fourier method and give the initial data for the computational scheme implementation. The results of numerical calculations are presented in the form of dependences of temperature behavior in time in the intermediate layer contact with the substrate and the time dependence of $Q=q-\varphi$ value; where q – is the heat flux density incident to the underlayer free surface; and φ – is the heat flux density within the contact of the underlayer with the substrate. Data analysis shows that within the “substrate – intermediate layer” contact heat exchange systems with the similar values of thermal and physical characteristics of the constituent materials, the slow contact temperature growth in time is observed. Heat flux density within the contact area of underlayer and substrate layer in such systems slightly differs from the flux density causing the underlayer free surface heating and they tend to equalize with time. These $t_1(\tau)$ and $Q(\tau)$ time dependences are stipulated by the condition when the substrate layer thickness exceeds considerably the underlayer thickness.

ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ И СНЯТИЕ ЗАУСЕНЦЕВ МЕТАЛЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ, ГОРЯЩИМ МЕЖДУ СТРУЕЙ ЭЛЕКТРОЛИТА И ТВЕРДЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

© 2015

Ю.И. Шакиров, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника»

Р.И. Валиев, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

А.А. Хафизов, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

А.Н. Суцикова, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника»

И.М. Нуриев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника»
Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) Федерального университета, Набережные Челны (Россия)

Ключевые слова: прошивка отверстий; снятие заусенцев; плазма; маркировка деталей.

Аннотация: Существуют разные методы прошивки отверстий. Авторами предлагается процесс прошивки металлов с помощью электрического разряда, горящего между струей электролита и твердым электродом – обрабатываемой деталью. Электрическим разрядом между жидким электродом и обрабатываемой деталью можно прошить отверстие, также можно использовать для удаления заусенцев, очистки поверхности, резки металлов и маркировки деталей. Для исследования вольт-амперной характеристики, зависимости разрядного тока от расхода электролита, зависимости плотности тока между струей электролита нами был разработан ручной переносной инструмент типа «пистолет». Исследования показали, что разряд между струей электролита и обрабатываемой деталью загорается и горит при $U=510-515$ В. Когда разряд переходит в режим электролиза, ток резко увеличивается в 1,5–2 раза. С увеличением расхода электролита ток разряда возрастает. Исследования зависимости плотности тока разряда, горящего между струей электролита и металлическим анодом от разрядного тока, показали, что с ростом тока плотность тока на жидком электроде растет линейно. На основе анализа и обобщения большого количества экспериментальных данных электрический разряд можно использовать для технологических целей. С помощью плазмы разряда со струей электролита можно производить операции очистки внутренних поверхностей трубок, осуществлять прошивку отверстий в металле, резку металла, снятие заусенцев с кромок деталей, выполнять операции маркировки изделий без изменения свойств остальной массы детали.

ВВЕДЕНИЕ

Существуют разные методы прошивки отверстий, известные как электрохимическая обработка, лазерная прошивка [1–6].

Одно из первых применений лазера в технологии было связано с прошивкой отверстий. Лазер оказывается эффективным для изготовления небольших отверстий в соплах, форсунках, фильерах, специальных диафрагмах и мембранах. Для этих целей используются, как правило, импульсные лазеры. Также объектами применения этой технологии являются: сита, ушки игл, фильтры, ювелирные изделия (подвески, четки, камни).

В режиме электрохимической обработки (ЭХО) из-за резкого увеличения плотности тока электролит быстро греется, время обработки также увеличивается, а потребляемая от сети мощность резко растет.

Кроме того, при ЭХО необходимо обеспечить полное или частичное исключение побочных химических реакций; обеспечить анодное растворение металла только в зоне обработки, т. е. обеспечить наличие высоких локализирующих свойств; обеспечить протекание на всех участках обрабатываемых поверхностей заготовки электрического тока расчетного значения и т. д. Естественно, электролитов такого универсального назначения не существует. Поэтому приходится применять компромиссное решение в зависимости от используемой операции ЭХО, природы материала и т. д.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ

Электрическим разрядом между жидким электродом и обрабатываемой деталью [7–13] можно прошить от-

верстие, также можно горячей струей электролита использовать для удаления заусенцев с кромок изделия, очистки внутренних поверхностей деталей (трубок), резки металла и маркировки деталей [14–24]. Структурная схема процесса представлена на рис. 1, 2. Струя электролита 3 (рис. 1) под давлением $P_3=3 \cdot 10^3-2 \cdot 10^4$ Па подается через сопло 1 с внутренним диаметром d на обрабатываемый участок детали 2. Для исключения короткого замыкания сопло закрыто диэлектрическим наконечником.

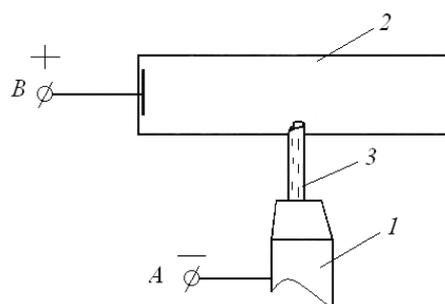


Рис. 1. Схема работы со струей электролита: односторонняя прошивка отверстий, резка или снятие заусенцев;

Для исследования вольт-амперной характеристики, зависимости разрядного тока от расхода электролита, зависимости плотности тока между струей электролита нами был разработан ручной переносной инструмент

типа «пистолет». На рис. 3 приведен эскиз полупромышленного инструмента типа «пистолет» в разрезе. Через штуцер 10 электролит подается на клапанное устройство, состоящее из цилиндра 5, клапана 6, пружины 2 и регулировочного винта 1. Курок 7 служит для включения и выключения подачи электролита и микровыключателя 8, управляющего питающим напряжением. Ограничитель 12 позволяет устанавливать расстояние между диэлектрическим соплом и обрабатываемой деталью. Диэлектрическое сопло 13 предохраняет от короткого замыкания и помогает регулировать расход электролита.

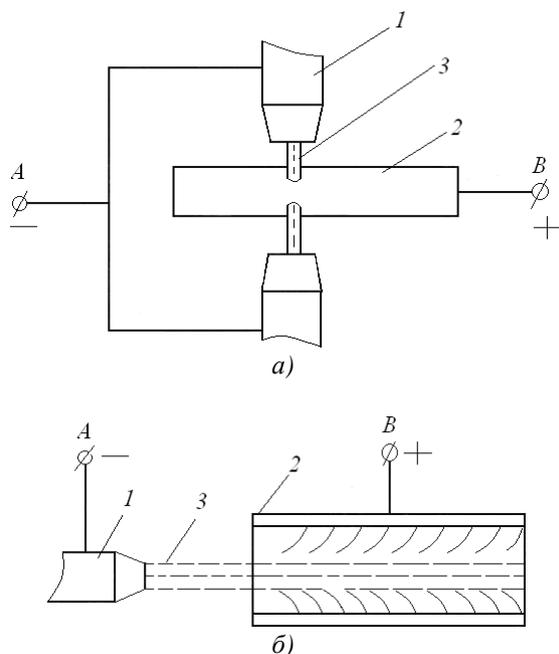


Рис. 2. Схемы работы со струей электролита:
а) двухсторонняя прошивка отверстий, резка, снятие заусенцев;
б) очистка внутренней поверхности трубок

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда между струей электролита и обрабатываемой деталью (рис. 4) позволяет сделать заключение, что разряд зажигается и горит при напряжении 510–515 В. ВАХ разряда является слегка падающей. В момент перехода разряда в режим электролиза ток резко увеличивается в 1,5–2 раза. С увеличением расхода электролита G до значений G_{max} ток разряда возрастает. На рис. 5 приведены зависимости разрядного тока для различных длин струи электролита от расхода жидкости G . При расходах электролита G_{min} и G_{max} наблюдается неустойчивость горения разряда, связанная с нестабильностью выделения тепла в струе электролита и в разрядном промежутке. Дальнейшее увеличение расхода электролита G приводит к гашению разряда. При увеличении тока в 2–2,5 раза разряд не горит. Идет интенсивное тепловыделение, и осуществляется процесс электролиза. Рост тока связан с уменьшением сопротивления струи разряда, вызванным увеличением числа носителей заряда. Потому что в экспериментах расход G уве-

личивался за счет увеличения скорости течения электролита при неизменном диаметре струи. Изменение диаметра сопла и длины струи на характер зависимостей ВАХ не влияет. Разрядный ток в исследованном диапазоне параметров растет от длины струи и расхода электролита. С ростом длины струи плотность тока растет линейно.

