

ВЕКТОР НАУКИ

Тольяттинского государственного университета

Основан в 2008 г.

№ 3 (45)
2018

16+

Ежеквартальный
научный журнал

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего 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

Муранова Екатерина Валентиновна – 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

Ответственный/технический редактор:

Н.А. Никитенко

Адрес редакции: 445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, 14
Тел./факс: (8482) 54-63-64
vektornaukitgu@yandex.ru
<http://www.tltsu.ru>

Подписано в печать 28.09.2018.

Выход в свет 25.12.2018.

Формат 60×84 1/8.

Печать оперативная.

Усл. п. л. 8,5.

Тираж 50 экз. Заказ 3-587-18.

Цена свободная.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти,
ул. Белорусская, 14

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

Кристал Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, ректор Тольяттинского государственного университета (Тольятти, Россия).

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 Гагарина Ю.А. (Саратов, Россия).

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

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

Карпов Михаил Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института физики твердого тела Российской академии наук (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).

Табаков 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 связь 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

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ В ЭЛЕКТРОЛИТ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ SiO₂ НА СОСТАВ И СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ МАГНИЯ Е.Д. Боргардт, А.В. Полунин, П.В.Ивашин, М.М. Криштал.....	6
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКООДНОРОДНОЙ СУХОЙ СМЕСИ «АЛЮМИНИЕВЫЙ ПОРОШОК – ОДНОСТЕННЫЕ УНТ» В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ Н.И. Веткасов, А.И. Капустин, В.В. Сапунов.....	14
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА РЕЖИМЫ РАЗГОНА ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ЕГО ЦЕНТРА МАСС Л.Ю. Ворочаева, С.И. Савин.....	22
ОПЫТНЫЕ ПРОМЫСЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА М.А. Выбойщик, С.А. Князькин.....	31
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СТЕЛЕК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ Н.В. Носов, А.П. Зябочкина.....	38
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОД ШТАМПОВКУ НА СКЛОННОСТЬ К РАСТРЕСКИВАНИЮ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛМцАЖН 59-3,5-2,5-0,5-0,4 А.В. Святкин.....	48
КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗНОСА И РАЗРУШЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН А.С. Селиванов, А.А. Балахнина, И.В. Сорока.....	57
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ТОЧЕНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ ВИБРАЦИЙ А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев.....	63
НАШИ АВТОРЫ.....	70

CONTENT

THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF SiO₂ NANO-DIMENSIONAL PARTICLES TO THE ELECTROLYTE ON THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF THE OXIDE LAYERS FORMED BY THE PLASMA-ELECTROLYTIC OXIDATION ON MAGNESIUM E.D. Borgardt, A.V. Polunin, P.V. Ivashin, M.M. Krishtal.....	6
THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE PROCESS OF PRELIMINARY FORMATION OF THE HIGH-HOMOGENEOUS DRY MIXTURE “ALUMINUM POWDER – SINGLE-WALL CNT” IN THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF THE ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES N.I. Vetkasov, A.I. Kapustin, V.V. Sapunov.....	14
THE STUDY OF INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF MASS CENTER TRAJECTORY OF A JUMPING ROBOT ON ITS ACCELERATION MODES L.Yu. Vorochaeva, S.I. Savin.....	22
PILOT TESTS OF OIL-WELL TUBING M.A. Vyboishchik, S.A. Knyazkin.....	31
COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE PROCESS OF INSOLES DEFORMATION DURING THE USE N.V. Nosov, A.P. Zyabochkina.....	38
THE INFLUENCE OF HEATING TEMPERATURE FOR FORGING ON THE CRACKING TENDENCY OF A Cu-Mn-Al-Fe-Ni 59-3.5-2.5-0.5-0.4 WORKPIECE A.V. Svyatkin.....	48
THE QUALITATIVE ANALYSIS OF SPECIAL ASPECTS OF WEAR AND DESTRUCTION OF TOOLS DURING THE ULTRASONIC BURNISHING OF THE MACHINE PARTS A.S. Selivanov, A.A. Balakhnina, I.V. Soroka.....	57
THE RESEARCH OF A TEMPERATURE FIELD WHEN TURNING WITH VIBRATIONS SUPERPOSITION A.N. Unyanin, P.R. Finageev.....	63
OUR AUTHORS.....	70

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ В ЭЛЕКТРОЛИТ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ SiO_2 НА СОСТАВ И СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ОКСИДИРОВАНИЕМ МАГНИЯ

© 2018

Е.Д. Боргардт, младший научный сотрудник

НИО-4 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий

А.В. Полунин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

НИО-4 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий

П.В. Ивашин, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

НИО-4 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий

М.М. Кристал, доктор физико-математических наук, профессор, ректор

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: плазменно-электролитическое (микродуговое) оксидирование; технически чистый магний; наночастицы; диоксид кремния; оксидный слой; прочность сцепления с подложкой; коррозионная стойкость.

Аннотация: Магний и его сплавы, благодаря сочетанию легкости и прочностных характеристик, представляют интерес для всех сфер промышленности, требовательных к весу изделий, – кораблестроения, авиации, ракетостроения. Однако поверхностные свойства магниевых сплавов не удовлетворяют многим требованиям, и в настоящий момент не существует эффективного метода их улучшения. Перспективным электрохимическим методом методом модифицирования поверхности магниевых сплавов является плазменно-электролитическое оксидирование (ПЭО), но технология получения при его помощи оксидных слоев нуждается в совершенствовании. Одним из путей модифицирования ПЭО-слоев является добавка в электролит наночастиц. Работа посвящена получению оксидных слоев на магнии методом ПЭО с использованием электролита без наночастиц и при добавке наночастиц SiO_2 в электролит. Проведено исследование полученных оксидных слоев методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового анализа, инструментального индентирования и электрохимических испытаний. Исследованы структура, элементный и фазовый состав, прочность сцепления с подложкой и коррозионная стойкость оксидных слоев на магнии.

Показано положительное влияние добавок наночастиц SiO_2 в электролит на исследованные функциональные свойства оксидного слоя – прочность сцепления с подложкой, коррозионную стойкость. Предположен механизм положительного влияния наночастиц на эти характеристики. В составе оксидного слоя обнаружена фаза силиката магния Mg_2SiO_4 , а также фосфат магния $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, что говорит об участии в формировании слоя как компонентов электролита – фосфора, так и внесенных наноразмерных частиц диоксида кремния.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время магниевые сплавы благодаря удельной прочности находят все большее применение в автомобилестроении и аэрокосмической отрасли [1; 2]. Несмотря на ряд очевидных достоинств, существенным недостатком магниевых сплавов является неудовлетворительная коррозионная стойкость в различных средах [3]. Поэтому применение магниевых сплавов в промышленности невозможно без поверхностной обработки, которая бы обеспечивала требуемые характеристики рабочих поверхностей и, главное, коррозионную стойкость [4; 5]. Плазменно-электролитическое (ПЭО), или микродуговое (МДО), оксидирование – один из наиболее перспективных и эффективных способов поверхностного модифицирования изделий из вентильных металлов и их сплавов, в том числе магния [6].

Основным недостатком способа ПЭО применительно к магнию является то, что формируемые оксидные слои, состоящие в основном из оксида магния MgO , не обладают достаточной коррозионной стойкостью. Известно [6], что технология ПЭО позволяет управлять фазовым составом и свойствами оксидных слоев путем изменения состава электролита и введением в него различных веществ в наноразмерном виде. В частности, в работах [7–9] было установлено положительное влияние добавки в электролит наночастиц диоксида кремния SiO_2 при ПЭО алюминиево-кремниевых сплавов. Также введение

незначительной добавки наночастиц SiO_2 в электролит положительно сказалось на морфологии, фазовом составе и, как следствие, физико-механических характеристиках оксидных слоев на силуминах [10]. Положительный эффект от применения микро- и наночастиц SiO_2 в качестве добавки в электролит при ПЭО магния и его сплавов был обнаружен в [11–13].

Однако ввиду особенностей реализации процесса ПЭО с точки зрения электротехнических параметров [13] и применяемых электролитов, в частности силикатных [14], не до конца изученным остался вопрос влияния наночастиц SiO_2 на состав и свойства оксидных слоев, формируемых на переменном токе в наиболее часто применяемых [11; 12] щелочно-фосфатных электролитах. Кроме того, проявление химически инертного или активного механизма в подобных условиях недостаточно исследовано.

Цель работы – выявление закономерностей влияния добавки наночастиц SiO_2 в электролит на морфологию, состав, свойства и коррозионную стойкость оксидных слоев, полученных плазменно-электролитическим оксидированием магниевых сплавов.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ

Оксидные слои получали на плоских образцах ($20 \times 60 \times 6$ мм) из технически чистого магния марки

Mg96 ГОСТ 804-72 (химический состав в % массы: 0,003 % Fe; 0,004 % Si; 0,003 % Mn; 0,004 % Al; 0,002 % Cu; остальное – Mg).

Оксидные слои формировали методом ПЭО в щелочно-фосфатном электролите на основе водного раствора гидроксида натрия NaOH (ГОСТ 4328-77, марка ЧДА, 3 г/л) и двузамещенного фосфорнокислого натрия $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 4172-76, марка Ч, 7 г/л) (базовый электролит). Все реактивы были химической чистоты.

ПЭО проводили в анодно-катодном режиме с частотой тока 50 Гц в течение 30 минут при постоянном формовочном анодном напряжении 500 ± 10 В и соотношении токов в катодном и анодном полупериодах $0,15 \pm 0,05$. Электротехнические параметры поддерживались постоянными на протяжении всего процесса. Температура электролита во время ПЭО поддерживалась постоянной и составляла 293 ± 1 К.

Варьируемым фактором эксперимента являлось наличие/отсутствие добавки наночастиц SiO_2 (n- SiO_2) марки «Таркосил Т130» в электролит. Данные наночастицы рентгеноаморфны [15] и имеют среднюю дисперсность около 20 нм. Предварительный XRD-анализ наноразмерного порошка SiO_2 не выявил в нем каких-либо кристаллических фаз. Концентрация добавки наночастиц SiO_2 в базовый электролит составляла 3 г/л.

Исследовали структуру, элементный и фазовый состав, морфологию поверхности, адгезионно-когезионные показатели и коррозионную стойкость полученных оксидных слоев.

Макроструктура оксидного слоя исследовалась на предмет пористости и трещиноватости методом оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

Содержание и распределение различных химических элементов в оксидном слое исследовалось методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Применялся сканирующий (растровый) автоэмиссионный электронный микроскоп Carl Zeiss Sigma 02-09 с блоком для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа на основе энергоспектрометра EDAX TEAM EDS. Макроструктуру оксидных слоев и распределение элементов в оксидном слое изучали на поперечных шлифах.

Рентгенофазовый анализ оксидных слоев осуществляли на рентгеновском дифрактометре Shimadzu Maxima XRD-7000 по Бреггу-Брентано с фильтрованным CuK_α -излучением по рекомендациям в [16]. Индексирование дифрактограмм проводили при мощности излучения 900 Вт (ток трубки – 30 мА, ускоряющее напряжение – 30 кВ), скорости сканирования $0,1^\circ \text{мин}^{-1}$ и с шагом $0,01^\circ$. При сканировании использовали никелевый β -фильтр для исключения K_β -компоненты излучения рентгеновской трубки. Для идентификации фазовых составляющих слоев использовалась база данных Shimadzu PDF2. Проверку достоверности определения качественного состава проводили с помощью полнопрофильного анализа дифрактограмм по ЛеБелю в программе Jana 2006.

Для анализа морфологии и микрорельефа поверхности оксидных слоев использовался конфокальный лазерный сканирующий микроскоп Olympus IMS LEXT OLS4000. Параметры шероховатости поверхности определяли в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р ИСО 25178-2–2014 с помощью программного пакета

LEXT OLS4000. Разрешение сканирования – 0,625 мкм, площадка сканирования – 640×640 мкм, погрешность определения координат профиля не более 2 %.

Прочность сцепления оксидного слоя с подложкой оценивали методом царапания (скретч-тест) с помощью скретч-тестера Nanovea. Сравнительной мерой оценки оксидных слоев служили значения нагрузки на индентор (F , Н) и расстояния (L , мм), пройденного им, при которых начинается наблюдаться проблеск основы под разрушающимся оксидным слоем. Скретч-тесты проводились по рекомендациям ASTM C1624-05 при следующих условиях: индентор в виде шарика Роквелла $\varnothing 1,588$ мм, начальная нагрузка – 0,1 Н, конечная нагрузка – 25 Н, скорость нанесения царапины – 10 мм/мин. По окончании скретч-тестов исследовали след царапины с помощью микроскопа и определяли момент срыва оксидного слоя. Координату разрушения оксидного слоя и величину нагрузки на инденторе, при которых произошло разрушение, наносили на след царапины.

Коррозионные свойства оксидных слоев оценивали двумя способами.

В первом способе коррозионные свойства оксидных слоев оценивали гравиметрическим (весовым) методом. Базовый количественный показатель – скорость коррозии W_i . Под скоростью коррозии подразумевается убыль массы испытуемого образца с единицы площади поверхности в единицу времени ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$). Магниевые пластины с различными вариантами оксидного слоя, а также без него, обмеряли, определяли площадь поверхности и их вес. Площадь поверхности образцов определяли при помощи штангенциркуля ABSOLUTE Digimatic Mitutoyo, серия 293, которым обмеряли образец до испытаний. Взвешивание производили с помощью аналитических весов Sartorius ED-224S с точностью $\pm 0,1$ мг. После этого помещали образцы в раствор этиленгликоля в воде (в соотношении 1:1 по объему). Температура раствора во время испытания – 363 ± 2 К. Продолжительность теста – 150 минут. После теста исследуемые образцы промывались в дистиллированной воде, сушились и снова взвешивались. Потерю массы образца, приведенную к площади и времени теста, принимали мерой коррозионной стойкости.