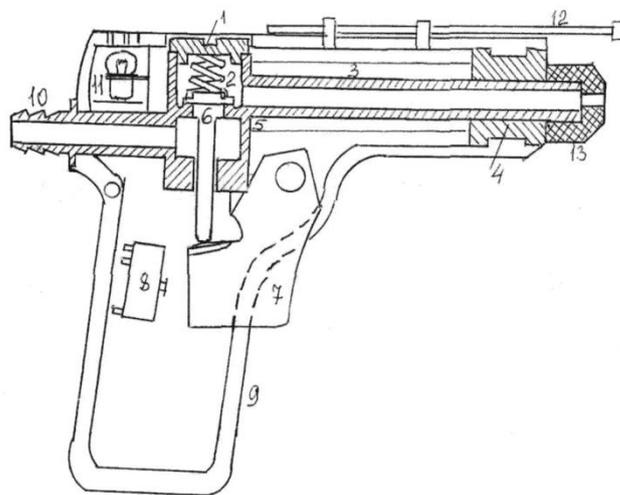


Рис. 3. Эскиз ручного переносного инструмента типа «пистолет»:

- 1 – регулировочный винт; 2 – пружина; 3 – трубка;
4 – держатель сопла; 5 – цилиндр; 6 – клапан;
7 – курок; 8 – микровыключатель; 9 – рукоятка;
10 – штуцер; 11 – лампочка (индикатор);
12 – ограничитель; 13 – диэлектрическое сопло

На основе анализа и обобщения большого количества экспериментальных данных изучения электрического разряда в газе между твердым анодом и струей жидкости (катод) установлено, что горит многоканальный разряд, характеризующийся следующими параметрами: цвет разряда зависит от природы и концентрации электролита, величины разрядного тока и незначительно зависит от материала твердого электрода; разряд состоит из множества микроразрядов; разряд на поверхности жидкого катода-струи опирается на подвижные точечные пятна, рост тока приводит к увеличению числа микроканалов; устойчивость горения разряда существенно зависит от расхода электролита и диаметра струи жидкости; происходит интенсивный локальный плазменно-электролитный нагрев и эрозия поверхности твердого электрода; нагрев электролитного катода сильно влияет на разряд.

Исследования зависимости плотности тока разряда, горящего между струей электролита (катод) и металлическим анодом, от разрядного тока (рис. 6) показали, что с ростом тока плотность тока на жидком электроде растет линейно.

Проведенные исследования показали, что электрический разряд, горящий между струей электролита и обрабатываемой деталью, можно успешно использовать для технологических целей. С помощью плазмы разряда со струей электролита можно очищать внутренние поверхности трубок, осуществлять прошивку

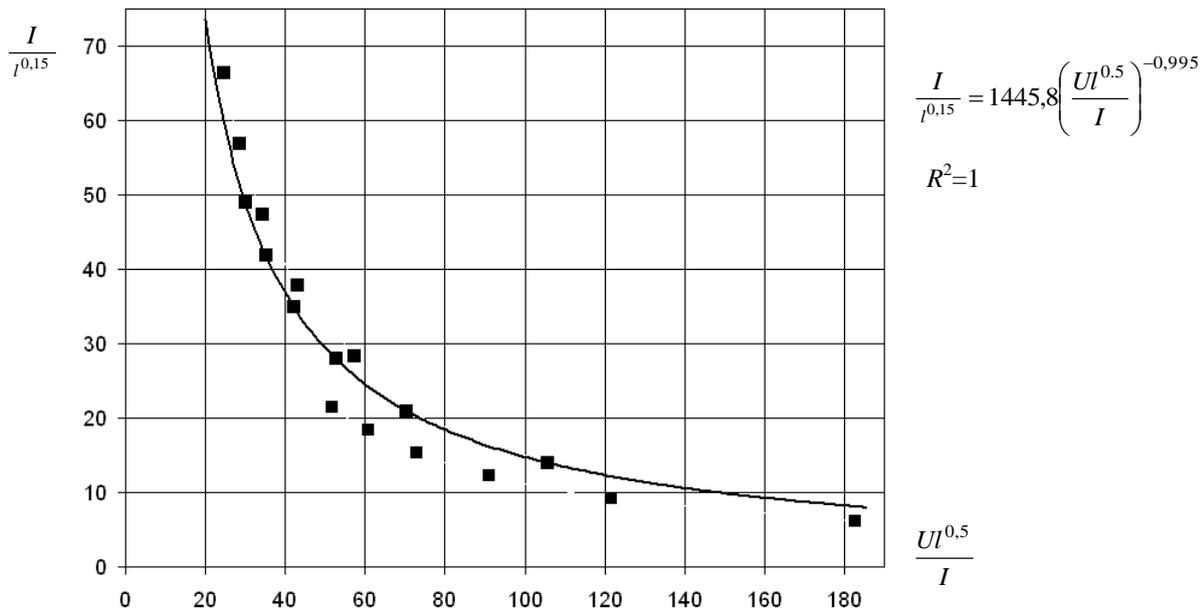


Рис. 4. Обобщенная вольт-амперная характеристика разряда между струей электролита и металлическим электродом

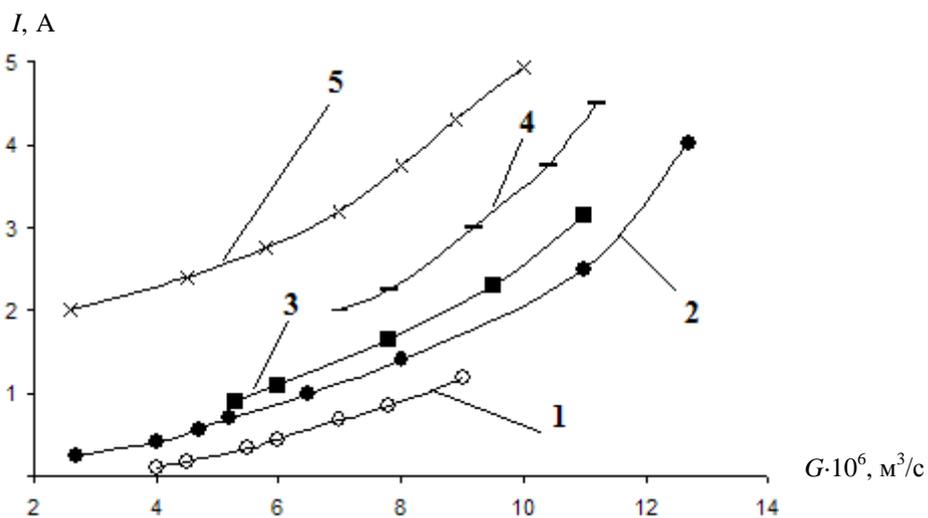


Рис. 5. Зависимость разрядного тока от расхода электролита при атмосферном давлении и различных значениях l :

- 1 – катод – техническая вода, $l=0,018$ м;
- 2 – катод – 10 %-ный раствор NaCl, $l=0,01$ м;
- 3 – катод – 10 %-ный раствор NaCl, $l=0,014$ м;
- 4 – катод – 10 %-ный раствор NaCl, $l=0,022$ м;
- 5 – анод – 10 %-ный раствор $CuSO_4$, $l=0,03$ м

отверстий в металле, резку металла, снятие заусенцев с кромок деталей, выполнять операции маркировки изделий без изменения свойств остальной массы детали.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В предлагаемом процессе, используя плотности тока $j_c=10-30$ А/см², увеличивая время обработки T , можно прошивать отверстия в различных материалах. В таблице 1 приведены некоторые результаты процесса прошивки отверстий в металлах разрядом с жидким катодом из 10 %-го раствора NaCl.

Увеличение плотности тока, т. е. разрядного тока, при неизменном диаметре d наконечника уменьшает длитель-

ность процесса прошивки отверстия. Однако этим путем можно сократить время только до некоторой величины, ибо при дальнейшем росте тока разряд гаснет, и процесс обработки переходит в режим электрохимической обработки (ЭХО) – режим электролиза.

В предлагаемом способе электротермическое воздействие на материал заготовки осуществляет плазма разряда, горящего между струей электролита и заготовкой. Роль электролита сводится в основном к подводу тока и удалению продуктов обработки, определению размера зоны воздействия инструмента – плазмы разряда. При снятии заусенцев высотой до $16 \cdot 10^{-5}$ м разрядом со струей электролита из 20 %-го раствора NaCl

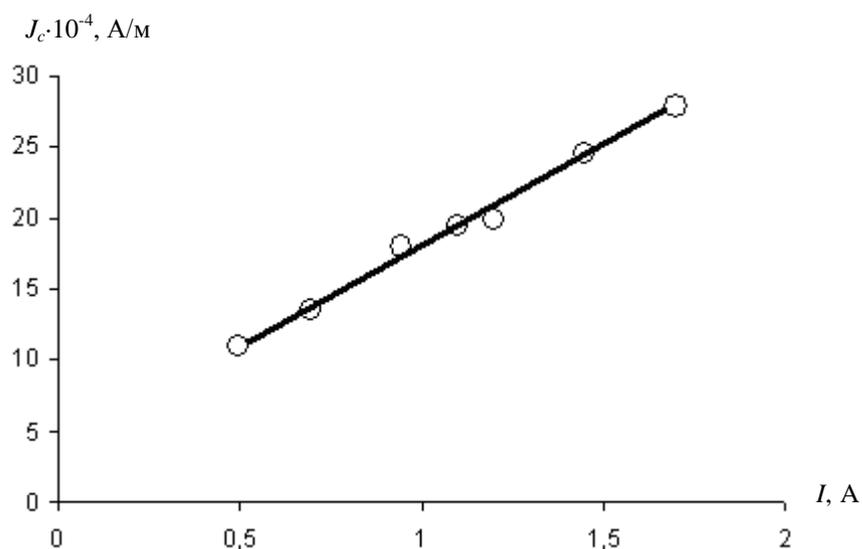


Рис. 6. Зависимость плотности разряда тока между струей электролита и катодом (10 %-й водный раствор NaCl) от величины тока, диаметр струи $d=0,003$ м

Таблица 1. Результаты процесса прошивки отверстий в металлах разрядом с жидким катодом из 10 %-го раствора NaCl

Материал детали	Средний диаметр отверстий, мм	Толщина детали, мм	Ток разряда, А	Время обработки, мин
Медь М1	0,8	1	1,5	1,5
Медь М1	1,8	5	2	7
Сталь 40Х	2,9	4	1,5	15
Титан 48Т2	3	4	2	12,5
Титан 48 Т2	2	50	1,5	20

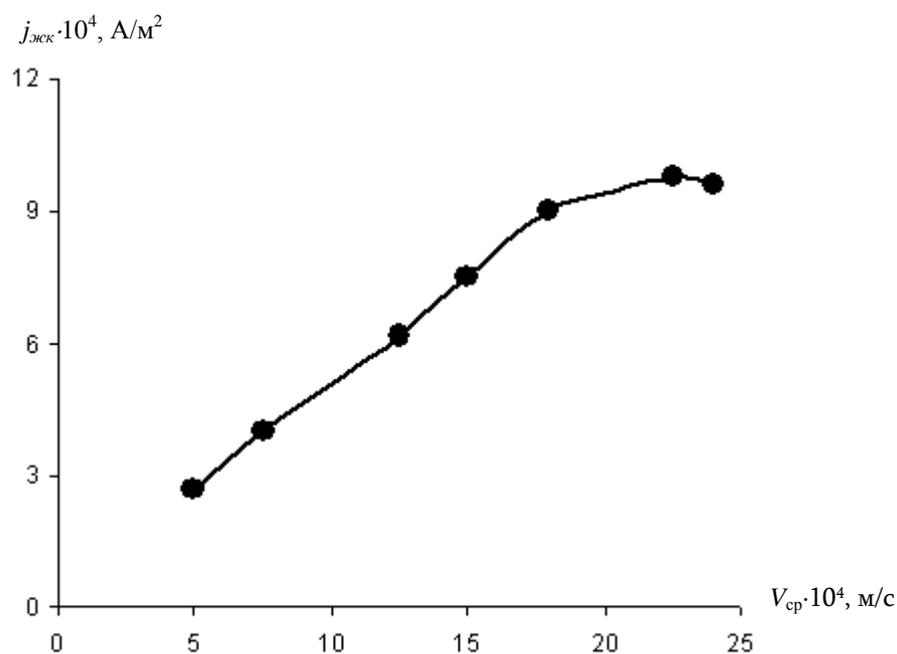


Рис. 7. Зависимость скорости снятия заусенцев от плотности тока на струи электролита при $P=10^5$ Па. Материал – медь марки М1. Струя – катод, 20 %-ный водный раствор NaCl

можно обеспечить скорость снятия заусенцев до 0,01 м/мин. Качество очистки поверхности в значительной мере зависит от величины межэлектродного расстояния – длины струи. Оптимальная длина струи электролита $l=0,005-0,008$ м. Увеличение ее снижает устойчивость разряда, уменьшение вызывает короткое замыкание, сопровождается локальным оплавлением поверхности металла.

Использование плазмы электрического разряда, горящего между струей электролита и заготовкой, позволяет успешно очищать внутренние поверхности трубок (рис. 2 б).

На рис. 7 приведена зависимость скорости снятия заусенцев с кромок медных образцов от плотности тока на струе электролита – катоде. Первоначальная высота заусенцев была до $R_z=32 \cdot 10^{-5}$ м. После обработки плазмой уменьшилась до $1,6 \cdot 10^{-6}$ м. Уменьшение скорости перемещения струи при обработке позволяет улучшать шероховатость поверхности еще на 1-2 класса по ГОСТу 2789-73.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вышеизложенное позволяет сделать заключение, что электрический разряд между жидким электролитом и обрабатываемой деталью может найти свою нишу в технологической цепочке обработки металлических заготовок в современном производстве в операциях фигурной резки твердых и вязких материалов, прошивки отверстий, маркировки деталей, ручной и автоматизированной локальной чистки кромок деталей от заусенцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Немилов Е.Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л.: Машиностроение, 1989. 164 с.
- Применения лазеров / под ред. В.П. Тычинского. М.: Мир, 1974. 445 с.
- Вишницкий А.Л., Ясногородский И.З., Григорчук И.П. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов. Л.: Машиностроение, 1971. 211 с.
- Байсупов И.А. Электрохимическая обработка металлов. 2-е изд. М.: Высш. шк., 1988. 184 с.
- Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
- Левинсон Е.М. Электроэрозионная обработка металлов. Л.: Лениздат, 1964. 184 с.
- Лазаренко Б.Р., Фурсов С.П., Факторович А.А. Коммутация тока на границе металл–электролит. Кишинев: АН МССР, 1971. 74 с.
- Лазаренко Б.Р., Дураджи В.Н., Факторович А.А. Вольтамперные характеристики электрического разряда между металлическим и электролитным электродами // Электронная обработка материалов. 1972. № 3. С. 29–33.
- Hickling A. Electrochemical process in glow discharge at the gas–solution interface // Modern aspects of electrochemistry. Vol. 6. London: Butterworth, 1971. P. 329–373.
- Klemene A. New use of electrical energy for chemical processes (glow discharge electrolysis) // Chimia (Schweiz). 1952. Vol. 6. № 3. P. 177–180.

- Sternberg Z.W. High current glow discharge with electrolyte as cathode // Gas discharges: International conference. London: Inst. Elect. Eng., 1970. P. 68–71.
- Onaka H., Takamatsu T. Discharge with a cathode of electrolyte solution // Hiroshima Daigaku Kogakubu. Kenkyu Hokoku. 1968. Vol. 16. № 2. P. 247–254.
- Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1989. 432 с.
- Иванов И.С. Технология машиностроения. М.: ИНФРА-М, 2009. 192 с.
- Адаскин А.М., Зуев В.М. Материаловедение и технология материалов. М.: Форум, 2010. 336 с.
- Поляков О.В. Физико-химические процессы в водных растворах, инициируемые анодными микроразрядами : дис. ... канд. хим. наук. Кемерово, 1989. 201 с.
- Шакиров Ю.И., Валиев Р.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Многоканальная плазменная установка для обработки материалов // Автомобильная промышленность. 2011. № 2. С. 36–38.
- Garbarz-Olivier J. Interpretation de l'effet de cathode dans les solutions aqueuses de quelques electrolytes // Acad. Sc. Paris. 1972. P. 1359–1362.
- Валиев Р.И., Нуриев И.М., Хафизов А.А., Шакиров Ю.И. Очистка и снятия заусенцев в электрическом разряде парогазовой среде с поверхности деталей после механической обработки. Инженерия верхнего слоя. Познань: КМО ПАН, 2014. 115 с.
- Valiev R.I., Shakirov B.Yu., Shakirov Yu.I. Cleaning of a surface of details in plasma of the volume category between solid and liquid electrodes // Innovative Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Materials–2013. IOP Publishing, 2014. doi: 10.1088/1757-899X/69/1/012043.
- Валиев Р.И., Шакиров Ю.И., Хафизов А.А., Шакирова Г.Ю. Снятие заусенцев после механической обработки с деталей в электрическом разряде с жидким катодом // Образование и наука – производству: сб. трудов междунар. науч.-техн. и образоват. конф. Набережные Челны: ИНЭКА, 2010. С. 192–195.
- Смирнов Н.С., Простаков М.Е. Очистка поверхности стали. М.: Металлургия, 1978. 230 с.
- Лакомский В.И., Арсеньев В.А., Морозов А.П. Электроразрядная очистка катанки // Теплотехнические вопросы применения вопросы низкотемпературной плазмы в металлургии. Свердловск: УПИ, 1985. С. 102–108.
- Любомудров С.А., Смирнов А.А., Тарасов С.Б. Метрология, стандартизация и сертификация: нормирование точности. М.: Инфра-М, 2012. 206 с.