Во втором способе коррозионные свойства оксидных слоев оценивали по величине тока в цепи трехэлектродной электрохимической ячейки с платиновым противэлектродом и насыщенным хлорсеребряным электродом сравнения, полученной экстраполяцией прямых участков тафелевских кривых (поляризационных характеристик) и приведенной к площади образца, согласно рекомендациям в [17]. Для минимизации сопротивления между рабочим электродом и электродом сравнения использовали капилляр Луггина. Электрохимические измерения проводили с помощью комплекса потенциостат – импедансметр IPC-ProM/FRA-2 производства Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва. Коррозионная среда – 0,9%-й водный раствор хлорида натрия (NaCl). Эксперименты были проведены при температуре раствора 293 ± 1 К. Перед поляризацией электрод выдерживали в электролите до стабилизации равновесного потенциала E_{corr} (не менее 15–20 минут). Развертка проводилась от равновесного потенциала в катодную и анодную сторону на величину от 200 до 400 мВ в зависимости от стабильности

вольтамперных характеристик. Для анализа повторяемости и сходимости результатов цикл развертки повторялся не менее трех раз. Скорость развертки устанавливалась в диапазоне 1–5 мВ/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Макроструктура оксидного слоя в поперечном сечении представлена на панорамных снимках, полученных с помощью оптического микроскопа (рис. 1).

На рис. 2 приведены карты распределения элементов в оксидных слоях, полученных в различных электролитах. В случае с оксидным слоем, полученным в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 , в составе слоя был обнаружен кремний, равномерно распределенный по всему слою (рис. 2 б). Наличие кремния в составе оксидного слоя показывает, что в процессе формирования оксидного слоя наночастицы SiO_2 участвуют в образовании оксидного слоя и создании его новых фазовых составляющих.

Рентгенофазовый анализ показал, что оксидный слой, полученный в базовом электролите, состоит из оксида магния MgO и фосфата магния $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ (рис. 3).

В оксидном слое, сформированном в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 , обнаружена фаза силиката магния Mg_2SiO_4 , что аналогично результатам работы [18], а также оксид магния MgO и фосфат магния $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$.

Результаты исследования поверхности оксидных слоев, полученных при добавке наночастиц SiO_2 в электролит, показали, что морфология поверхности оксидных слоев различается слабо. Шероховатость Sa оксидного слоя, полученного в электролите без добавки наночастиц SiO_2 , составила 2,4 мкм. Шероховатость Sa оксидного слоя, полученного в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 , составила 3 мкм.

На рис. 4 представлены следы царапин при скретч-тестировании на оксидных слоях, полученных в базовом электролите (без наночастиц SiO_2) (рис. 4 а) и в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 (рис. 4 б).

Скретч-тест показал, что оксидный слой, сформированный в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 , об-

ладает примерно в 1,5 раза большей прочностью (усилие срыва слоя 14 ± 1 Н), чем оксидный слой, полученный в базовом электролите (усилие срыва слоя $9 \pm 0,6$ Н).

Результаты оценки коррозионной стойкости оксидных слоев и базовой магниевой подложки гравиметрическим методом приведены в таблице 1.

Обработка магния методом ПЭО в базовом электролите увеличила коррозионную стойкость поверхности магния в 11 раз. ПЭО в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 увеличило коррозионную стойкость поверхности примерно в 3 раза по сравнению с ПЭО в исходном электролите и более чем в 30 раз по сравнению с необработанной поверхностью.

Результаты оценки коррозионной стойкости оксидных слоев на магнии электрохимическим методом представлены на рис. 5. Коррозионная стойкость оксидных слоев, полученных в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 , улучшилась приблизительно в 4 раза при катодной поляризации (плотность тока коррозии базового оксидного слоя составила $0,35 \pm 0,02$ mA/cm^2 , а оксидного слоя, полученного при добавке нано- SiO_2 в электролит, – $0,08 \pm 0,01$ mA/cm^2) и приблизительно в 6 раз при анодной поляризации (плотность тока коррозии базового оксидного слоя составила $0,62 \pm 0,04$ mA/cm^2 , а оксидного слоя, полученного при добавке нано- SiO_2 в электролит, – $0,1 \pm 0,02$ mA/cm^2).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Появление кремния в оксидном слое, сформированном в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 (рис. 2), свидетельствует о внедрении вещества наночастиц в оксидный слой. Появление фазы силиката магния в оксидном слое при добавке наночастиц в электролит (рис. 3) говорит об участии вещества наночастиц в химических реакциях при формировании самого оксидного слоя. Судя по равномерности распределения кремния (рис. 2 б), наночастицы SiO_2 участвуют в процессе формирования оксидного слоя на всех этапах процесса ПЭО путем химического взаимодействия с формированием новой фазы. Также на дифрактограмме оксидного слоя, сформированного при добавке SiO_2 в электролит, присутствует небольшое аморфное гало,

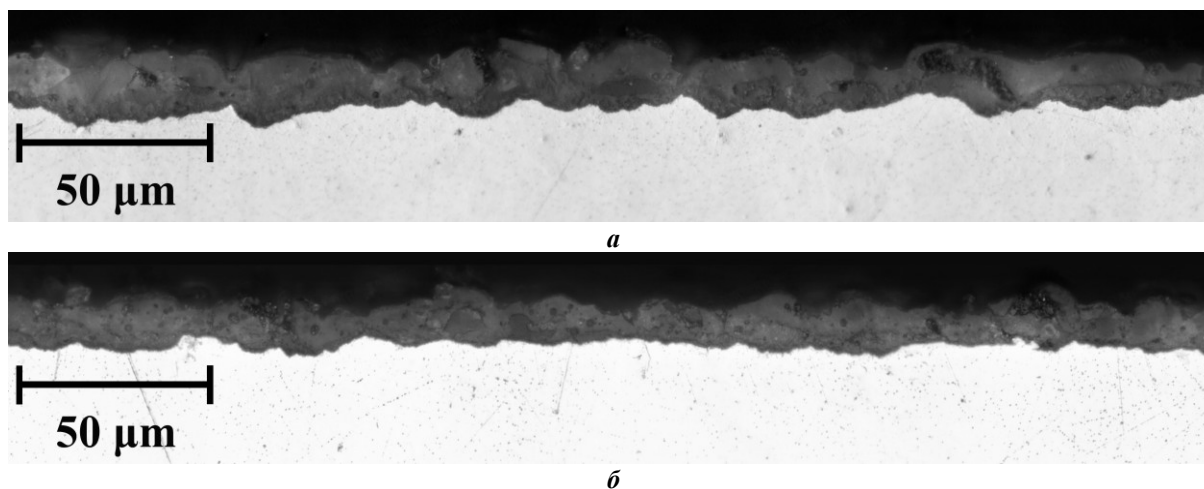


Рис. 1. Макроструктура оксидного слоя на сплаве $\text{Mg}96$, $\times 1000$:

а – оксидный слой, сформированный в базовом электролите;

б – оксидный слой, сформированный в электролите с добавкой наночастиц SiO_2

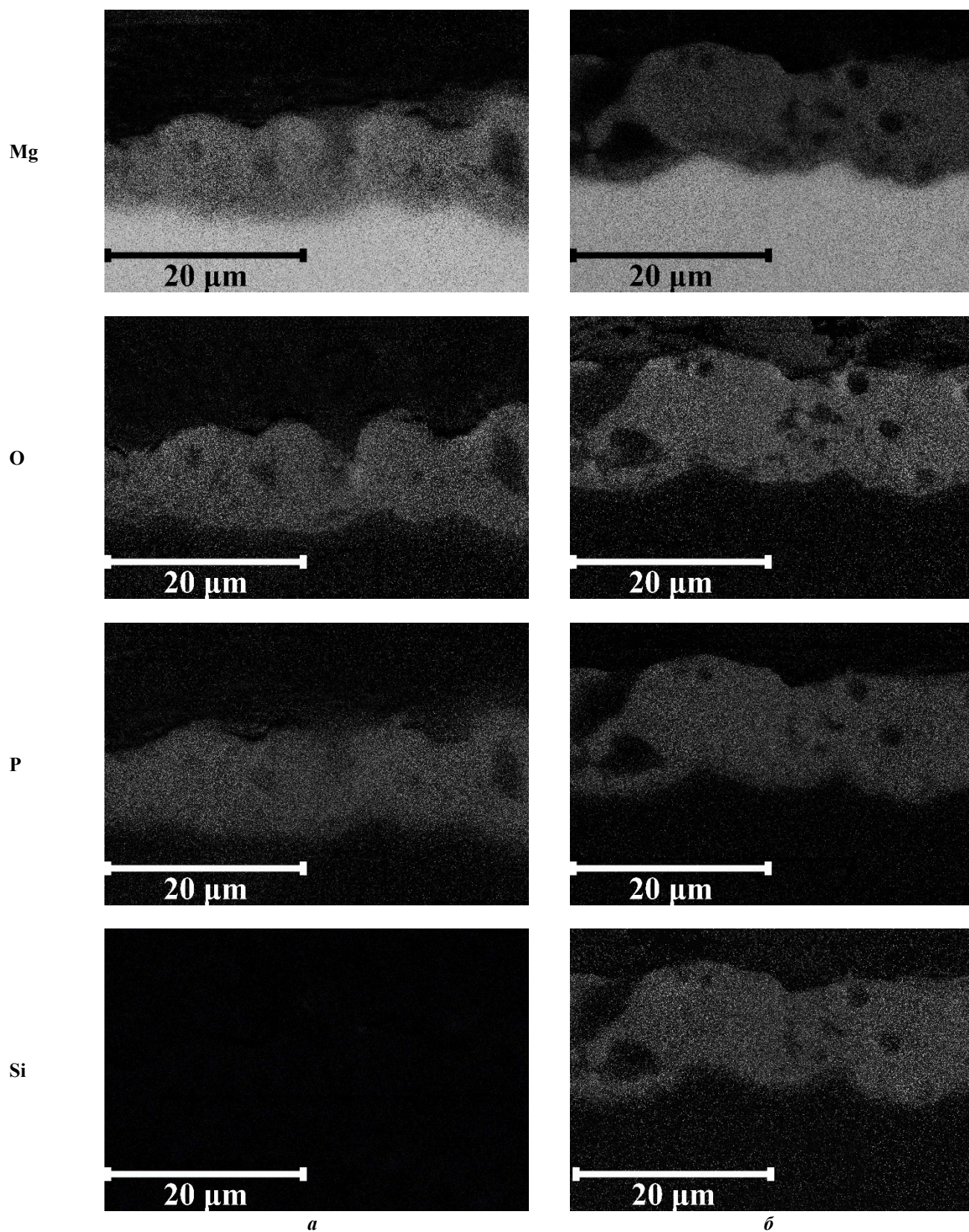


Рис. 2. Карты распределения элементов Mg, O, P и Si в оксидных слоях, полученных в электролите: а – базовом; б – с добавкой наночастиц SiO₂

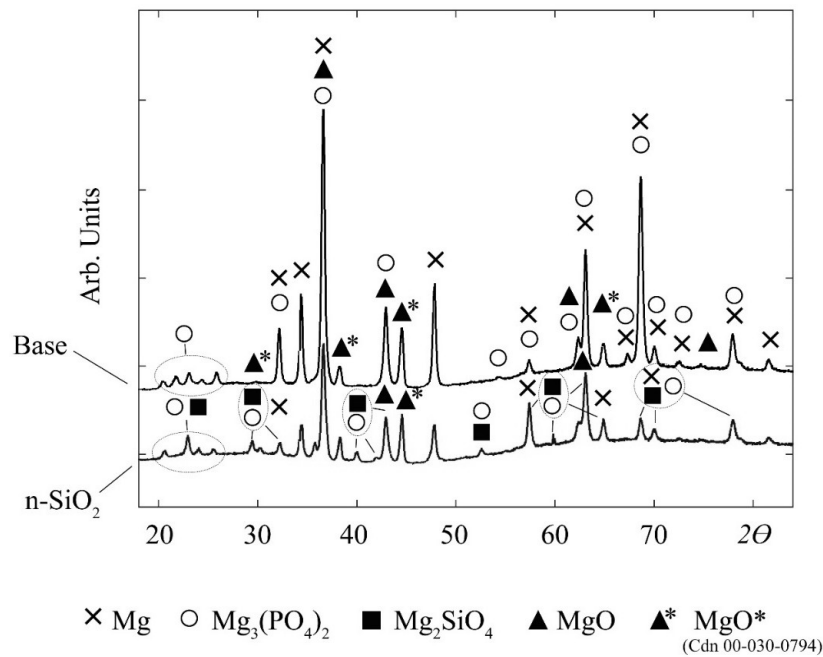


Рис. 3. Рентгенограмма оксидного слоя, полученного в электролите без добавки наночастиц SiO₂ (base) и в электролите с добавкой наночастиц SiO₂ (n-SiO₂)

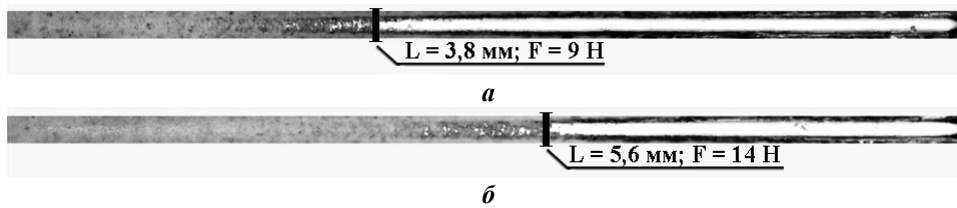


Рис. 4. Царапина на оксидном слое с величиной нагрузки на индентор, F, Н и длиной пути индентора L, мм, при которых произошло разрушение слоя до подложки при скретч-тесте:
 а – оксидный слой, сформированный в электролите без наночастиц SiO₂;
 б – оксидный слой, сформированный в электролите с добавкой наночастиц SiO₂

Таблица 1. Скорость коррозии W_i поверхности магниевого образца при различных вариантах поверхностного модифицирования

Образец	W _i , г/(м ² ·ч)
Без поверхностной обработки	4,991
ПЭО-слой в электролите без добавки наночастиц SiO ₂	0,444
ПЭО-слой в электролите с добавкой наночастиц SiO ₂	0,145

что, видимо, связано с осаждением в слой рентгеноаморфных наночастиц SiO₂ в исходном состоянии и аналогично результатам работы [19]. Следовательно, механизм воздействия наночастиц на свойства оксидного слоя заключается не только в простом внедрении их в дефекты оксидного слоя, но и в непосредственном участии вещества наночастиц SiO₂ в процессе его синтеза. Таким образом, наночастицы SiO₂ проявляют одновременно химически активный (с привнесением в слой новой фазы – силиката магния Mg₂SiO₄) и инертный механизмы [20] участия в формировании оксидного слоя.

Можно предполагать, что адгезионное взаимодействие оксидного слоя с подложкой базового материала зависит от количества и прочности ионных связей MgO в переходном слое Mg/MgO. При этом из [21] следует,

что металлические связи Mg-Mg играют второстепенную роль в адгезии оксида магния к подложке, т. е. именно ионные связи в соединении MgO играют определяющую роль в адгезионном взаимодействии оксидного слоя и подложки. Благодаря замещению в составе оксидного слоя фазы оксида магния MgO на ортофосфат магния Mg₃(PO₄)₂ и силикат магния Mg₂SiO₄ (рис. 3 а и 3 б) наблюдается улучшение адгезионно-когезионных характеристик оксидного слоя (рис. 4 а и 4 б), полученного в электролите с добавкой наночастиц SiO₂. Проведенные нами исследования являются подтверждением гипотез [14; 21] о стабильности и качестве оксидной пленки на магнии и взаимосвязи фазового состава оксидного слоя с его адгезионно-когезионными характеристиками.

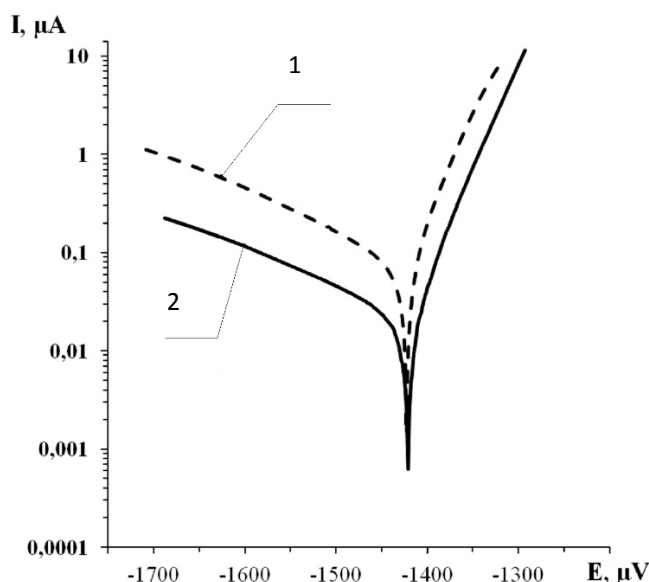


Рис. 5. Поляризационные кривые, полученные при электрохимических испытаниях поверхности оксидного слоя площадью $\approx 1 \text{ см}^2$:

1 – оксидный слой, сформированный в электролите без наночастиц SiO_2 ;
2 – оксидный слой, сформированный в электролите с добавкой наночастиц SiO_2

Улучшение коррозионной стойкости оксидного слоя, полученного в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 (таблица 1, рис. 5), связано, видимо, со снижением количества фазы MgO в оксидном слое. Благодаря активному формированию в оксидном слое более прочных и стабильных фаз ортофосфата магния $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ и силиката магния Mg_2SiO_4 (рис. 3 а и 3 б) при воздействии агрессивной среды наблюдается более высокая коррозионная стойкость оксидного слоя, полученного в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 . Кроме того, улучшение поперечной структуры и снижение количества дефектов оксидного слоя, полученного в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 (рис. 1), также положительно сказывается на коррозионной стойкости покрытия ввиду снижения количества очагов зарождения и развития коррозионных процессов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. При добавке в электролит наночастиц SiO_2 при ПЭО магния первичного Mg96 в полученном оксидном слое появляется фаза силиката магния Mg_2SiO_4 .

2. Добавка в электролит наноразмерного порошка диоксида кремния SiO_2 при плазменно-электролитическом оксидировании магния первичного Mg96 улучшает прочность сцепления с подложкой в 1,5 раза.

3. Выявлено повышение коррозионной стойкости оксидных слоев, полученных в электролите с добавкой наночастиц SiO_2 , в 3...6 раз по сравнению с оксидными слоями, полученными в базовом электролите (без наночастиц SiO_2), и приблизительно в 35...40 раз по сравнению с необработанной поверхностью (материалом подложки).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Самарского регионального научно-образовательного комплекса в рамках научного проекта № 16-48-630785 «р_а».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hussein R.O., Zhang P., Nie X., Xia Y., Northwood D.O. The effect of current mode and discharge type on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloy AJ62 // Surface and Coatings Technology. 2011. Vol. 206. № 7. P. 1990–1997.
- Николаев А., Рольник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической индустрии // Аэрокосмический курьер. 2011. № 1. С. 42–44.
- Magnesium Alloys. Corrosion and Surface Treatments / ed. by F. Czerwinski. London: InTech, 2011. 353 p. ISBN 978-953-307-972-1.
- Hanshan D. Surface engineering of light alloys. Aluminium, magnesium and titanium alloys. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. 680 p. ISBN 978-1-84569-537-8.
- Apelfeld A., Krit B., Ludin V., Morozova N., Vladimirov B., Wud R.Z. The characterization of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ41 magnesium alloy // Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 322. P. 127–133.
- Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В., Крит Б., Борисов А. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2 т. Т. 2. М.: Техносфера, 2011. 512 с.
- Криштал М.М., Ивашин П.В., Ясников И.С., Полунин А.В. Влияние добавок наноразмерных частиц SiO_2 в электролит на состав и морфологию оксидных слоев, формируемых при микродуговом оксидировании сплава АК6М2 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 7. С. 62–69.
- Криштал М.М., Ивашин П.В., Растегаев И.А., Полунин А.В., Боргардт Е.Д. Влияние добавки в электролит наноразмерного диоксида кремния на характеристики оксидных слоев, сформированных микро-

- дуговым оксидированием на Al-Si сплаве АК9ПЧ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2014. № 1. С. 48–52.
9. Криштал М.М., Иваши П.В., Полуни А.В., Боргардт Е.Д., Твердохлебов А.Я. Повышение эффективности технологии микродугового оксидирования алюминиево-кремниевых сплавов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-2. С. 86–93.
 10. Полуни А.В., Иваши П.В., Растегаев И.А., Боргардт Е.Д., Криштал М.М. Исследование износоустойчивости оксидных слоев, сформированных микродуговым оксидированием на силумине АК9ПЧ в модифицированном наночастицами диоксида кремния электролите // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 2. С. 21–25.
 11. Guo J., Wang L., Wang S.C., Liang J., Xue Q., Yan F. Preparation and performance of a novel multifunctional plasma electrolytic oxidation composite coating formed on magnesium alloy // Journal of Materials Science. 2009. Vol. 44. № 8. P. 1998–2006.
 12. Blawert C., Sah S.P., Liang J., Huang Y., Höche D. Role of sintering and clay particle additions on coating formation during PEO processing of AM50 magnesium alloy // Surface and Coatings Technology. 2012. Vol. 213. P. 48–58.
 13. Lu X., Blawert C., Huang Y., Ovari H., Zheludkevich M.L., Kainer K.U. Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles // Electrochimica Acta. 2016. Vol. 187. P. 20–33.
 14. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Imshinetskiy I.M., Samokhin A.V., Tsvetkov Y.V. Fabrication of Coatings on the Surface of Magnesium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation Using ZrO₂ and SiO₂ Nanoparticles // Journal of Nanomaterials. 2015. Vol. 2015. P. 154298. DOI: 10.1155/2015/154298.
 15. Абзаев Ю.А., Копаница Н.О., Клименов В.А., Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Демьяненко О.В., Завьялов А.П. Моделирование структурного состояния аморфного таркосила // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3. С. 121–133.
 16. Jenkins R., Snyder R.L. Introduction to X-ray Powder Diffractometry. New York: NY Wiley, 2012. 432 p. ISBN 9781118520918.
 17. Bard A.J., Faulkner L.R. Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 856 p. ISBN 0-471-04372-9.
 18. Lu X., Blawert C., Kainer K.U., Zheludkevich M.L. Investigation of the formation mechanisms of plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy AM50 using particles // Electrochimica Acta. 2016. Vol. 196. P. 680–691.
 19. Lu X., Blawert C., Zheludkevich M.L., Kainer K.U. Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition // Corrosion Science. 2015. Vol. 101. P. 201–207.
 20. Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E., Arrabal R., Kainer K.U., Zheludkevich M.L. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A Review // Surface and Coatings Technology. 2016. Vol. 307. P. 1165–1182.
 21. Dong E.T., Shen P., Shi L.X., Zhang D., Jiang Q.C. Wetting and adhesion at Mg/MgO interfaces // Journal of Material Science. 2013. Vol. 48. № 17. P. 6008–6017.

REFERENCES

1. Hussein R.O., Zhang P., Nie X., Xia Y., Northwood D.O. The effect of current mode and discharge type on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloy AJ62. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, no. 7, pp. 1990–1997.
2. Nikolas A., Rolnik S. Application of magnesium components in the aerospace industry. *Aerokosmicheskiy kuryer*, 2011, no. 1, pp. 42–44.
3. Czerwinski F., ed. *Magnesium Alloys. Corrosion and Surface Treatments*. InTech, 2011. 353 p. ISBN 978-953-307-972-1.
4. Hanshan D. *Surface engineering of light alloys. Aluminium, magnesium and titanium alloys*. Woodhead Publishing Limited, 2010. 680 p. ISBN 978-1-84569-537-8.
5. Apelfeld A., Krit B., Ludin V., Morozova N., Vladimirov B., Wud R.Z. The characterization of plasma electrolytic oxidation coatings on AZ41 magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 322, pp. 127–133.
6. Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V., Lyudin V., Krit B., Borisov A. *Plazmenno-elektroliticheskoe modifitsirovanie poverkhnosti metallov i splavov* [Plasma-electrolytic modification of the surface of metals and alloys]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2011. Vol. 2, 512 p.
7. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Yasnikov I.S., Polunin A.V. Effect of nanosize SiO₂ particles added into electrolyte on the composition and morphology of oxide layers formed in alloy AD6M2 under microarc oxidizing. *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 57, no. 7-8, p. 428–435.
8. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Rastegaev I.A., Polunin A.V., Borgardt E.D. The influence of nano-sized silicon dioxide addition in electrolyte on characteristics of oxide layers formed with microarc oxidation on Al-Si alloy 361.0. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 1, pp. 48–52.
9. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Polunin A.V., Borgardt E.D., Tverdokhlebov A.Ya. Improvement of the efficiency of technology of aluminum-silicon alloys micro-arc oxidation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 86–93.
10. Polunin A.V., Ivashin P.V., Rastegaev I.A., Borgardt E.D., Krishtal M.M. Wear resistance of the oxide layers formed on AK9Pch silumin by microarc oxidation in an electrolyte modified by silicon dioxide nanoparticles. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 2016, no. 4, pp. 385–388.
11. Guo J., Wang L., Wang S.C., Liang J., Xue Q., Yan F. Preparation and performance of a novel multifunctional plasma electrolytic oxidation composite coating formed on magnesium alloy. *Journal of Materials Science*, 2009, vol. 44, no. 8, pp. 1998–2006.
12. Blawert C., Sah S.P., Liang J., Huang Y., Höche D. Role of sintering and clay particle additions on coating formation during PEO processing of AM50 magnesium

- alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2012, vol. 213, pp. 48–58.
13. Lu X., Blawert C., Huang Y., Ovri H., Zheludkevich M.L., Kainer K.U. Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 187, pp. 20–33.
 14. Gnednikov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Imshinetskiy I.M., Samokhin A.V., Tsvetkov Y.V. Fabrication of Coatings on the Surface of Magnesium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation Using ZrO₂ and SiO₂ Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2015, vol. 2015, p. 154298. DOI: 10.1155/2015/154298.
 15. Abzaev Yu.A., Kopanina N.O., Klimenov V.A., Sarkisov Yu.S., Gorlenko N.P., Demyanenko O.V., Zavyalov A.P. Structural state modeling of amorphous tarkosil. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2015, no. 3, pp. 121–133.
 16. Jenkins R., Snyder R.L. *Introduction to X-ray Powder Diffractometry*. NY Wiley, 2012. 432 p. ISBN 9781118520918.
 17. Bard A.J., Faulkner L.R. *Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications*. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2001. 856 p. ISBN 0-471-04372-9.
 18. Lu X., Blawert C., Kainer K.U., Zheludkevich M.L. Investigation of the formation mechanisms of plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy AM50 using particles. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 196, pp. 680–691.
 19. Lu X., Blawert C., Zheludkevich M.L., Kainer K.U. Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition. *Corrosion Science*, 2015, vol. 101, pp. 201–207.
 20. Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E., Arrabal R., Kainer K.U., Zheludkevich M.L. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A Review. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 307, pp. 1165–1182.
 21. Dong E.T., Shen P., Shi L.X., Zhang D., Jiang Q.C. Wetting and adhesion at Mg/MgO interfaces. *Journal of Material Science*, 2013, vol. 48, no. 17, pp. 6008–6017.

**THE INFLUENCE OF THE ADDITION OF SiO₂ NANO-DIMENSIONAL PARTICLES
TO THE ELECTROLYTE ON THE COMPOSITION AND PROPERTIES
OF THE OXIDE LAYERS FORMED BY THE PLASMA-ELECTROLYTIC OXIDATION ON MAGNESIUM**

© 2018

E.D. Borgardt, junior researcher of the Research Division No. 4
of the Research Institute of Advanced Technologies

A.V. Polunin, PhD (Engineering), senior researcher of the Research Division No. 4
of the Research Institute of Advanced Technologies

P.V. Ivashin, PhD (Engineering), leading researcher of the Research Division No. 4
of the Research Institute of Advanced Technologies

M.M. Krishtal, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Rector
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: plasma-electrolytic (microarc) oxidation; technically pure magnesium; nanoparticles; silica; oxide layer; adhesion strength to the substrate; corrosion resistance.