REFERENCES

- Nemilov E.F. *Spravochnik po elektroerozionnoj obrabotke materialov* [Reference book on electric erosion machining of materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 164 p.
- Tychinsky V.P., ed. *Primeneniya lazerov* [Application of lasers]. Moscow, Mir Publ., 1974, 445 p.
- Vishnitsky A.L., Yasnogorodsky I.Z., Grigorochuk I.P. *Elektrokhimicheskaya i elektromekhanicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical and electromechanical processing of metals]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971, 211 p.

- chanical machining of materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971, 211 p.
4. Baysupov I.A. *Elektrokhimicheskaya obrabotka metallov* [Electrochemical machining of metals]. 2nd ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1988, 184 p.
 5. Rykalin N.N., Uglov A.A., Zuev I.V., Kokora A.N. *Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov* [Laser and electron-beam machining of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 496 p.
 6. Levinson E.M. *Elektroerozionnaya obrabotka metallov* [Electric erosion machining of metals]. Leningrad, Lenizdat Publ., 1964, 184 p.
 7. Lazarenko B.R., Fursov S.P., Faktorovich A.A. *Kommutatsiya toka na granitse metall–elektrolit* [Current transfer on the metal-electrolyte borderline]. Kishinev, AN MSSR Publ., 1971, 74 p.
 8. Lazarenko B.R., Duradzi V.N., Faktorovich A.A. Current-voltage characteristics of electric discharge between metal and electrolyte electrodes. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1972, no. 3, pp. 29–33.
 9. Hickling A. Electrochemical process in glow discharge at the gas–solution interface. *Modern aspects of electrochemistry*. Vol. 6. London, Butterworth, 1971, pp. 329–373.
 10. Klemene A. New use of electrical energy for chemical processes (glow discharge electrolysis). *Chimia (Schweiz)*, 1952, vol. 6, no. 3, pp. 177–180.
 11. Sternberg Z.W. High current glow discharge with electrolyte as cathode. *Gas discharges: International conference*. London, Inst. Elect. Eng., 1970, pp. 68–71.
 12. Onaka H., Takamatsu T. Discharge with a cathode of electrolyte solution. *Hiroshima Daigaku Kogakubu. Kenkyu Hokoku*, 1968, vol. 16, no. 2, pp. 247–254.
 13. Gaysin F.M., Son E.E. *Elektrofizicheskie protsessy v razryadakh s tverdymi i zhidkimi elektrodami* [Electro-physical processes in discharges with solid and electrolytic electrodes]. Sverdlovsk, Uralsky universitet Publ., 1989, 432 p.
 14. Ivanov I.S. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Manufacturing engineering]. Moscow, INFRA-M Publ., 2009, 192 p.
 15. Adaskin A.M., Zuev V.M. *Materialovedenie i tekhnologiya materialov* [Materials science and materials technology]. Moscow, Forum Publ., 2010, 336 p.
 16. Polyakov O.V. *Fiziko-khimicheskie protsessy v vodnykh rastvorakh, initsiirovanye anodnymi mikroarazryadami*. Diss. kand. khim. nauk [Physico-chemical processes in anode microdischarges-initiated aqua solutions]. Kemerovo, 1989, 201 p.
 17. Shakirov Y.I., Valiev R.I., Hafizov A.A., Shakirova Y.G. Multi-channel plasma apparatus for processing of materials. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2011, no. 2, pp. 36–38.
 18. Garbarz-Olivier J. Interpretation de l'effet de cathode dans les solutions aqueuses de quelques electrolytes. *Acad. Sc. Paris*, 1972, pp. 1359–1362.
 19. Valiev R.I., Nuriev I.M., Khafizov A.A., Shakirov Yu.I. *Ochistka i snyatiya zausentsev v elektricheskom razryade parogazovoy srede s poverkhnosti detaley posle mekhanicheskoy obrabotki. Inzheneriya verkhnego sloya* [Cleaning and deburring of parts surface in electrical discharge of vapour-gas medium after mechanical processing. Uppermost layer engineering]. Poznan', KMO PAN Publ., 2014, 115 p.
 20. Valiev R.I., Shakirov B.Yu., Shakirov Yu.I. Cleaning of a surface of details in plasma of the volume category between solid and liquid electrodes. *Innovative Mechanical Engineering Technologies, Equipment and Materials–2013*. IOP Publishing, 2014. doi: 10.1088/1757-899X/69/1/012043.
 21. Valiev R.I., Shakirov Yu.I., Khafizov A.A., Shakirova G.Yu. Deburring of parts in electrical discharge with liquid cathode after mechanical processing. *Sbornik trudov mezhdunar. nauch.-tekhn. i obrazovat. konf. "Obrazovanie i nauka – proizvodstvu"*. Naberezhnie Chelny, INEKA Publ., 2010, pp. 192–195.
 22. Smirnov N.S., Prostakov M.E. *Ochistka poverkhnosti stali* [Steel surface cleaning]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978, 230 p.
 23. Lakomsky V.I., Arsenyev V.A., Morozov A.P. Electrodischarge cleaning of rolled wire. *Teplotekhnicheskie voprosy primeneniya nizkotemperaturnoy plazmy v metallurgii*. Sverdlovsk, UPI Publ., 1985, pp. 102–108.
 24. Lyubomudrov S.A., Smirnov A.A., Tarasov S.B. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya: normirovanie tochnosti* [Metrology, standardization and certification: accuracy norms setting]. Moscow, Infra-M Publ., 2012, 206 p.

PIERCING AND DEBURRING OF METAL PARTS USING ELECTRIC DISCHARGE BETWEEN ELECTROLYTE JET AND SOLID ELECTRODE

© 2015

Yu.I. Shakirov, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Chair “Power and electrical engineering”

R.I. Valiev, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”

A.A. Khafizov, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”

A.N. Sushchikova, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”

I.M. Nuriev, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Power and electrical engineering”

Naberezhnye Chelny Institute, Branch of Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny (Russia)

Keywords: piercing; deburring; plasma; parts marking.

Abstract: There are various methods of piercing. The authors suggest using the process of metal piercing with the help of electric discharge between the electrolyte jet and the solid electrode, or the processed part. The electric discharge between the electrolytic electrode and the processed part can be used both for piercing and for deburring, surface cleaning, metal cutting, and parts marking. To investigate the current-voltage characteristic, the dependence of discharge current on volume electrolyte velocity, and the dependence of current density between the electrolyte jet, the authors developed the portable hand-held tool of “gun” type. The study showed that the discharge between the electrolyte jet and the processed part strikes and burns at $U=510-515$ V. When the discharge changes to the electrolysis mode, the current increases in 1.5–2 times. With the increase of volume electrolyte velocity the discharge current grows. The study of the dependence of discharge current density between the electrolyte jet and metal anode on the discharge current showed that with the increase of current the density of current on the electrolytic electrode grows in a linear function. The analysis and synthesis of a large number of experimental data proved that the electrical discharge can be used for engineering purposes. Using the plasma of discharge with electrolyte jet it is possible to perform such operations as the tubes inner surfaces cleaning, metal piercing, metal cutting, deburring of parts edges, and product marking without changing the properties of the rest mass of a part.

НАШИ АВТОРЫ

Абдуразаков Рустам Магомедович, сотрудник Академии ФСО России.

Адрес: Академия Федеральной службы охраны России, 302034, г. Орел, ул. Приборостроительная, д. 35.

E-mail: 05_4us@mail.ru

Адамко Мария Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Теория и методика преподавания иностранных языков и культур».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89277702186

E-mail: hmavv@rambler.ru

Алексеев Николай Сергеевич, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-04

E-mail: nik.al090@yandex.ru

Андреев Степан Алексеевич, инженер.

Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Российская Федерация, Ульяновская область, г. Димитровград-10.

Тел.: (84235) 6-50-77

E-mail: stepan-alekseevich@mail.ru

Артамонова Галина Владиславовна, кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой «Теория и методика преподавания иностранных языков и культур».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89198143475

E-mail: gartamonova_tsu@mail.ru

Архипов Павел Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Братский государственный университет, 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40.

Тел.: (3953) 32-53-97

E-mail: pavded@yandex.ru

Балашова Валентина Федоровна, доктор педагогических наук, доцент.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 54-64-05

E-mail: balashova.valent@mail.ru

Безъязычный Вячеслав Феокистович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, заведующий кафедрой «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения».

Адрес: Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, 152934, Россия, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.

Тел.: (4855) 22-20-91

E-mail: root@rsatu.ru

Белогай Ксения Николаевна, кандидат психологических наук, доцент кафедры «Общая психология и психология развития».

Адрес: Кемеровский государственный университет, 650043, Россия г. Кемерово, ул. Красная, 6.

Тел.: (3842) 58-81-92

E-mail: belogi@mail.ru

Бокова Лариса Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 525-345, 89042415538

E-mail: bokovalg@mail.ru

Борисенко Юлия Вячеславовна, кандидат психологических наук, доцент кафедры «Общая психология и психология развития».

Адрес: Кемеровский государственный университет, 650043, Россия г. Кемерово, ул. Красная, 6.

Тел.: (3842) 58-81-92

E-mail: evseenkova@mail.ru

Бочкарев Петр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование технических и технологических комплексов».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-25, 89272213640

E-mail: bpy@sstu.ru

Бурцева Ксения Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент, докторант кафедры «Аудит и контроль».

Адрес: Финансовый Университет при Правительстве Российской Федерации, 125993, Россия, г. Москва, Ленинградский пр-т, 49.

Тел.: 89272685552

E-mail: aksentiya@mail.ru

Валиев Рамиль Ильдарович, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Адрес: Набережночелнинский институт, филиал Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, пр-т Мира, 68/19.

Тел.: (8917) 857-32-77

E-mail: rivaliev87@mail.ru

Васильева Ирина Павловна, аспирант кафедры «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении».

Адрес: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Тел.: 89277092243

E-mail: wlada98@mail.ru

Васильева Татьяна Сергеевна, аспирант кафедры «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении».

Адрес: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Тел.: 89270071879

E-mail: tanyavsv@rambler.ru

Веткасов Николай Иванович, доктор технических наук, заведующий кафедрой, профессор кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, ул. Энгельса, д. 3.

Тел.: +79603669346

E-mail: nppwt@ulstu.ru

Газизулина Альбина Юсуповна, аспирант кафедры «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении».

Адрес: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Тел.: 89276568545

E-mail: albinagazizulina@gmail.com

Глухова Людмила Владимировна, доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры «Менеджмент организации».

Адрес: Волжский университет имени В.Н. Татищева, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Ленинградская, 16.

Тел.: 89297155011

E-mail: prof.glv@ya.ru

Горбунов Юрий Иванович, доктор филологических наук, профессор кафедры «Теория и практика перевода».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89061291418

E-mail: yourigorbounov@tltsu.ru

Гордеев Алексей Анатолиевич, инженер научно-исследовательского сектора.

Адрес: Хмельницкий национальный университет, 2900, Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

Гордеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-92-85

E-mail: rsi-tgu@tltsu.ru; shura_37@mail.ru

Гордеев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Хмельницкий национальный университет, 2900, Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

E-mail: aigordeev54@mail.ru

Горина Лариса Николаевна, доктор педагогических наук, профессор, заведующий 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

Гусев Антон Валерьевич, инженер кафедры «Технологии машиностроения».

Адрес: Новоуральский технологический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 624130, Россия, Свердловская область, г. Новоуральск, ул. Ленина, 85.

Тел.: 89089103768

E-mail: Antosha21@list.ru

Дементьев Сергей Геннадьевич, аспирант кафедры «Производство летательных аппаратов и управление качеством в машиностроении».

Адрес: Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

Тел.: (846) 267-44-62

E-mail: departmentpla@gmail.com

Жукова Елена Игоревна, доцент кафедры «Физическое воспитание и спорт».

Адрес: Самарский государственный университет путей сообщения, 443548, г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18.

Тел.: 89649910980

E-mail: zhukova_ei@mail.ru

Жуковский Владимир Петрович, доктор педагогических наук, профессор

Адрес: Саратовский областной институт развития образования, 410010, Саратов, ул. Артиллерийская, д. 23, кв. 24.

Жуковская Нина Александровна, кандидат педагогических наук.

Адрес: Саратовский областной институт развития образования, 410010, Саратов, ул. Артиллерийская, д. 23, кв. 24.

Закураев Виктор Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения».

Адрес: Новоуральский технологический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 624130, Россия, Свердловская область, г. Новоуральск, ул. Ленина, 85.

Тел.: 8(34370)93746

E-mail: tm@nsti.ru

Ильин Владимир Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Адрес: Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, проспект Мира, 68/19.

Тел.: +7(903) 319-51-77

Калинин Олег Игоревич, преподаватель 40-й кафедры (дальневосточных языков) факультета иностранных языков.

Адрес: Военный университет, 125047, Россия, г. Москва, ул. Б. Садовая, 14.

Тел.: 8(926)176-18-18

E-mail: kallini4@yandex.ru

Каплин Александр Васильевич, инженер.

Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Российская Федерация, Ульяновская область, г. Димитровград-10.

Тел.: (84235) 6-50-77

E-mail: kaplinAV@yandex.ru

Кармалита Анатолий Константинович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Машины и аппараты».

Адрес: Хмельницкий национальный университет, 2900, Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, директор центра мониторинга науки и образования.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Тел.: 89272057585

E-mail: y.kloch@gmail.com

Клочкова Елена Сергеевна, кандидат филологических наук, доцент Гуманитарного института.

Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Тел.: 89171191446

E-mail: samarienne@ya.ru

Ковальский Сергей Петрович, кандидат технических наук, сотрудник Академии ФСО России.

Адрес: Академия Федеральной службы охраны России, 302034, г. Орел, ул. Приборостроительная, д. 35.

Тел.: (4862) 54-99-12

Ковтунов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-04

E-mail: akovtunov@rambler.ru

Кондратьев Юрий Алексеевич, магистр богословия, аспирант кафедры «Библистика».

Адрес: Санкт-Петербургская Православная Духовная Академия, 191167, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, 17.

Тел.: 89062628090

E-mail: yurak@mail.ru

Коростелев Александр Алексеевич, доктор педагогических наук, профессор кафедры «Педагогика и методики преподавания».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Фрунзе, 2г.

Тел.: (8482) 53-95-75

E-mail: kaa1612@yandex.ru

Крапивкина Ольга Александровна, кандидат филологических наук, доцент кафедры «Иностранные языки».

Адрес: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Тел.: +3952405203

E-mail: koa1504@mail.ru

Краснов Александр Валентинович, кандидат технических 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: kaw@narod.ru

Кумейко Дарья Сергеевна, ассистент кафедры «Социальные технологии».

Адрес: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Россия, г. Белгород, улица Победы, 85.

Тел.: +79038873911

E-mail: volokhatykh@bsu.edu.ru

Ларшин Василий Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения».
Адрес: Одесский национальный политехнический университет, 65044, Украина, г. Одесса, пр. Шевченко, 1.
Тел.: 0487-85-83-24
E-mail: vplarshin@rambler.ru

Лищенко Наталия Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и материаловедение».
Адрес: Одесская национальная академия пищевых технологий, 65039, Украина, г. Одесса, ул. Канатная, 112.
Тел.: 0482-63-33-67
E-mail: odmnv@rambler.ru

Лобанов Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения».
Адрес: Братский государственный университет, 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40.
Тел.: (3953) 32-53-97
E-mail: mf_nauka@brstu.ru

Мазур Николай Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения».
Адрес: Хмельницкий национальный университет, 29016, Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.
Тел.: (3803822) 2-22-99
E-mail: mazurnp@hotmail.com

Мирошниченко Геннадий Владимирович, инженер.
Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Российская Федерация, Ульяновская область, г. Димитровград-10.
Тел.: (84235) 6-50-77
E-mail: niiar2015@yandex.ru

Морозова Ирина Станиславовна, доктор психологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая психология и психология развития».
Адрес: Кемеровский государственный университет, 650043, Россия г. Кемерово, ул. Красная, 6.
Тел.: (3842) 58-81-92
E-mail: ishmorozova@ya.ru

Моторная Светлана Евгеньевна, доктор психологических наук, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Общая и прикладная психология и педагогика».
Адрес: Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.
E-mail: motornaya@ukr.net

Наседкина Анна Владимировна, аспирант кафедры «Педагогика и психология».
Адрес: Самарский государственный институт культуры, 443010, Россия, Самарская область, г. Самара, ул. Фрунзе, 167.
Тел.: 89277726055
E-mail: anna_kostina87@mail.ru

Ничков Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты».
Адрес: Уральский Федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.
Тел.: 8(34370)93746
E-mail: tm@nsti.ru

Нуриев Илсур Мухтарович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика и электротехника».
Адрес: Набережночелнинский институт, филиал Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, пр-т Мира, 68/19.
Тел.: (8917) 256-41-92
E-mail: ilsur_nuriev@list.ru

Отт Татьяна Олеговна, кандидат психологических наук, доцент кафедры «Общая психология и психология развития».
Адрес: Кемеровский государственный университет, 650043, Россия г. Кемерово, ул. Красная, 6.
Тел.: (3842) 58-81-92
E-mail: olegovna5555@yandex.ru

Ошанова Екатерина Сергеевна, старший преподаватель кафедры «Научно-технический перевод и межкультурная коммуникация».

Адрес: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7.

Тел.: 89128570784

E-mail: oshanova_katja@mail.ru

Петухов Александр Юрьевич, кандидат политических наук, руководитель Научно-исследовательского центра «Моделирование социальных и политических процессов», доцент кафедры «История и теория международных отношений».

Адрес: Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, 603950, Россия, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23.

Тел.: +7 920 0296706

E-mail: Lectorr@yandex.ru

Плахова Ольга Александровна, доктор филологических наук, доцент, профессор кафедры «Теория и методика преподавания иностранных языков и культур».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 16 в.