Abstract: Magnesium and its alloys, due to the combination of lightness and strength characteristics, are of interest in all production industries particular about the weight of products – shipbuilding, aviation, rocketry. However, the surface properties of magnesium alloys fail to meet many requirements, and at the moment, there is no the effective method for their improvement. The electrochemical method of plasma electrolytic oxidation (PEO) is promising in this case but the technology of obtaining the oxide layers using this method needs to be improved. One of the ways of modifying the PEO layers is the addition of nanoparticles to the electrolyte. The paper describes the synthesizing of the oxide layers on the pure magnesium by the PEO method using the electrolyte without nanoparticles and with the addition of SiO₂ nanoparticles to the electrolyte. The authors studied the obtained oxide layers using the methods of scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis, X-ray phase analysis, instrumental indentation, and the electrochemical tests. The structure, element and phase composition, adhesion strength to the substrate and the corrosion resistance of the oxide layers on magnesium were studied.

The study demonstrated the positive effect of the SiO₂ nanoparticles additions to the electrolyte on the functional properties of the oxide layer – the adhesion strength to the substrate and corrosion resistance. The mechanism of the positive effect of nanoparticles on these characteristics was suggested. The study detected the phase of magnesium silicate Mg₂SiO₄, as well as magnesium phosphate Mg₃(PO₄)₂ in the oxide layer which indicates the participation of both the electrolyte components – phosphorus, and the added nanosized particles of silicon dioxide in the formation of the layer.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКООДНОРОДНОЙ СУХОЙ СМЕСИ «АЛЮМИНИЕВЫЙ ПОРОШОК – ОДНОСТЕННЫЕ УНТ» В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2018

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

А.И. Капустин, заведующий лабораторией

В.В. Сапунов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения»

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: композиционный материал; алюминий; углеродные нанотрубки; механическое легирование; композиционные гранулы; нормализация шихты.

Аннотация: Рассмотрена проблема синтеза нанокomпозитов на алюминиевых матрицах, армированных углеродными нанотрубками, с высокими физико-механическими характеристиками, в части достижения однородной дисперсии углеродных нанотрубок в алюминиевой матрице композита. Разработаны основы технологии приготовления и определены требования к параметрам так называемой нормализованной шихты (высокооднородной по объему сухой смеси «алюминиевый порошок – одностенные углеродные нанотрубки»), предназначенной для эффективного синтеза композиционных гранул механическим легированием.

В качестве исходных материалов использовали порошок алюминиевый первичный дисперсный марки ПАД-1, одностенные углеродные нанотрубки TUBALL и стеариновую кислоту в качестве агента регулирования процесса. Процессы нормализации и механического легирования проводили в механическом реакторе авторской конструкции. Полученные композиционные гранулы подвергали холодному, а затем горячему компактированию. Показана эффективность предложенного авторами нового подхода к осуществлению эффективного армирования алюминиевого матричного порошка нанотрубками. В основу такого подхода положено обеспечение эффективной дисперсии углеродных нанотрубок в легируемый матричный материал за счет введения в технологию синтеза композиционных гранул, представляющих собой полуфабрикат для получения композиционного материала с высокими физико-техническими характеристиками, специальной технологической операции – «нормализации» шихты.

Представлены данные о достигаемых прочностных параметрах полуфабрикатов алюмоматричных композитов, при изготовлении которых использовали нормализованную шихту. Показано, что применение разработанной технологии нормализации шихты обеспечивает повышение прочностных характеристик полуфабрикатов композиционных материалов не менее чем на 25 % по сравнению с технологией без применения нормализации. Полученные в ходе исследований результаты могут быть использованы при совершенствовании технологий получения алюмоматричных композитов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многостенные (МУНТ) и одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) находят все большее применение в качестве армирующего материала в металломатричных композиционных материалах. Особый интерес вызывают нанокomпозиты на основе алюминиевых матриц, широко востребованные в аэрокосмической и автомобильной промышленности [1–3].

Анализ результатов опубликованных работ [4–5], выполненных в области исследований и создания алюмоматричных композиционных материалов с применением УНТ, показывает, что ключевой проблемой синтеза нанокomпозитов на алюминиевых матрицах, армированных УНТ, с высокими физико-механическими характеристиками является достижение однородной дисперсии УНТ в алюминиевой матрице композита.

По мнению ряда исследователей [6–8], эффективная дисперсия УНТ в порошке алюминиевой матрицы при успешной ее реализации в процессе синтеза композиционных гранул из составных порошков, а затем и готовых композитов с применением интенсивной механической деформации, в частности методом механического легирования, является основой достижения высоких физико-механических свойств композитов. Авторы этих работ справедливо утверждают, что кластеризация и агломерация УНТ являются критической технологической проблемой.

При этом как у упомянутых, так и у других исследователей [9–11] весь процесс получения композиционных гранул реализуется в режиме постоянной энергии деформирования (при одинаковом числе оборотов устройств легирования (атриторов, шаровых и планетарных мельниц). Авторы исследований варьировали размерами фракций матричного порошка [12], концентрацией вводимых УНТ [13], продолжительностью обработки [14], средой [15], агентами регулирования процесса, соотношения масс шихты и шаров [16] и пр.

Авторами настоящего исследования предложен иной подход к решению рассматриваемой задачи, заключающийся в том, что для получения однородной дисперсии УНТ в алюминиевой матрице композита предлагается ввести в технологию синтеза композиционных гранул специальную технологическую операцию нормализации шихты (смеси матричного порошка и УНТ) с пониженным уровнем энергетического воздействия по молярным тел на компоненты порошковой смеси, исключая возникновение холодной сварки.

Цель работы – получение эффективной технологии нормализации шихты в процессе синтеза композиционных гранул для алюмоматричных композитов механическим легированием алюминиевого порошка ПАД-1 одностенными углеродными нанотрубками TUBALL (ОУНТ).

МАТЕРИАЛЫ

В качестве исходных материалов использовали:

– порошок алюминиевый первичный дисперсный марки ПАД-1 (СТО22436138-006-2006) (таблица 1) с использованием фракции размером до 30 мкм;

– одностенные углеродные нанотрубки TUBALL 01RW01 (ТУ 2166-001-91735575-2014) со средним внешним диаметром не более 3 нм и полной удельной поверхностью не менее 300 м²/г.

Также использовали кислоту стеариновую (ГОСТ 6484-96), способствующую процессу нормализации шихты, в качестве поверхностно-активного реагента, регулирующего процесс.

Внешний вид ОУНТ TUBALL и гранул матричного порошка ПАД-1 в исходном состоянии показан на рис. 1.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для получения композиционных гранул в качестве базовой использовали шихту следующей рецептуры:

- матричный порошок ПАД-1 – 97,5 % масс.;
- одностенные углеродные нанотрубки TUBALL (ОУНТ) – 2 % масс.;
- стеариновая кислота – 0,5 % масс.

Нормализацию шихты и ее последующее легирование проводили в механическом реакторе оригинальной конструкции, которая включает два внутренних виброэлемента, закрепленных на единой горизонтальной оси, создающих вибросиловые воздействия на шаровые помельные тела в двух взаимно перпендикулярных направлениях с фазовым сдвигом 30° [17; 18].

Морфологию и размер частиц оценивали с помощью цифрового микроскопа Dino-Lite AM4112PT и оптического микроскопа «Альтами МЕТ 6Т». Твердость об-

разцов по Роквеллу (шкала HRB) измеряли на твердомере TP150M. Данный метод контроля выбран из тех соображений, что достоверная оценка твердости материала возможна при воздействии индентора на большой объем материала [19].

Холодное и горячее прессование выполняли на прессе ПБ6324Б с усилием до 1000 Н с применением разработанной и изготовленной авторами специальной оснастки и вспомогательного оборудования.

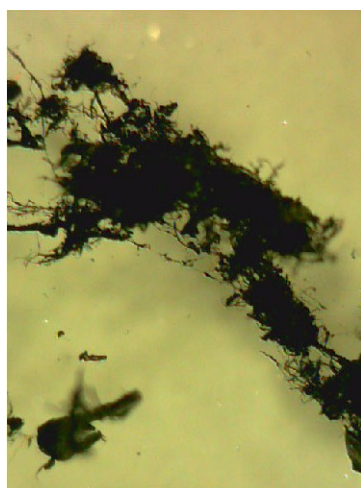
Исследования проводили по предложенному авторами новому подходу к реализации технологии синтеза композиционных гранул, заключающемуся во введении в технологию синтеза композиционных гранул специальной технологической операции предварительной подготовки порошковой смеси к механическому легированию.

На этой операции, названной процессом «нормализации» шихты, обеспечивается обработка исходной смеси матричного алюминиевого порошка и легирующих УНТ при малых уровнях энергии воздействия помельных тел на компоненты смеси в механическом реакторе [17; 18]. Энергия ограничена уровнем, при котором не происходит холодная сварка. Реализуется только процесс равномерного объемного распределения УНТ в матричном порошке с образованием нормализованной шихты с низкой насыпной плотностью. Нормализованная шихта представляет собой уплощенные частицы исходного алюминиевого порошка с развитой, имеющей многочисленные разрывы и складки поверхностью, с «захваченными» ею частицами агломератов УНТ.

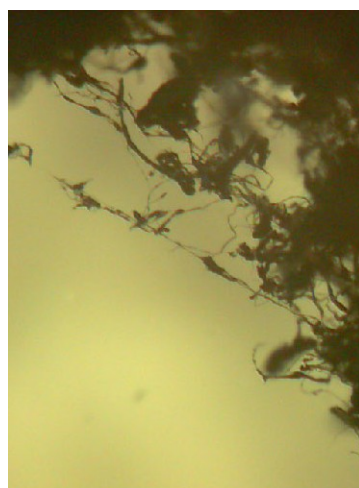
Заметим, что процесс нормализации предполагает уменьшение агломератов ОУНТ до определенных размеров, сопоставимых с размерами гранул исходного

Таблица 1. Физико-химические показатели исходного порошка алюминия ПАД-1 (СТО22436138-006-2006)

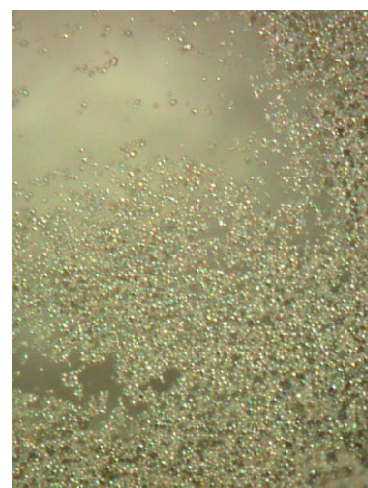
Гранулометрический состав, масс. %				Доля активного алюминия, масс. %	Доля примесей, масс. %	
0–10, мкм	10–20, мкм	20–30, мкм	>30, мкм		Fe	Si
3,96	28,40	29,98	37,66	99,2	0,1	0,1



а



б



в

Рис. 1. Внешний вид ОУНТ и гранул матричного порошка:
а – ОУНТ, увеличение 50X; б – ОУНТ, увеличение 200X; в – ПАД-1, увеличение 200X

порошка ПАД-1. Наличие агломератов является гарантией сохранения УНТ в исходном состоянии (отсутствия критических повреждений УНТ) на стадии нормализации шихты. При этом обязательным условием является достижение их преимущественно связанного состояния с деформированными в процессе нормализации частицами матричного алюминиевого порошка. Основная часть агломератов должна быть «захвачена» развитой поверхностью легируемого порошка алюминия. Достижение такого состояния при равномерном объемном распределении УНТ в алюминиевом порошке является, по мнению авторов, необходимым и достаточным условием равномерного распределения УНТ по объему композиционных гранул.

При правильно заданном уровне энергии нормализации шихты имеет место стабилизация ее насыпной плотности через достаточно короткое время. При этом увеличение продолжительности нормализации не ведет к изменению морфологии и насыпного веса смеси, наступает установившийся режим нормализации, что является признаком ее завершения.

После нормализации шихты синтез композиционных гранул в процессе механического легирования производится при энергетических воздействиях, кратно превышающих энергетические воздействия в процессе нормализации.

Базовую технологию нормализации исходной смеси ПАД-1 и ОУНТ, а затем ее последующее механическое легирование реализовывали с применением двухвibrаторного механического реактора упомянутой выше авторской конструкции при следующих параметрах:

- число оборотов вибратора при нормализации шихты – 200 об/мин (с применением реверса через каждые 10 мин);

- число оборотов вибратора при механическом легировании – 400 об/мин (с применением реверса через каждые 30 мин). При этом в ходе механического легирования выполнялся периодический поворот (по часовой, а затем против часовой стрелки) рабочей камеры вокруг оси через каждые 15 мин на угол 90°;

- мелющие тела – шары из стали ШХ15 диаметром 10 мм;

- массовое соотношение шаров и шихты – 55:1.

Обработку производили в среде аргона марки «Ч».

Варьировали продолжительностью процесса нормализации шихты на четырех уровнях: 40, 80, 120 и 160 мин.

В качестве критериев достаточной длительности процесса нормализации шихты были приняты:

- снижение насыпной плотности шихты до 0,3...0,4 г/см³ при исходной насыпной плотности ПАД-1, равной 1,08...1,1 г/см³;

- ограничение размера агломератов УНТ, который не должен превышать максимального размера исходного легируемого матричного порошка (30 мкм);

- переход процесса нормализации в установившийся режим, характеризуемый отсутствием изменения насыпной плотности шихты в течение не менее чем 20 мин.

Продолжительность процесса механического легирования составляла 180 мин. Критерием завершения процесса синтеза являлось достижение насыпной плотности композиционных гранул не ниже насыпной плотности исходного матричного порошка.

В процессе нормализации и после ее завершения регистрировали морфологию частиц, а также оценивали их состояние в части «захвата» агломератов нанотрубок, а после завершения механического легирования регистрировали морфологию и гранулометрический состав полученных композиционных гранул.

В качестве основного показателя эффективности введения в технологию синтеза композиционных материалов, армированных ОУНТ, процесса нормализации шихты приняли уровень прочностных характеристик материала, оцениваемый по достигаемому значению твердости в единицах HRB.

Образцы для измерения твердости получали компактированием композиционных гранул холодным прессованием при 20...25 °С либо в брикеты диаметром 21 мм и высотой 7 мм, с плотностью 2,45...2,47 г/см³, либо в брикеты диаметром 39,2 мм и высотой 12,5 мм, с плотностью 2,25...2,3 г/см³. Брикеты диаметром 39,2 мм подвергали горячему прессованию (горячей подпрессовке) при 520...560 °С с получением образцов с плотностью 2,60...2,64 г/см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе выполнили серию последовательных самостоятельных процессов нормализации шихты и затем механического легирования полученных партий нормализованной шихты. После проведения процессов нормализации и механического легирования нормализованной шихты анализировали закономерности изменения насыпного веса (рис. 2), гранулометрического состава и морфологии композиционных гранул.

Процесс нормализации сопровождается снижением насыпной плотности шихты до установившегося значения 0,33...0,35 г/см³ (рис. 2 а), что свидетельствует о правильном определении примененного уровня низкоэнергетического воздействия, при котором исключается процесс холодной сварки, характеризующийся формированием композиционных гранул, сопровождающимся ростом их насыпного веса.

Из анализа морфологии частиц нормализованной шихты (рис. 3) следует, что цель операции достигнута: наблюдается захват агломератов ОУНТ расплюснутыми частицами матричного алюминия. Агломераты захватываются как периферией, так и поверхностью деформированных алюминиевых частиц, имеющих многочисленные разрывы и складки. При этом размеры агломератов, с высокой вероятностью состоящих из не подвергшихся разрушению исходных ОУНТ, не превышают исходный размер матричного ПАД-1 (до 30 мкм).

Таким образом, можно предположить, что в процессе нормализации действительно достигается однородное объемное бездефектное распределение ОУНТ в массиве шихты.

В процессе механического легирования нормализованной шихты формируются объемные композиционные гранулы: происходит их увеличение и уплотнение с одновременным увеличением насыпной плотности. Насыпной вес возрастает от установившегося минимального, достигнутого в результате нормализации шихты, до установившегося значения, близкого к насыпному весу исходного матричного порошка ПАД-1 (рис. 2 б). В выполненной серии экспериментов продолжительность механического легирования ограничивалась

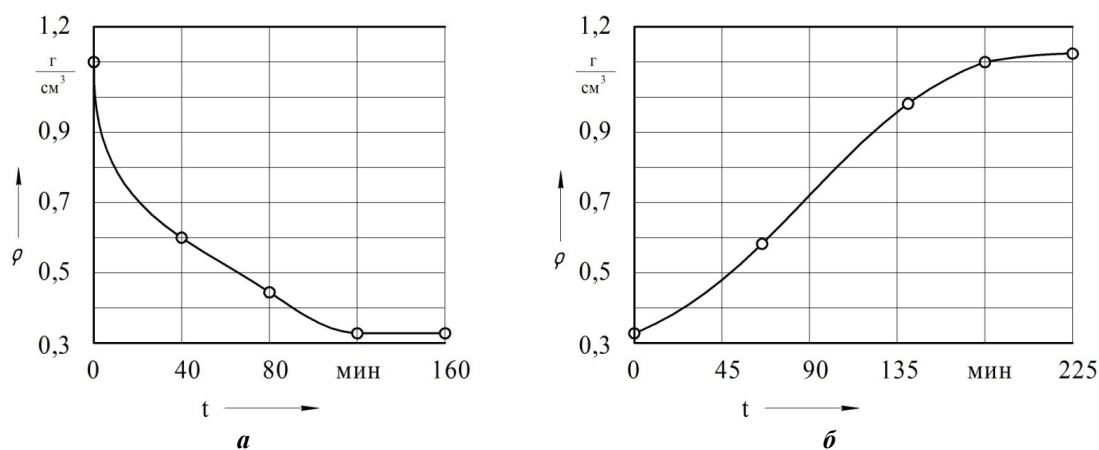


Рис. 2. Зависимость насыпной плотности шихты ρ от продолжительности процесса обработки t в механическом реакторе: а – этап нормализации шихты; б – этап механического легирования

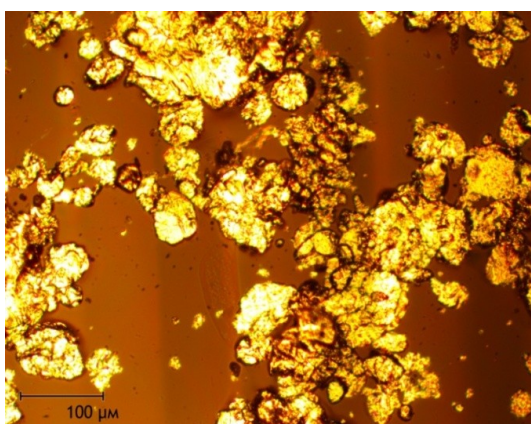


Рис. 3. Частицы шихты после процесса нормализации (разрешение 100 мкм)

временем, в течение которого достигалось увеличение насыпного веса до $1,08...1,12 \text{ г/см}^3$.

При анализе морфологии композиционных гранул, полученных после механического легирования (рис. 4), в части трансформации состояния сформированных в результате нормализации шихты агломератов ОУНТ, выявлено их исчезновение, что наиболее вероятно связано с поглощением их содержимого массивом гранул. Это подтверждается окрашиванием (изменением цвета) поверхности наблюдаемых гранул в выраженный темно-серый цвет (рис. 4 а, 5 а), контрастирующий с серебристым цветом чистого матричного алюминиевого порошка, подвергнутого нормализации шихты и механическому легированию на тех же режимах (рис. 5 б). Окрашивание указывает на присутствие ОУНТ непосредственно в поверхностном слое композиционных гранул, образованном поверхностями входящих в их состав более мелких гранул. Причем следует полагать, что это касается и внутренних поверхностей раздела между мелкими гранулами, из которых в процессе механического легирования в результате холодной сварки формируются наблюдаемые композиционные гранулы, что, в свою очередь, определяет высокую однородность распределения ОУНТ в массивах как композиционных гранул, так и готового композиционного материала.

Возможное окрашивание поверхности композиционных гранул углеродом, который мог образоваться в результате аморфотизации нанотрубок, проверено по методике [20]. Вариант окрашивания в результате образования на поверхности композиционных гранул свободного или слабо связанного с поверхностью матричного материала слоя УНТ оценен путем ультразвуковой обработки композиционных гранул с использованием ультразвукового диспергатора ИЛ 100-6/4 в среде изопропилового спирта, в котором при наличии свободных нанотрубок образуется их стойкая суспензия [21]. Свободных частиц аморфного углерода и УНТ не обнаружено. После упомянутых воздействий также не отмечено изменение интенсивности серого цвета композиционных гранул. Из этого следует, что окрашивание вызвано внедрением ОУНТ в матричный материал композиционных гранул.

Результаты экспериментальных исследований и контроля гранулометрического состава композиционных гранул, твердости компактированных образцов плотностью $2,45 \text{ г/см}^3$, полученных холодным прессованием, твердости компактированных образцов плотностью до $2,64 \text{ г/см}^3$, полученных горячим прессованием, по методу Роквелла по шкале HRV представлены в таблице 2.

На основании данных таблицы 2, принимая за базу для сравнения параметры серий А и Б, представляющих

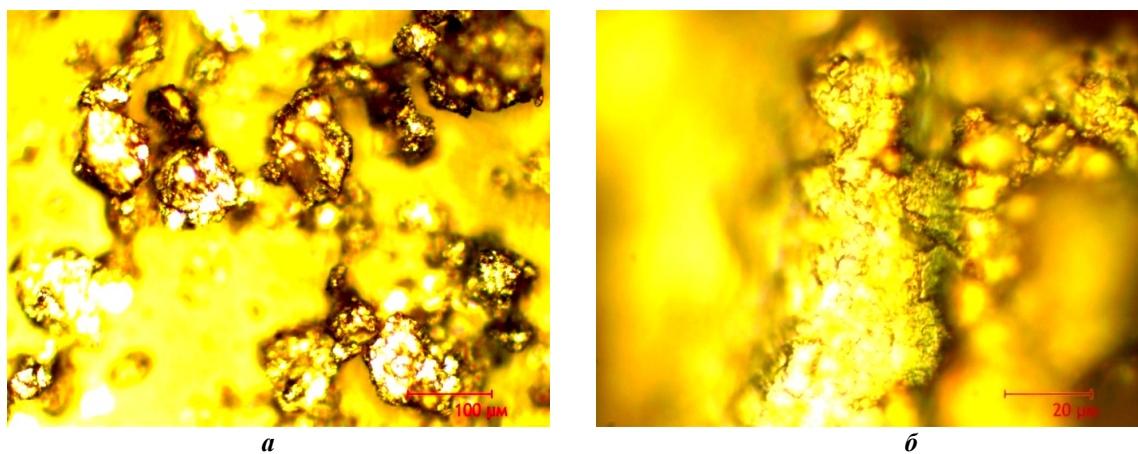


Рис. 4. Внешний вид композиционных гранул из нормализованной шихты после механического легирования: а – разрешение 100 мкм; б – разрешение 20 мкм

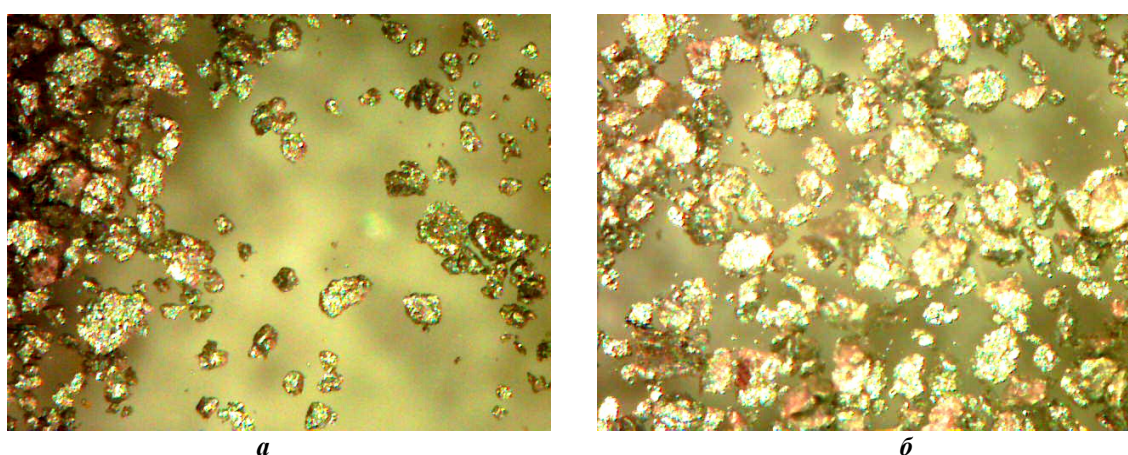


Рис. 5. Внешний вид гранул после механического легирования при увеличении 200X: а – композиционные гранулы с ОУНТ; б – гранулы чистого алюминиевого матричного порошка

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований

Серия опытов	Рецептура шихты	Характеристика процесса	Гранулометрический состав, % масс.				Твердость HRB
			0...63 мкм	63...140 мкм	140...700 мкм	>700 мкм	
А	99,5 % ПАД-1 0,5 % СК	МЛ без обработки в режиме НШ+ХП	–	9,1	80,9	10,0	<40
Б	99,5 % ПАД-1 0,5 % СК	МЛ после НШ+ХП	–	23,3	75,5	1,2	<40
В	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ без НШ+ХП	16,3	35,2	48,5	–	45...48
Г	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	МЛ после НШ+ХП	28,5	41,5	29,8	0,2	57...61
Д	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	ГП образцов из гранул серии Г при 530 °С до плотности 2,6 г/см ³	–	–	–	–	70...73
Е	97,5 % ПАД-1 2 % ОУНТ 0,5 % СК	ГП образцов из гранул серии Г при 550 °С до плотности 2,64 г/см ³	–	–	–	–	79,5...80,5

Примечание: МЛ – механическое легирование; ХП – холодное прессование; ГП – горячее прессование; СК – стеариновая кислота; НШ – нормализация шихты.

собой контрольные образцы из чистого матричного порошка, обработанные в режиме механического легирования без применения нормализации шихты (серия А) и с применением нормализации шихты (серия Б) в тех же режимах, в которых обрабатывалась серия образцов Г, можно констатировать следующее.

Применение нормализации шихты при получении контрольных образцов Б без введения ОУНТ приводит к существенному уменьшению размеров фракций гранул после механического легирования, при этом изменение твердости образцов не регистрируется.

Введение 2 % ОУНТ без применения нормализации шихты (серия В) дает дополнительное измельчение фракционного состава и обеспечивает некоторое упрочнение (твердость образцов серии В выше твердости контрольных образцов серий А и Б, деформационно упрочненных в результате механического легирования, в единицах HRB на 15...20 %).

Применение нормализации шихты (серии Г, Д и Е) сопровождается дальнейшим измельчением фракционного состава гранул и обеспечивает дополнительное упрочнение (твердость образцов этих серий после холодного прессования выше твердости деформационно упрочненных образцов серий А и Б в единицах HRB не менее чем на 50 %).

После горячего прессования (серии Д и Е) достигается твердость образцов, превышающая твердость деформационно упрочненных образцов серий А и Б не менее чем на 100 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана технология нормализации шихты, позволяющая решать задачу обеспечения однородного распределения УНТ в массиве композиционного материала на первой стадии подготовки шихты к механическому легированию. Сформулированы основные требования к операции нормализации и режиму ее реализации.