Тел.: (8482) 53-92-93

E-mail: plahova_oa@mail.ru

Плахотный Денис Иванович, аспирант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-04

E-mail: d01125@mail.ru

Расторгуев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 51-47-62

E-mail: Rast_73@mail.ru

Рукоусев Денис Александрович, тренер-преподаватель.

Адрес: Детско-юношеская спортивная школа № 5, 660075, Россия, Красноярский край, г. Красноярск, Озерная, 30/1.

Тел.: 89029408527

E-mail: A1772@mail.ru

Рябинова Елена Николаевна, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры «Высшая математика и прикладная информатика».

Адрес: Самарский государственный технический университет, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Тел.: 89272635190

E-mail: eryabinova@mail.ru

Сайридинов Сайридин Шахобович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедр «Теплогазоснабжение и вентиляция, водоснабжение и водоотведение», «Энергетические машины и системы управления».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89871544791

E-mail: mrsso@yandex.ru

Саламин Евгений Евгеньевич, старший преподаватель кафедры «Физическое воспитание».

Адрес: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27.

Сапунов Валерий Викторович, ассистент кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: (8422) 41-80-16

E-mail: valera-s395@mail.ru

Семенов Кирилл Олегович, магистрант кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

E-mail: semen-tgu@yandex.ru

Сердюков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией.

Адрес: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1.

E-mail: wis24@yandex.ru

Сердюкова Наталья Александровна, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры «Финансы и цены».

Адрес: Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 117997, Россия, г. Москва, Стремянный пер., 36.

E-mail: nsns25@yandex.ru

Силин Радомир Иванович, доктор технических наук, профессор, советник ректора.

Адрес: Хмельницкий национальный университет, 2900, Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

Симутова Ольга Петровна, кандидат филологических наук, доцент кафедры «Немецкая филология и методика преподавания немецкого языка».

Адрес: Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13.

Тел.: 8 (3532) 37-24-34

E-mail: simutova-o@rambler.ru

Степанов Аполлон Владимирович, инженер-программист кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, ул. Энгельса, д. 3.

Тел.: +79508822448

E-mail: monster_2004@mail.ru

Сущикова Анастасия Николаевна, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Адрес: Набережночелнинский институт, филиал Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, пр-т Мира, 68/19.

Тел.: (927) 462-12-72

E-mail: nastyasn82@mail.ru

Сыротюк Светлана Дмитриевна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры «Менеджмент организации», докторант.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-95-93

E-mail: sirotyk_sd@mail.ru

Табаккин Евгений Мордухович, кандидат технических наук.

Адрес: Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Российская Федерация, Ульяновская область, г. Димитровград-10.

Тел.: (84235) 6-57-60

E-mail: niar2015@yandex.ru

Танасов Олег Викторович, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-04

Татарничева Светлана Николаевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Теория и методика преподавания иностранных языков и культур».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 89171227927

E-mail: alyeparusa08@mail.ru

Тимергалиев Самат Низамутдинович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика».

Адрес: Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, проспект Мира, 68/19.

Тел.: +7 (917) 2842645

E-mail: samat_tim@mail.ru

Третько Виталий Витальевич, доктор педагогических наук, доцент, декан факультета «Международные отношения».

Адрес: Хмельницкий национальный университет, 2900, Украина, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

E-mail: tretko@rambler.ru

Ульянов Максим Александрович, аспирант кафедры «Журналистика».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 8 (917) 977-81-97

E-mail: maxulianov@gmail.com

Урунова Раиса Джавхаровна, доктор филологических наук, профессор кафедры «Журналистика и филология».

Адрес: Ульяновский государственный университет, 432017, Россия, Ульяновская область, г. Ульяновск, улица Л. Толстого, 42.

Тел.: (432) 30-19-42

E-mail: fkiulsu@mail.ru

Фесина Михаил Ильич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 54-63-63

E-mail: Michailfes@yandex.ru

Хафизов Алмаз Анзяпович, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и электротехника».

Адрес: Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, проспект Мира, 68/19.

Тел.: +7(917) 868-57-77

E-mail: almazok75@yandex.ru

Худобин Леонид Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: (8422) 41-82-47

E-mail: kafedra_tm@ulstu.ru

Шакиров Юнус Идрисович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетика и электротехника».

Адрес: Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, 423800, Россия, г. Набережные Челны, проспект Мира, 68/19.

Тел.: +7(917) 394-46-40

E-mail: inekashakirov@mail.ru

Шидловская Ирина Александровна, кандидат филологических наук, старший преподаватель кафедры «Немецкая филология и методика преподавания немецкого языка».

Адрес: Оренбургский государственный университет, 460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13.

Тел.: 8 (3532) 37-24-34

E-mail: schidlowskaja@rambler.ru

Шутова Елена Николаевна, магистрант кафедры «Управление промышленной и экологической безопасностью».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 54-63-63

E-mail: Safety@tltsu.ru

Щеглова Дарья Валерьевна, аспирант кафедры «Социальная философия».

Адрес: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1.

Тел.: +79185142526

E-mail: honour777@yandex.ru

Якубова Наталья Михайловна, ассистент кафедры «Иностранные языки».

Адрес: Амурский государственный университет, 675027, Амурская область, г. Благовещенск, Игнатьевское шоссе, д. 21.

E-mail: lev555@rambler.ru

Янюшкин Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения».

Адрес: Братский государственный университет, 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40.

Тел.: (3953) 32-53-60

E-mail: yanyushkin@brstu.ru

OUR AUTHORS

Abdurazakov Rustam Magomedovich, member of the Academy of Russian Federal Protective Service.
Address: Academy of Russian Federal Protective Service, 302034, Orel, Priborostroitel'naya Street, 35.
E-mail: 05_4us@mail.ru

Adamko Mariya Aleksandrovna, PhD (Pedagogy), assistant professor of Chair "Theory and Methodology of Teaching Foreign Languages and Culture".
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 89277702186
E-mail: hmavv@rambler.ru

Alekseev Nikolay Sergeevich, graduate student of Chair "Welding, pressure materials treatment and related processes".
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-91-04
E-mail: nik.al090@yandex.ru

Andreev Stepan Alekseevich, engineer.
Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russian Federation, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad-10.
Tel.: (84235) 6-50-77
E-mail: stepan-alekseevich@mail.ru

Arkhipov Pavel Vladimirovich, Ph.D. (Engineering), assistant professor of Chair "Mechanical Engineering".
Address: Bratsk State University, 665709, Russia, Bratsk, Makarenko Street, 40.
Tel.: (3953) 32-53-97
E-mail: pavded@yandex.ru

Artamonova Galina Vladislavovna, PhD (Pedagogy), Associate Professor, Head of Chair "Theory and Methodology of Teaching Foreign Languages and Cultures".
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 89198143475
E-mail: gartamonova_tsu@mail.ru

Balashova Valentina Fedorovna, Doctor of Sciences (Pedagogy), Associate Professor.
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 54-64-05
E-mail: balashova.valent@mail.ru

Bochkarev Petr Yurievich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair "Development of engineering and technological complexes".
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77
Tel.: (8452) 99-86-25, 89272213640
E-mail: bpy@sstu.ru

Belogay Kseniya Nikolaevna, PhD (Psychology), assistant professor of Chair "General Psychology and Developmental Psychology".
Address: Kemerovo State University, 650043, Russia, Kemerovo, Krasnaya Street, 6.
Tel.: (3842) 58-81-92
E-mail: belogi@mail.ru

Bezyazychny Vyacheslav Feoktistovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Honoured master of sciences and engineering of the Russian Federation, Head of Chair "Technology of aero engines and general engineering".
Address: Solov'yev Rybinsk State Aviation Technical University, 152934, Russia, Yaroslavl region, Rybinsk, Pushkin Street, 53.
Tel.: (4855) 22-20-91
E-mail: root@rsatu.ru

Bokova Larisa Gennadyevna, PhD (Engineering), assistant professor of Chair "Development of engineering and technological complexes".
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.
Tel.: (8452) 525-345, 89042415538
E-mail: bokovalg@mail.ru

Borisenko Yulia Vyatcheslavovna, PhD (Psychology), assistant professor of Chair “General Psychology and Developmental Psychology”.

Address: Kemerovo State University, 650043, Russia, Kemerovo, Krasnaya Street, 6.

Tel.: (3842) 58-81-92

E-mail: evseenkova@mail.ru

Burtseva Kseniya Yurievna, PhD (Economics), Associate Professor, doctoral candidate of Chair “Audit and Control”.

Address: Financial University under the Government of the Russian Federation, 125993, Russia, Moscow, Leningradski Prospect, 49.

Tel.: 89272685552

E-mail: aksentiya@mail.ru

Dementyev Sergey Gennadyevich, postgraduate student of Chair “Aircraft construction and quality management in mechanical engineering”

Address: S.P. Korolev Samara state aerospace university (national research university), 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.