2. Показано, что применение разработанной технологии нормализации шихты обеспечивает повышение прочностных характеристик полуфабрикатов композиционных материалов не менее чем на 25 % по сравнению с технологией без применения нормализации.

3. Результаты работы могут быть использованы как основа для совершенствования технологий получения алюмоматричных композитов с высокими физико-механическими характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-43-732150 р_офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Anantha Prasad M.G., Bhandekar N. Study of Microstructure and Mechanical Behavior of Aluminum/Garnet/Carbon Hybrid Metal Matrix Composites (HMMCs) Fabricated by Chill Casting Method // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2015. Vol. 3. № 3. P. 1–8.
- Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
- Ostovan F., Matori K.A., Toozandehjani M., Oskoueian A., Yusoff H.M., Yunus R., Ariff A.M., Quah H.J., Lim W.F. Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites // *Materials Chemistry and Physics*. 2015. Vol. 166. P. 160–166.
- Бунаков Н.А., Голованов В.Н., Козлов Д.В., Потапов С.Н., Климов Е.С. Получение композитного материала из алюминия с углеродными нанотрубками методами порошковой металлургии // *Физико-математические методы и информационные технологии в естествознании, технике и гуманитарных науках: сборник материалов международного научного е-симпозиума*. Киров: МЦНИП, 2015. С. 25–37.
- Raviathul B.M., Srivastava V.C., Mukhopadhyay N.K. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling // *Materials & Design*. 2014. Vol. 64. P. 542–549.
- Ci L., Ryu Z., Jin P.N.Y., Rühle M. Investigation of the interfacial reaction between multi-walled carbon nanotubes and aluminum // *Acta Materialia*. 2006. Vol. 54. № 20. P. 5367–5375.
- Choi H., Shin J., Min B., Park J., Bae D. Reinforcing effects of carbon nanotubes in structural aluminum matrix nanocomposites // *Journal of Materials Research*. 2011. Vol. 24. № 8. P. 2610–2616.
- Yang C., Zong Y., Zheng Z., Shan D. Experimental and theoretical investigation on the compressive behavior of aluminum borate whisker reinforced 2024Al composites // *Materials Characterization*. 2014. Vol. 96. P. 84–92.
- Hassan M.T.Z., Esawi A.M.K., Metwalli S. Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminum-carbon nanotube composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 607. P. 215–222.
- Yoo S.J., Han S.H., Kim W.J. Strength and strain hardening of aluminum matrix composites with randomly dispersed nanometer-length fragmented carbon nanotubes // *Scripta Materialia*. 2013. Vol. 68. № 9. P. 711–714.
- Wang L., Choi H., Myoung J.M., Lee W. Mechanical alloying of multi-walled carbon nanotubes and aluminum powders for the preparation of carbon/metal composites // *Carbon*. 2009. Vol. 47. № 15. P. 3427–3433.
- Zhu X., Zhao Y.G., Wu M., Wang H.Y., Jiang Q.C. Effect of Initial Aluminum Alloy Particle Size on the Damage of Carbon Nanotubes during Ball Milling // *Materials*. 2016. Vol. 9. № 3. P. 3–18.
- Nayan N., Murty S.V.S.N., Sharma S.C., Kumar K.S., Sinha P.P. Calorimetric study on mechanically milled aluminum and multiwall carbon nanotube composites // *Materials Characterization*. 2011. Vol. 62. № 11. P. 1087–1093.
- Kukovecz A., Kanyo T., Konya Z., Kiricsi I. Long-time low-impact ball milling of multi-wall carbon nanotubes // *Carbon*. 2005. Vol. 43. № 5. P. 994 – 1000.
- Nam H.R., Kim Y.J., Yang S.S., Ahn J.H. Ball-Milling of Graphite and Multi-Wall Carbon Nanotubes // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2014. Vol. 14. № 12. P. 9103–9107.
- Narayanan S.S., Manickavasaham G., Moorthy S. Experimental Investigation of Aluminium alloy with MWCNT Composite to increase the technical Properties by Stir Casting Method // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2015. Vol. 12. № 4 (II). P. 30–34.
- Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Формирование фазового состава, структурных параметров

- и физико-механических свойств композиционных гранул в процессе механического легирования алюминия аллотропными формами углерода // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12. С. 7–11.
18. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Исследование процесса механического легирования алюминия наноразмерными аллотропными модификаторами углерода // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 24–34.
 19. Лопатина Ю.А., Курганова Ю.А. Анализ измерения твердости композиционных материалов системы Al+SiC // III международная научная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов»: сборник научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 76–80.
 20. Веткасов Н.И., Капустин А.И., Сапунов В.В. Экспериментальное исследование процесса механического легирования алюминия техническим углеродом // Теоретические и практические аспекты развития научной мысли в современном мире: сборник статей Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С. 18–21.
 21. Гигиберия В.А., Арьев И.А., Лебовка Н.И. Устойчивость суспензий многослойных углеродных нанотрубок в органических растворителях в присутствии Triton X-165 // Коллоидный журнал. 2012. Том 74. № 6. С. 696–701.
- REFERENCES**
1. Anantha Prasad M.G., Bandekar N. Study of Microstructure and Mechanical Behavior of Aluminum/Garnet/Carbon Hybrid Metal Matrix Composites (HMMCs) Fabricated by Chill Casting Method. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2015, vol. 3, no. 3, pp. 1–8.
 2. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 416 p.
 3. Ostovan F., Matori K.A., Toozandehjani M., Oskoueian A., Yusoff H.M., Yunus R., Ariff A.M., Quah H.J., Lim W.F. Effects of CNTs content and milling time on mechanical behavior of MWCNT-reinforced aluminum nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, vol. 166, p. 160–166.
 4. Bunakov N.A., Golovanov V.N., Kozlov D.V., Potapov S.N., Klimov E.S. Obtaining a composite material of aluminum and carbon nanotubes by powder metallurgy method. *Sbornik materialov mezhdunarodnogo nauchnogo e-simpoziuma "Fiziko-matematicheskie metody i informatsionnye tekhnologii v estestvoznanii, tekhnike i gumanitarnykh naukakh*. Kirov, MTsNIP Publ., 2015, pp. 25–37.
 5. Raviathul B.M., Srivastava V.C., Mukhopadhyay N.K. Microstructural characteristics and mechanical properties of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites produced by ball milling. *Materials & Design*, 2014, vol. 64, pp. 542–549.
 6. Ci L., Ryu Z., Jin P.N.Y., Rühle M. Investigation of the interfacial reaction between multi-walled carbon nanotubes and aluminum. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, no. 20, pp. 5367–5375.
 7. Choi H., Shin J., Min B., Park J., Bae D. Reinforcing effects of carbon nanotubes in structural aluminum matrix nanocomposites. *Journal of Materials Research*, 2011, vol. 24, no. 8, pp. 2610–2616.
 8. Yang C., Zong Y., Zheng Z., Shan D. Experimental and theoretical investigation on the compressive behavior of aluminum borate whisker reinforced 2024Al composites. *Materials Characterization*, 2014, vol. 96, pp. 84–92.
 9. Hassan M.T.Z., Esawi A.M.K., Metwalli S. Effect of carbon nanotube damage on the mechanical properties of aluminum-carbon nanotube composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 607, pp. 215–222.
 10. Yoo S.J., Han S.H., Kim W.J. Strength and strain hardening of aluminum matrix composites with randomly dispersed nanometer-length fragmented carbon nanotubes. *Scripta Materialia*, 2013, vol. 68, no. 9, pp. 711–714.
 11. Wang L., Choi H., Myoung J.M., Lee W. Mechanical alloying of multi-walled carbon nanotubes and aluminum powders for the preparation of carbon/metal composites. *Carbon*, 2009, vol. 47, no. 15, pp. 3427–3433.
 12. Zhu X., Zhao Y.G., Wu M., Wang H.Y., Jiang Q.C. Effect of Initial Aluminum Alloy Particle Size on the Damage of Carbon Nanotubes during Ball Milling. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 3–18.
 13. Nayan N., Murty S.V.S.N., Sharma S.C., Kumar K.S., Sinha P.P. Calorimetric study on mechanically milled aluminum and multiwall carbon nanotube composites. *Materials Characterization*, 2011, vol. 62, no. 11, pp. 1087–1093.
 14. Kukovec A., Kanyo T., Konya Z., Kiricsi I. Long-time low-impact ball milling of multi-wall carbon nanotubes. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 5, pp. 994–1000.
 15. Nam H.R., Kim Y.J., Yang S.S., Ahn J.H. Ball-Milling of Graphite and Multi-Wall Carbon Nanotubes. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, vol. 14, no. 12, pp. 9103–9107.
 16. Narayanan S.S., Manickavasaham G., Moorthy S. Experimental Investigation of Aluminium alloy with MWCNT Composite to increase the technical Properties by Stir Casting Method. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2015, vol. 12, no. 4 (II), pp. 30–34.
 17. Vetkasov N.I., Kapustin A.I., Sapunov V.V. The formation of phase composition, structural parameters and physical-mechanical properties of composite granules in the process of mechanical alloying of aluminium allotropic forms of carbon. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 12, pp. 7–11.
 18. Vetkasov N.I., Kapustin A.I., Sapunov V.V. The study of the process of mechanical alloying of aluminum by nano-dimensional allotropic modifications of carbon. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 24–34.
 19. Lopatina Yu.A., Kurganova Yu.A. Analysis of the hardness measurement of composite materials of the Al + SiC system. *III mezhdunarodnaya nauchnaya shkola molodezhi "Materialovedenie i metallofizika legkikh splavov"*. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2014, pp. 76–80.
 20. Vetkasov N.I., Kapustin A.I., Sapunov V.V. Experimental study of the process of mechanical alloying of aluminum by technical carbon. *Sbornik statey*

Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Teoreticheskie i prakticheskie aspekty razvitiya nauchnoy mysli v sovremennom mire". Ufa, AETERNA Publ., 2017, part 2, pp. 18–21.

21. Gigiberiya V.A., Ar'ev I.A., Lebovka N.I. The stability of suspensions of multiwalled carbon nanotubes in organic solvents in the presence of Triton X-165. *Colloid journal*, 2012, vol. 74, no. 6, pp. 663–667.

THE DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE PROCESS OF PRELIMINARY FORMATION OF THE HIGH-HOMOGENEOUS DRY MIXTURE "ALUMINUM POWDER – SINGLE-WALL CNT" IN THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF THE ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES

© 2018

N.I. Vetkasov, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair "Mechanical Engineering"

A.I. Kapustin, Head of Laboratory

V.V. Sapunov, PhD (Engineering), assistant professor of Chair "Mechanical Engineering"

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: composite material; aluminum; carbon nanotubes; mechanical alloying; composite pellets; normalization of charge.

Abstract: The paper considers the problem of synthesis of nanocomposites based on the aluminum matrices reinforced with carbon nanotubes with the high physicomechanical properties, as related to the achievement of a homogeneous dispersion of carbon nanotubes in the aluminum matrix of a composite. The authors developed the principles of the technology of preparation and determined the requirements for the parameters of the so-called normalized charge (a highly homogeneous dry mixture "aluminum powder – single-wall carbon nanotubes") intended for the efficient synthesis of composite granules by the mechanical alloying.

Aluminum primary dispersed powder PAD-1 and the single-wall carbon nanotubes TUBALL were used as the raw materials, and the stearic acid was used as a process control agent. The processes of normalization and mechanical alloying were carried out in the mechanical reactor of the author's design. The derived composite pellets were exposed to cold and then to hot compaction. The paper shows the effectiveness of the new approach proposed by the authors to the implementation of effective reinforcement of the aluminum matrix powder by the nanotubes. This approach is based on the provision of effective dispersion of carbon nanotubes into alloyed matrix material by introducing the special technological operation – "normalization" of charge – in the technology of synthesis of composite granules, which are the semi-finished material for the production of a composite material with the high physical and technical characteristics.

The paper presents data on the strength parameters of the semi-finished aluminum matrix composites, which were produced using a normalized charge. It is shown that the application of the developed technology for charge normalization provides the increase in the strength characteristics of semi-finished composite materials by at least 25 % compared with the technologies without the application of normalization. The results obtained during the research can be used when improving the technologies of production of the aluminum matrix composites.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА РЕЖИМЫ РАЗГОНА ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ЕГО ЦЕНТРА МАСС

© 2018

Л.Ю. Ворочаева, кандидат технических наук,
доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники
С.И. Савин, кандидат технических наук,
старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники
Юго-Западный государственный университет, Курск (Россия)

Ключевые слова: прыгающий робот; режимы разгона; время разгона; система управления; траектория центра масс.

Аннотация: Особенностью всех робототехнических систем, движущихся с периодическим отрывом от опорной поверхности, является наличие фазы полета, во время которой управлять движением робота и корректировать его траекторию крайне проблематично. Поэтому актуальной является задача обеспечения движения устройства во время разгона и его отрыва от поверхности с такими параметрами, чтобы система вела себя корректно во время полета. В данной работе эта задача решается путем формирования желаемой траектории центра масс робота во время разгона устройства.

Робот состоит из корпуса и разгонного модуля, образованного тремя звеньями, два из которых представляют поступательную пару, а другие соединены между собой и с корпусом посредством вращательных шарниров. Траектория центра масс робота во время разгона формируется таким образом, чтобы за требуемое время было достигнуто определенное численное значение скорости, вектор которой направлен под заданным углом к горизонту. Для обеспечения такой траектории движения разработана система управления с регулятором, построенным на линейном квадратичном программировании.

В результате проведенного численного моделирования установлено наличие шести режимов разгона при варьировании управляющих параметров: во время одних робот контактирует с поверхностью в двух опорных точках, которые либо неподвижны, либо скользят по поверхности; во время других происходит отрыв одной из двух опорных точек или опрокидывание устройства (в случае, когда отрыв точки опоры происходит в первые моменты разгона). Построены диаграммы режимов разгона, которые могут использоваться для определения диапазонов допустимых параметров прыгающего робота для осуществления разгона в требуемом режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Многозвенные механизмы, движение которых сопряжено с периодической потерей контакта с опорной поверхностью, представляют как теоретический, так и практический интерес [1–3]. Среди таких механизмов можно особо выделить устройства, перемещающиеся посредством прыжков [4; 5]. В отличие от шагающих механизмов, сохраняющих контакт с опорной поверхностью в каждый момент времени, движение прыгающих роботов включает фазу полета, на протяжении которой возможности коррекции траектории робота ограничены [6–9]. В связи с этим особенно важным является точное управление роботом на протяжении фазы разгона и отрыва от опорной поверхности.

Данная задача усложняется тем, что характер отрыва от опорной поверхности зависит от динамики робота в процессе разгона: отрыв может начаться с обнуления одной или более нормальных реакций в точках контакта с опорной поверхностью или с проскальзывания робота вдоль опорной поверхности. Временной промежуток между началом отрыва от опорной поверхности и полной потерей контакта с ней также может варьироваться и зависит от динамики устройства. Это указывает на важность решения задачи управления прыгающим роботом на этапе разгона не только с точки зрения обеспечения заданной траектории движения центра масс, но и с позиции управления характером отрыва робота от опорной поверхности.

Задача управления многозвенным механизмом, осуществляющим периодическое контактное взаимодей-

ствие с опорной поверхностью, включает в себя следующие подзадачи: определение желаемых последовательностей точек контакта, задание желаемых траекторий звеньев или отдельных точек робота, определение задающих воздействий для системы управления роботом (решение обратной задачи кинематики), синтез и настройка регулятора. В этой работе остановимся на одной из этих подзадач – определении желаемой траектории движения центра масс робота.

Цель работы – выявление зависимостей между управляемыми параметрами, характеризующими разгон робота (направление скорости центра масс в процессе разгона и задаваемая желаемая скорость центра масс в момент отрыва), и характеристиками получаемого движения робота (время и режим отрыва от опорной поверхности).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРЫГАЮЩЕГО РОБОТА

В работе рассматривается прыгающий робот (рис. 1), состоящий из стопы 1, звеньев разгонного модуля 2 и 3 и корпуса 4 [10–12]. Движение робота происходит в вертикальной плоскости *Oxy*; поверхность, с которой осуществляется прыжок, является горизонтальной твердой шероховатой. Будем считать, что звенья стопы и разгонного модуля представляют собой абсолютно твердые стержни длинами l_i , а корпус имеет форму прямоугольника с размерами $a \times b$. Центры масс звеньев – точки C_i – одновременно являются и центрами их симметрии. Особенностью исследуемого робота является

то, что он симметричен относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс корпуса.

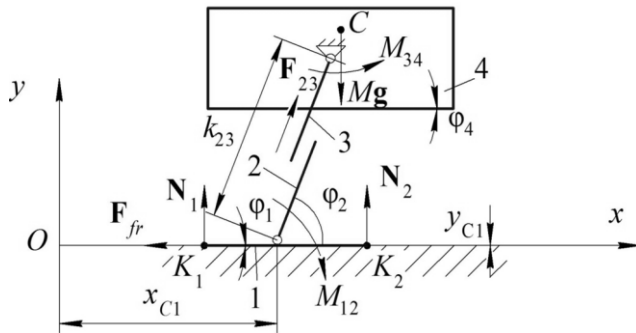


Рис. 1. Расчетная схема прыгающего робота

Звенья стопы и разгонного модуля, разгонного модуля и корпуса соединены между собой парами вращательного движения с установленными в них приводами, генерирующими моменты M_{12} и M_{34} , а непосредственно звенья разгонного модуля – парой поступательного движения с соответствующим приводом и создаваемой им силой F_{23} . Центр масс робота расположен в точке C с координатами $C(x_C, y_C)$, равными

$$x_C = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i x_{Ci}}{\sum_{i=1}^4 m_i},$$

$$y_C = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i y_{Ci}}{\sum_{i=1}^4 m_i}.$$

Масса робота

$$M = \sum_{i=1}^4 m_i.$$

В качестве обобщенных координат прыгающего робота будем рассматривать координаты x_{C1} и y_{C1} центра масс стопы, абсолютные углы поворота звеньев ϕ_1, ϕ_2 и ϕ_4 относительно оси Ox , отсчитываемые против часовой стрелки, а также длину разгонного модуля k_{23} . Вектор обобщенных координат q имеет вид:

$$q = (\phi_1, x_{C1}, y_{C1}, \phi_2, k_{23}, \phi_4)^T.$$

Взаимодействие робота с поверхностью осуществляется двумя крайними точками стопы – K_1 и K_2 . При этом положим, что в обеих точках возникают нормальные реакции N_1 и N_2 , а в одной точке K_1 – сила трения F_{fr} , описываемая моделью Кулона [13; 14].

$$F_{fr} = \begin{cases} -fN_1 \operatorname{sgn}(v_{K1}), & \text{если } v_{K1} \neq 0; \\ -F_0, & \text{если } v_{K1} = 0, |F_0| \leq fN_1; \\ -fN_1 \operatorname{sgn}(F_0), & \text{если } v_{K1} = 0, |F_0| > fN_1. \end{cases}$$

где F_0 – горизонтальная проекция равнодействующей всех сил, кроме силы сухого трения, приложенных к точке контакта;

f – коэффициент трения скольжения;

N_1 – нормальная реакция в точке K_1 ;

v_{K1} – скорость точки K_1 .

Здесь рассматривается случай, когда сила трения действует лишь в одной точке контакта. Это позволяет решить задачу определения реакций опоры аналитически, получив одно возможное решение. В общем случае силы трения могут действовать в нескольких точках контакта или быть распределенными.

РЕЖИМЫ РАЗГОНА

Разгон робота осуществляется следующим образом. В начальный момент разгона робот находится в положении, аналогичном показанному на рис. 1, $\phi_2=90^\circ$. Разгон происходит за счет движения поступательной пары под действием силы F_{23} , при этом разгонный модуль поворачивается моментом M_{12} на требуемый угол ϕ_2^0 осуществления прыжка, а корпус разворачивается моментом M_{34} таким образом, чтобы его ориентация относительно поверхности оставалась неизменной, т. е. $\phi_4=0$. Разгон осуществляется в течение интервала времени t_r , к моменту завершения которого поступательная пара достигает своей наибольшей длины $k_{23} = k_{23}^{\max}$, центр масс приобретает скорость v_C , вектор которой направлен под углом θ_C к оси Ox . После этого происходит удар звеньев робота друг о друга и отрыв устройства от поверхности. В данной работе рассматривается движение робота от начала разгона до момента удара звеньев.

Разгон робота может происходить как при контакте с поверхностью двух опорных точек, так и при отрыве одной из них, причем контактные точки могут оставаться неподвижными или скользить вдоль опорной поверхности. Возможные режимы разгона приведены на рис. 2.

В таблице 1 приведены условия осуществления каждого из режимов разгона робота, а также связи, накладываемые при этом на систему, и вектор обобщенных координат.

Будем считать, что в случае, когда происходит отрыв точки K_1 , точка приложения силы трения перемещается в оставшуюся контактную точку K_2 (рис. 3).

Запишем формулы для вычисления нормальных реакций и проекции равнодействующей всех сил на ось Ox для рассмотренных вариантов разгона.

При двух контактных точках (режимы 1 и 2) нормальные реакции вычисляются по формулам [15]:

$$N_1 = Mg \frac{x_{K1K2} - x_{CK1}}{x_{K1K2}} - \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{y}_{Ci} \frac{x_{K1K2} - x_{CiK1}}{x_{K1K2}} - \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{x}_{Ci} \frac{y_{CiK1}}{x_{K1K2}},$$

$$N_2 = \frac{1}{x_{K1K2}} \left(Mg x_{CK1} + \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{x}_{Ci} y_{CiK1} - \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{y}_{Ci} x_{CiK1} \right),$$

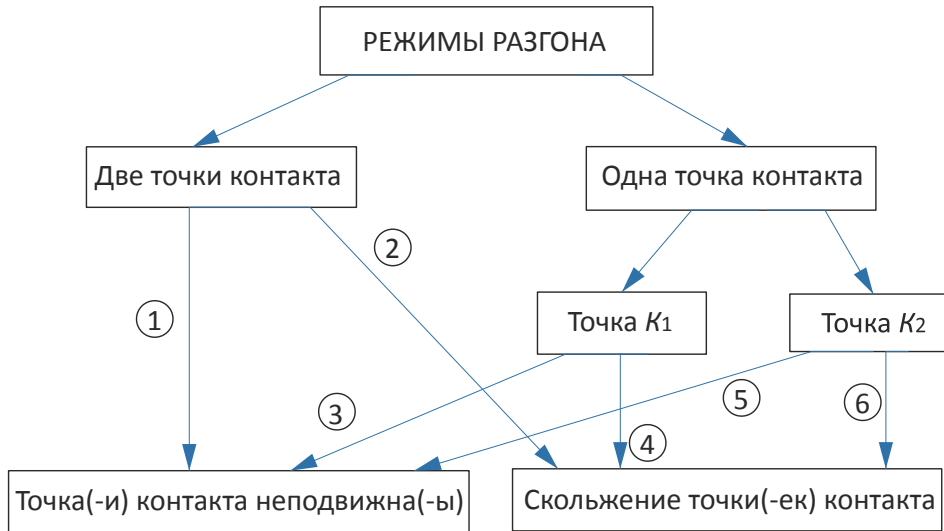


Рис. 2. Возможные режимы разгона прыгающего робота

Таблица 1. Режимы разгона прыгающего робота

1. Разгон при двух неподвижных точках контакта		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 \leq fN_1)$	$x_{C1} = \text{const}, y_{C1} = \text{const}, \varphi_1 = \text{const}$	$\mathbf{q} = (\varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
2. Разгон при двух точках контакта, скользящих по поверхности		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 > fN_1)$	$y_{C1} = \text{const}, \varphi_1 = \text{const}$	$\mathbf{q} = (x_{C1}, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
3. Разгон при одной неподвижной точке контакта K_1		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 = 0) \wedge (F_0 \leq fN_1)$	$x_{K1} = \text{const}, y_{K1} = \text{const}, x_{C1} = f(\varphi_1), y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
4. Разгон при одной точке контакта K_1 , скользящей по поверхности		
$(N_1 > 0) \wedge (N_2 = 0) \wedge (F_0 > fN_1)$	$y_{K1} = \text{const}, y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, x_{C1}, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
5. Разгон при одной неподвижной точке контакта K_2		
$(N_1 = 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 \leq fN_2)$	$x_{K2} = \text{const}, y_{K2} = \text{const}, x_{C1} = f(\varphi_1), y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$
6. Разгон при одной точке контакта K_2 , скользящей по поверхности		
$(N_1 = 0) \wedge (N_2 > 0) \wedge (F_0 > fN_2)$	$y_{K2} = \text{const}, y_{C1} = f(\varphi_1)$	$\mathbf{q} = (\varphi_1, x_{C1}, \varphi_2, k_{23}, \varphi_4)^T$

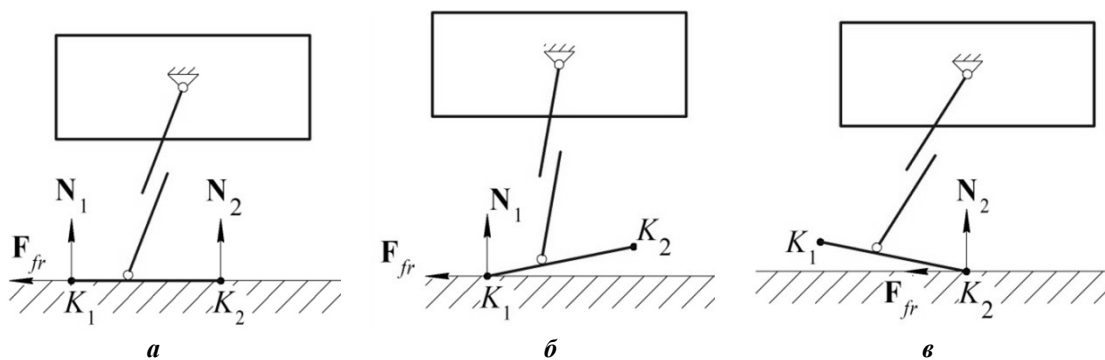


Рис. 3. Варианты контактного взаимодействия стопы робота с опорной поверхностью: а – две точки контакта; б – одна точка контакта K_1 ; в – одна точка контакта K_2

где \ddot{x}_{Ci} , \ddot{y}_{Ci} – проекции ускорения центра масса i -го звена на оси Ox и Oy ;

x_{K1K2} , x_{CK1} , x_{CK1} – расстояния между точками K_2 , C , C_i и K_1 вдоль оси Ox ;

y_{CK1} – расстояния между точками C_i и K_1 вдоль оси Oy .

Сила трения покоя $F_{fр}$ записывается следующим образом:

$$F_{fр} = \sum_{i=3}^4 m_i \ddot{x}_{Ci}.$$

При одной точке контакта K_1 (режимы 3 и 4) или K_2 (режимы 5 и 6) получим

$$N_1(N_2) = Mg - \sum_{i=1}^4 m_i \ddot{y}_{Ci},$$

сила трения покоя $F_{fр}$ при этом вычисляется по ранее приведенной формуле.

Приведенные режимы разгона робота можно сгруппировать следующим образом:

- 1) разгон при неподвижно расположенной на поверхности стопе;
- 2) разгон при скольжении стопы по поверхности;
- 3) разгон при отрыве точки K_1 стопы от поверхности;
- 4) разгон при отрыве точки K_2 стопы от поверхности.