Tel.: 8 (846) 267-44-62

E-mail: departmentpla@gmail.com

Fesina Mikhail Il'ich, PhD (Engineering), Professor of Chair “Management of industrial and environmental safety”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 54-63-63

E-mail: Michailfes@yandex.ru

Gazizulina Albina Yusupovna, postgraduate student of Chair “Aircraft construction and quality management in mechanical engineering”

Address: S.P. Korolev Samara state aerospace university (national research university), 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.

Tel.: 89276568545

E-mail: albinagazizulina@gmail.com

Glukhova Ludmila Vladimirovna, Doctor of Sciences (Economics), Professor, professor of Chair “Management of Organization”.

Address: V.N. Tatishchev Volzhsky University, 445020, Russia, Togliatti, Leningradskaya Street, 16.

Tel.: 89297155011

E-mail: prof.glv@ya.ru

Gorbunov Yuriy Ivanovich, PhD in Linguistics, Professor of the “Theory and Translation practice” Department.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89061291418

E-mail: yourigorbounov@tltsu.ru

Gordeev Aleksey Anatolievich, engineer of scientific research department.

Address: Khmelnytskyi National University, 2900, Ukraine, Khmelnytskyi, Institutskaya Street, 11.

Gordeev Anatoliy Ivanovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor of Chair “Engineering technology”.

Address: Khmelnytskyi National University, 2900, Ukraine, Khmelnytskyi, Institutskaya Street, 11.

E-mail: aigordeev54@mail.ru

Gordeev Aleksandr Vladimirovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Mechanical engineering equipment and technologies”.

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 Larisa Nikolaevna, Doctor of Sciences (Pedagogy), Professor, Head of Chair “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

Gusev Anton Valerievich, engineer of Chair “Technologies of mechanical engineering”.

Address: Novouralsk institute of technology, branch of National Research Nuclear University “MEPhI”, 624130, Russia, Sverdlovsk region, Novouralsk, Lenin Street, 85.

Tel.: 89089103768

E-mail: Antosha21@list.ru

Ilyin Vladimir Ivanovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Power and electrical engineering”.

Address: Branch of Kazan (Volga Region) Federal University in Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospekt Mira, 68/19.

Tel.: +7(903) 319-51-77

Kalinin Oleg Igorevich, lecturer of the 40th Chair (Far-Eastern languages), Foreign Languages Department.

Address: Federal national government military school of higher professional education “Military University”, 125047, Russia, Moscow, Bolshaya Sadovaya Street, 14.

Tel.: 8(926)176-18-18

E-mail: kallini4@yandex.ru

Kaplin Alexander Vasilievich, engineer.

Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russian Federation, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad-10.

Tel.: (84235) 6-50-77

E-mail: kaplinAV@yandex.ru

Karmalita Anatoliy Konstantinovich, PhD (Engineering), Professor, Professor of Chair “Machines and apparatus”.

Address: Khmelnytskyi National University, 2900, Ukraine, Khmelnytskyi, Institutskaya Street, 11.

Khafizov Almaz Anzyapovich, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”.

Address: Branch of Kazan (Volga Region) Federal University in Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospekt Mira, 68/19.

Tel.: +7(917) 868-57-77

E-mail: almazok75@yandex.ru

Khudobin Leonid Viktorovich, Doctor of Engineering, Professor of the Department «Technology of machine building».

Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.

Tel.: (8422) 41-82-47

E-mail: kafedra_tm@ulstu.ru

Kovalskiy Sergey Petrovich, PhD (Engineering), member of the Academy of Russian Federal Protective Service.

Address: Academy of Russian Federal Protective Service, 302034, Orel, Priborostroitel'naya Street, 35.

Tel.: (4862) 54-99-12

Kovtunov Aleksandr Ivanovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-91-04

E-mail: akovtunov@rambler.ru

Klochkov Yuriy Sergeevich, Doctor of Sciences (Engineering), Director of Monitoring Center for Science and Education.

Address: Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya Street, 29.

Tel.: 89272057585

E-mail: y.kloch@gmail.com

Klochkova Elena Sergeevna, PhD (Philology), Associate Professor of Institute of Humanities

Address: Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, St. Petersburg, Polytechnicheskaya Street, 29.

Tel.: 89171191446

E-mail: samarienne@ya.ru

Kondratiev Yuriy Alekseevich, Master of Theology, postgraduate student of Chair “Biblical Theology”.

Address: St. Petersburg Orthodox Theological Academy, 191167, Russia, St. Petersburg, Naberezhnaya Obvodnogo kanala, 17.

Tel.: 89062628090

E-mail: yurak@mail.ru

Korostelev Aleksandr Alekseyevich, Doctor of Sciences (Pedagogy), Professor of Chair “Pedagogy and Methods of Teaching”.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Frunze Street, 2-g.

Tel.: (8482) 53-95-75

E-mail: kaa1612@yandex.ru

Krapivkina Olga Aleksandrovna, PhD (Philology), Assistant Professor of Chair “Foreign Languages”.

Address: Irkutsk National Research Technical University, 664074, Russia, Irkutsk, Lermontov Street, 83.

Tel.: +3952405203

E-mail: koa1504@mail.ru

Krasnov Alexandr Valentinovich, PhD (Engineering), associate professor of Chair “Management of industrial and environmental safety”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 54-63-63

E-mail: kaw@narod.ru

Kumeyko Daria Sergeevna, assistant of Chair “Social Technologies”.

Address: Belgorod State National Research University, 308015, Russia, Belgorod, Pobedy Street, 85.

Tel.: +79038873911

E-mail: volokhatykh@bsu.edu.ru

Larshin Vasilii Petrovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical engineering technology”.

Address: Odessa National Polytechnic University, 65044, Ukraine, Odessa, Prospekt Shevchenko, 1.

Tel.: 0487-85-83-24

E-mail: vplarshin@rambler.ru

Lishchenko Nataliya Vladimirovna, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Physics and materials sciences”.

Address: Odessa National Academy of Food Technologies, 65039, Ukraine, Odessa, Kanatnaya Street, 112.

Tel.: 0482-63-33-67

E-mail: odmnv@rambler.ru

Lobanov Dmitry Vladimirovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical Engineering”.

Address: Bratsk State University, 665709, Russia, Bratsk, Makarenko Street, 40.

Tel.: (3953) 32-53-97

E-mail: mf_nauka@brstu.ru

Mazur Nikolay Petrovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Mechanical engineering”.

Address: Khmelnytskyi National University, 29016, Ukraine, Khmelnytskyi, Institutskaya Street, 11.

Tel.: (3803822) 2-22-99

E-mail: mazurnp@hotmail.com

Miroshnichenko Gennady Vladimirovich, engineer.

Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russian Federation, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad-10.

Tel.: (84235) 6-50-77

E-mail: niiar2015@yandex.ru

Morozova Irina Stanislavovna, Doctor of Science (Psychology), Professor, Head of Chair “General Psychology and Developmental Psychology”.

Address: Kemerovo State University, 650043, Russia, Kemerovo, Krasnaya Street, 6.

Tel.: (3842) 58-81-92

E-mail: ishmorozova@ya.ru

Motornaya Svetlana Evgenievna, Doctor of Sciences (Psychology), PhD (Pedagogy), Associate Professor, assistant professor of Chair “General and Applied Psychology and Pedagogy”.

Address: Sevastopol State University, 299053, Russia, Sevastopol, Universitetskaya Street, 33.

E-mail: motornaya@ukr.net

Nasedkina Anna Vladimirovna, postgraduate student of Chair “Pedagogy and psychology”.

Address: Samara State Institute of Culture, 443010, Russia, Samara region, Samara, Frunze Street, 167.

Tel.: 89277726055

E-mail: anna_kostina87@mail.ru

Nichkov Aleksandr Grigorievich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Chair “Metal cutting machines and tools”.

Address: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Russia, Ekaterinburg, Mira Street, 19.

Tel.: 8(34370)93746

E-mail: tm@nsti.ru

Nuriev Ilsur Mukhtarovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Power and electrical engineering”.

Address: Naberezhnye Chelny Institute, Branch of Kazan Federal University, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospekt Mira, 68/19.

Tel.: (8917) 256-41-92

E-mail: ilsur_nuriev@list.ru

Oshanova Ekaterina Sergeevna, senior lecturer of Chair “Scientific and Technical Translation and Cross-Cultural Communication”.

Address: Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 426069, Russia, Izhevsk, Studencheskaya Street, 7.

Tel.: 89128570784

E-mail: oshanova_katja@mail.ru

Ott Tatiana Olegovna, PhD (Psychology), assistant professor of Chair “General Psychology and Developmental Psychology”.

Address: Kemerovo State University, 650043, Russia, Kemerovo, Krasnaya Street, 6.

Tel.: (3842) 58-81-92

E-mail: olegovna5555@yandex.ru

Petukhov Alexandr Yurievich, PhD (Political Science), Head of Research Center “Modeling of social and political processes”, assistant professor of Chair “History and International Relations Theory”.

Address: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 603950, Russia, Nizhny Novgorod, Prospekt Gagarina, 23.

Tel.: +7 920 0296706

E-mail: Lectorr@yandex.ru

Plakhotny Denis Ivanovich, postgraduate student of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-91-04

E-mail: d01125@mail.ru

Plakhova Olga Alexandrovna, Doctor of Sciences (Philology), Associate Professor, Professor of Chair “Theory and methods of teaching of foreign languages and cultures”.

Address: Togliatti State University, 445667, Togliatti, Belorusskaya Street, 16B.

Tel.: (8482) 53-92-93

E-mail: plakhova_oa@mail.ru

Rastorguev Dmitriy Aleksandrovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Equipment and technology of engineering manufacture”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 51-47-62

E-mail: Rast_73@mail.ru

Rukosuev Denis Aleksandrovich, coach and teacher.

Address: Children’s and Youth Sports School № 5, 660075, Russia, Krasnoyarsk Krai, Krasnoyarsk, Ozernaya Street, 30/1.

Tel.: 89029408527

E-mail: A1772@mail.ru

Ryabinova Elena Nikolayevna, Doctor of Sciences (Pedagogy), Associate Professor, Professor of the Chair “Higher Mathematics and Applied Informatics”.

Address: Samara State Technical University, 443100, Samara, Molodogvardeiskaya Street, 244.

Tel.: 89272635190

E-mail: eryabinova@mail.ru

Sapunov Valery Viktorovich, assistant of the Department «Technology of machine building».
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
Tel.: (8422) 41-80-16
E-mail: valera-s395@mail.ru

Sayriddinov Sayriddin Shakhobovich, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chairs “Heat and gas-supply and ventilation, water supply and water disposal”, “Energy machines and management systems”.
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 89871544791
E-mail: mrsso@yandex.ru

Shakirov Yunus Idrisovich, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Chair “Power and electrical engineering”.
Address: Branch of Kazan (Volga Region) Federal University in Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospekt Mira, 68/19.
Tel.: +7(917) 394-46-40
E-mail: inekashakirov@mail.ru

Shcheglova Daria Valerievna, post-graduate student of the department «Social Philosophy».
Address: Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, 1.
Tel.: +79185142526
E-mail: honour777@yandex.ru

Shidlovskaya Irina Aleksandrovna, PhD (Philology), senior lecturer of Chair “German Philology and German Language Teaching Methods”.
Address: Orenburg State University, 450018, Russia, Orenburg, Prospekt Pobedy, 13.
Tel.: 8 (3532) 37-24-34
E-mail: schidlovskaja@rambler.ru

Shutova Elena Nikolaevna, graduate student of Chair “Management of industrial and environmental safety”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-36
E-mail: Safety@tltsu.ru

Semenov Kirill Olegovich, graduate student of Chair “Equipment and technology of engineering manufacture”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: semen-tgu@yandex.ru

Serdyukov Vladimir Ivanovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Laboratory.
Address: Bauman Moscow State Technical University, 105005, Russia, Moscow, 2nd Baumanskaya Street, 5/1.
E-mail: wis24@yandex.ru

Serdyukova Natalya Aleksandrovna, Doctor of Sciences (Economics), Associate Professor, Professor of Chair “Finance and Prices”.
Address: Plekhanov Russian University of Economics, 117997, Russia, Moscow, Stremyanny Pereulok, 36.
E-mail: nsns25@yandex.ru

Silin Radomir Ivanovich, Doctor of Science (Engineering), Professor, adviser of rector.
Address: Khmelnytskyi National University, 2900, Ukraine, Khmelnytskyi, Institutskaya Street, 11.

Simutova Olga Petrovna, PhD (Philology), assistant professor of Chair “German Philology and German Language Teaching Methods”.
Address: Orenburg State University, 450018, Russia, Orenburg, Prospekt Pobedy, 13.
Tel.: 8 (3532) 37-24-34
E-mail: simutova-o@rambler.ru

Stepanov Apollon Vladimirovich, programmer engineer of the Department «Technology of machine building».
Address: Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Engels Street, 3.
Tel.: Тел.: +79508822448
E-mail: monster_2004@mail.ru

Sushchikova Anastasiya Nikolaevna, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”.

Address: Naberezhnye Chelny Institute, Branch of Kazan Federal University, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospect Mira, 68/19.

Tel.: (927) 462-12-72

E-mail: nastyasn82@mail.ru

Syrotyuk Svetlana Dmitrievna, PhD (Pedagogy), Associate Professor, assistant professor of Chair “Management of Organization”, doctoral candidate.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-95-93

E-mail: sirotyk_sd@mail.ru

Tabakin Evgeny Mordukhovich, candidate of technical sciences.

Address: State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors, 433510, Russian Federation, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad-10.

Tel.: (84235) 6-57-60

E-mail: niar2015@yandex.ru

Tanasov Oleg Viktorovich, graduate student of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 53-91-04

Tatarnitseva Svetlana Nikolayevna, candidate of pedagogical sciences, associate professor of the department of «Theory and methodology of teaching foreign languages and cultures».

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 89171227927

E-mail: alyeparusa08@mail.ru

Timergaliev Samat Nizamutdinovich, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Chair “Mathematics”.

Address: Branch of Kazan (Volga Region) Federal University in Naberezhnye Chelny, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospekt Mira, 68/19.

Tel.: +7(917) 2842645

E-mail: samat_tim@mail.ru

Tret'ko Vitaliy Vitalievich, Doctor of Science (Pedagogy), Associate Professor, Dean of faculty “International relations”.

Address: Khmelnytskyi National University, 2900, Ukraine, Khmelnytskyi, Institutskaya Street, 11.

E-mail: tretko@rambler.ru

Uliyanov Maksim Aleksandrovich, postgraduate student of Chair “Journalism”.

Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: 8 (917) 977-81-97

E-mail: maxulianov@gmail.com

Urunova Raisa Dzhavharovna, Doctor of Sciences (Philology), Professor of Chair “Journalism and Philology”.

Address: Ulianovsk State University, 432017, Russia, Ulianovsk region, Ulianovsk, L. Tolstoy Street, 42.

Tel.: (432) 30-19-42

E-mail: fkiulsu@mail.ru

Valiev Ramil Ildarovich, senior lecturer of Chair “Power and electrical engineering”.

Address: Naberezhnye Chelny Institute, Branch of Kazan Federal University, 423800, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospect Mira, 68/19.

Tel.: (917) 857-32-77

E-mail: rivaliev87@mail.ru

Vasilyeva Irina Pavlovna, postgraduate student of Chair “Aircraft construction and quality management in mechanical engineering”.

Address: S.P. Korolev Samara state aerospace university (national research university), 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.

Tel.: 89277092243

E-mail: wlada98@mail.ru

Vasilyeva Tatiana Sergeevna, postgraduate student of Chair “Aircraft construction and quality management in mechanical engineering”

Address: S.P. Korolev Samara state aerospace university (national research university), 443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.

Tel.: 89270071879

E-mail: tanyavsv@rambler.ru

Vetkasov Nikolay Ivanovich, Doctor of Engineering, Head of the Department, Professor of the Department «Technology of machine building».

Address: Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Engels Street, 3.

Tel.: +79603669346

E-mail: nppwt@ulstu.ru

Yakubova Natalia Mikhailovna, assistant of the “Foreign Languages” department.

Address: Amur State University, 675027, Amur region, Blagoveshchensk, Ignatievskoye shosse, 21.

E-mail: lev555@rambler.ru

Yanyushkin Aleksander Sergeevich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair “Mechanical Engineering”.

Address: Bratsk State University, 665709, Russia, Bratsk, Makarenko Street, 40.

Tel.: (3953) 32-53-60

E-mail: yanyushkin@brstu.ru

Zakuraev Viktor Vladimirovich, PhD (Engineering), Head of Chair “Technologies of mechanical engineering”.

Address: Novouralsk institute of technology, branch of National Research Nuclear University “MEPhI”, 624130, Russia, Sverdlovsk region, Novouralsk, Lenin Street, 85.

Tel.: 8(34370)93746

E-mail: tm@nsti.ru

Zhukova Elena Igorevna, Assistant Professor of the Chair «Physical Education and Sport».

Address: Samara State University of Railways, 443548, Samara, 1st Bezymianny lane, 18.

Tel.: 89649910980

E-mail: zhukova_ei@mail.ru

Zhukovsky Vladimir Petrovich, Doctor of Sciences (Education), Professor.

Address: Saratov Regional Institute of Education Development, 410010, Saratov, Artilleriyskaya Street, 23, app. 24.

E-mail: vl0971@mail.ru

Zhukovskaya Nina Alexandrovna, Ph.D (Pedagogy).

Address: Saratov Regional Institute of Education Development, 410010, Saratov, Artilleriyskaya Street, 23, app. 24.

E-mail: zhna73@mail.ru