Приемлемыми для реализации будем считать только те режимы разгона, при которых контакт стопы с поверхностью происходит в двух точках, так как в противном случае робот может неконтролируемо менять свою ориентацию до отрыва от поверхности, причем точное измерение его ориентации в таком режиме движения становится относительно сложной задачей. Отсутствие или наличие скольжения робота при одной точке контакта с поверхностью в данном случае несущественно, поэтому при проведении моделирования разгона робота будем отслеживать именно эти четыре режима разгона.

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Определение задающих воздействий

Рассмотрим случай, когда желаемая траектория центра масс робота задана полиномиальной функцией:

$$\mathbf{r}_C^*(t) = \begin{bmatrix} \sum_{p=1}^n a_{p,x} t^p \\ \sum_{p=1}^n a_{p,y} t^p \end{bmatrix},$$

где $a_{i,x}$, $a_{i,y}$ – постоянные коэффициенты.

Эти коэффициенты будем находить, используя два краевые условия: заданное начальное положение центра масс $\mathbf{r}_C^*(0)$ и заданную конечную скорость центра масс $\dot{\mathbf{r}}_C^*(t_f)$, которую будем задавать ее модулем v_C и ориентацией θ_C :

$$\dot{\mathbf{r}}_C^*(t_f) = \begin{bmatrix} v_C \cos \theta_C \\ v_C \sin \theta_C \end{bmatrix}.$$

Для нахождения временных зависимостей обобщенных координат, позволяющих реализовать желаемую траекторию центра масс робота, будем использовать алгоритмы решения обратной задачи кинематики, описанные в работе [16]. Решением обратной задачи кинематики являются желаемые временные зависимости обобщенных координат $\mathbf{q}^*(t)$, использующиеся в качестве задающих воздействий системой автоматического управления. Рис. 4 а показывает временные зависимости $\mathbf{q}^*(t)$ для случая, когда $v_C=3$ м/с, $t_f=2$ с, $\alpha\theta_C=88^\circ$.

Из рис. 4 а видно, что основной объем движения производится линейным приводом разгонного модуля (зависимость $q_4(t)$) и приводом поворота разгонного модуля относительно стопы (зависимость $q_5(t)$). Обе кинематические пары реализуют движение с ненулевым начальным ускорением; движения такого типа создают повышенные требования к быстродействию системы управления, в частности, они требуют возможности быстрого изменения управляющих воздействий.

Описание регулятора

На этапе разгона рассматриваемый робот представляет собой механическую систему с контактным взаимодействием с опорной поверхностью, что означает, что на его уравнения движения наложены механические связи. В данном случае будем полагать, что уравнения движения робота записаны с использованием набора обобщенных координат \mathbf{q} , а механические связи заданы в явном виде. Для того чтобы управлять такими механическими системами, разработан ряд методов, некоторые из которых приведены в работах [17; 18]. Одним из удобных подходов к управлению такими системами является использование модификаций линейного квадратичного регулятора [19; 20]. Здесь будем использовать регулятор такого типа. Общий вид регулятора представлен выражением

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* - \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{q} - \mathbf{q}^* \\ \dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}^* \end{bmatrix},$$

где \mathbf{u}^* – значение управляющего воздействия, получаемое решением обратной задачи динамики;

\mathbf{K} – матрица коэффициентов регулятора, получаемая решением алгебраического уравнения Риккати, преобразованного с учетом действия механических связей [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Анализ работы системы управления

Рассмотрим результаты численного моделирования движения робота. На рис. 4 б приведены временные зависимости обобщенных координат $\mathbf{q}(t)$, найденные в результате математического моделирования.

Сравнивая результаты, показанные на рис. 4 а и 4 б, можно сделать вывод, что система управления обрабатывает задающие воздействия достаточно точно. При этом следует заметить, что результаты, показанные на рис. 4 б, охватывают лишь часть временного промежутка, показанного на рис. 4 а. Это связано с тем, что моделирование прерывается, как только робот начинает осуществлять отрыв от поверхности, что происходит до того, как центр масс робота обрабатывает всю заданную для него траекторию.

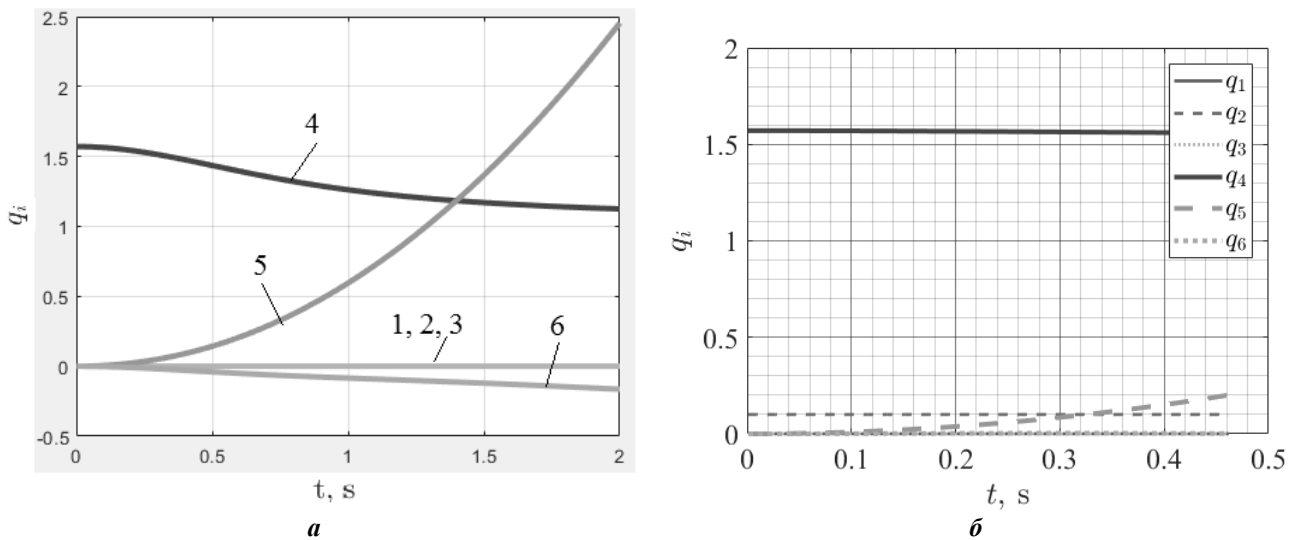


Рис. 4. Временные зависимости обобщенных координат:

a – полученные решением обратной задачи кинематики, номер графика соответствует индексу обобщенной координаты; *б* – полученные путем численного интегрирования уравнений движения устройства

Исследование режимов разгона

Рассмотрим, как параметры v_c и θ_c влияют на время T разгона робота, под которым будем понимать время, необходимое устройству для полного раздвижения поступательной пары, или обнуления одной из двух нормальных реакций в контактных точках, или появления проскальзывания опор по поверхности, что может быть записано следующим образом:

$$t = T, (k_{23} = k_{23}^{\max}) \vee (N_1 = 0) \vee (N_2 = 0) \vee (|F_{fr}| > F_0).$$

На рис. 5 *a–в* и рис. 6 *a–в* показаны зависимости $T(\theta_c)$ при трех значениях скорости v_c для двух различных вариантов времени t_r , в течение которого эта скорость должна быть достигнута, а также для двух значений длины стопы l_1 . А на рис. 5 *г–е* и рис. 6 *г–е* показаны режимы разгона робота, где приняты следующие обозначения:

- 1 – разгон при двух точках опоры стопы без проскальзывания;
- 2 – разгон при двух точках стопы с проскальзыванием;
- 3 – разгон при отрыве точки K_1 ;
- 4 – разгон при опрокидывании точки K_1 ;
- 5 – разгон при отрыве точки K_2 ;
- 6 – разгон при опрокидывании точки K_2 .

Опрокидыванием опорной точки будем называть обнуление ее нормальной реакции в начале разгона (на выбранном начальном временном промежутке $0 \leq t \leq 0,005$ с), а отрывом – обнуление нормальной реакции, возникающее после окончания начала разгона.

Отметим, что графики рис. 5, рис. 6 симметричны относительно угла $\theta_c = 90^\circ$; это означает, что при прыжке влево и вправо вдоль оси Ox робот во время разгона ведет себя одинаково, что обусловлено симметричностью его конструкции относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс корпуса.

По приведенным графикам видно, что при малой длине стопы и малом времени t_r при очень узком диапа-

зоне углов $\theta_c \approx 90^\circ$ разгон завершается при $T \approx 0,4$ с при выполнении условия $k_{23} = k_{23}^{\max}$, причем по мере роста скорости центра масс это время сокращается: $T > 0,4$ с при $v_c = 3$ м/с; $T = 0,4$ с при $v_c = 4$ м/с; $T < 0,4$ с при $v_c = 5$ м/с. При диапазонах углов $10^\circ \leq \theta_c \leq 70^\circ$ и $\approx 110^\circ \leq \theta_c \leq 170^\circ$ время разгона $T = 0$ с. Это означает, что, как только робот начинает движение, происходит обнуление одной из нормальных реакций (при $10^\circ \leq \theta_c \leq 70^\circ$ – реакции N_1 , а при $\approx 110^\circ \leq \theta_c \leq 170^\circ$ – реакции N_2) и опрокидывание устройства. Это обусловлено малым временем достижения скорости v_c , приводящим к большим значениям угловой скорости $\dot{\phi}_2$, а также низкой устойчивостью робота за счет малой длины стопы. Диапазон углов θ_c , при которых наблюдается опрокидывание робота, расширяется по мере увеличения значения v_c . В оставшихся диапазонах углов время разгона мало и при приближении θ_c к 90° плавно возрастает до $0,5$ – 1 с, в этих случаях разгон завершается также при обнулении одной из двух нормальных реакций, но не мгновенно, что подтверждается графиками режимов разгона на рис. 5 *г–е*.

Режим проскальзывания в данном случае отсутствует, но при увеличении времени t_r и длины стопы l_1 появляется и наблюдается при малых углах наклона вектора v_c к горизонту, что видно по рис. 6. Помимо этого соответствующие графики иллюстрируют, что увеличение времени, необходимого для достижения скорости v_c , и уменьшение ее значения приводят к тому, что режимы опрокидывания и отрыва контактных точек перестают существовать, а режим разгона робота при двух неподвижных точках опоры наблюдается при более широком диапазоне углов θ_c . При $v_c = 1$ м/с этот диапазон составляет $10^\circ \leq \theta_c \leq 170^\circ$, при $v_c = 2$ м/с – $20^\circ \leq \theta_c \leq 160^\circ$, а при $v_c = 3$ м/с – $30^\circ \leq \theta_c \leq 150^\circ$, т. е. данный диапазон углов незначительно сокращается по мере увеличения значения v_c .

Для большей наглядности зависимостей режимов разгона робота от значений управляющих параметров,

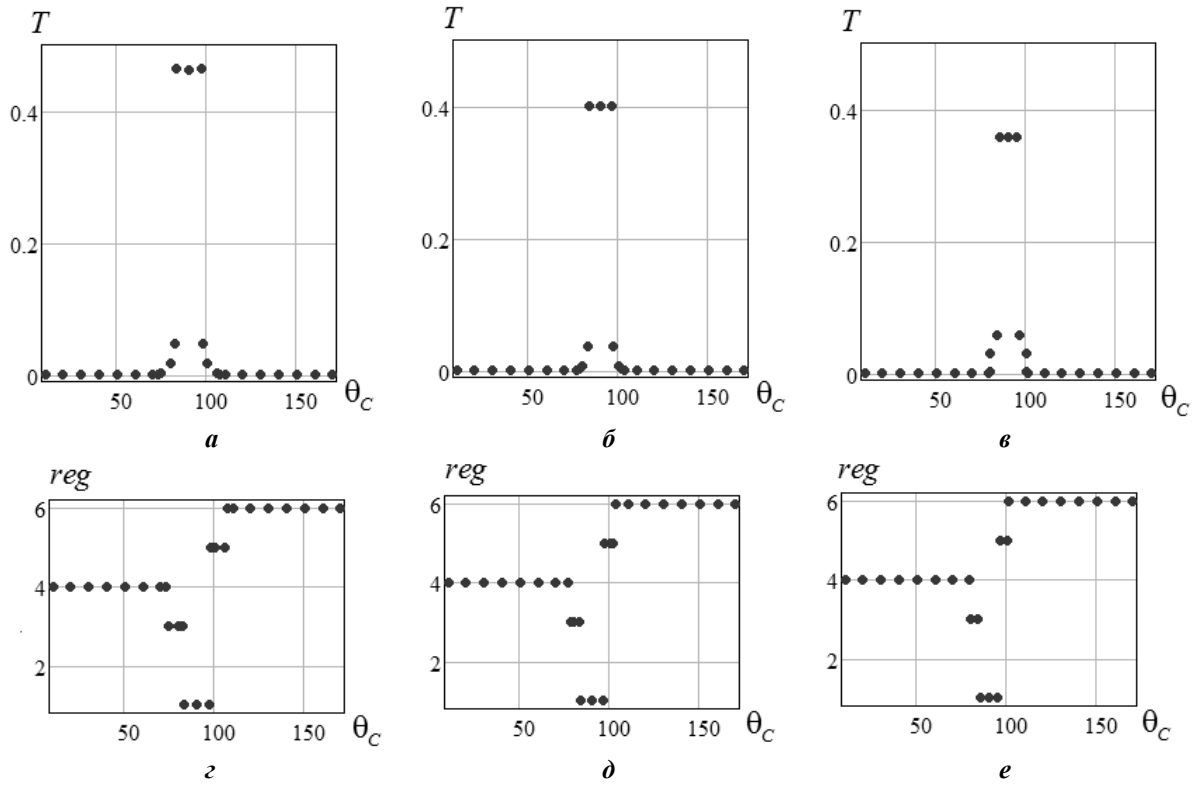


Рис. 5. Результаты математического моделирования при $t_r=2$ с, $l_1=0,1$ м:
 а-в – графики $T(\theta_C)$; г-е – режимы разгона; а, г – $v_C=3$ м/с; б, д – $v_C=4$ м/с; в, е – $v_C=5$ м/с

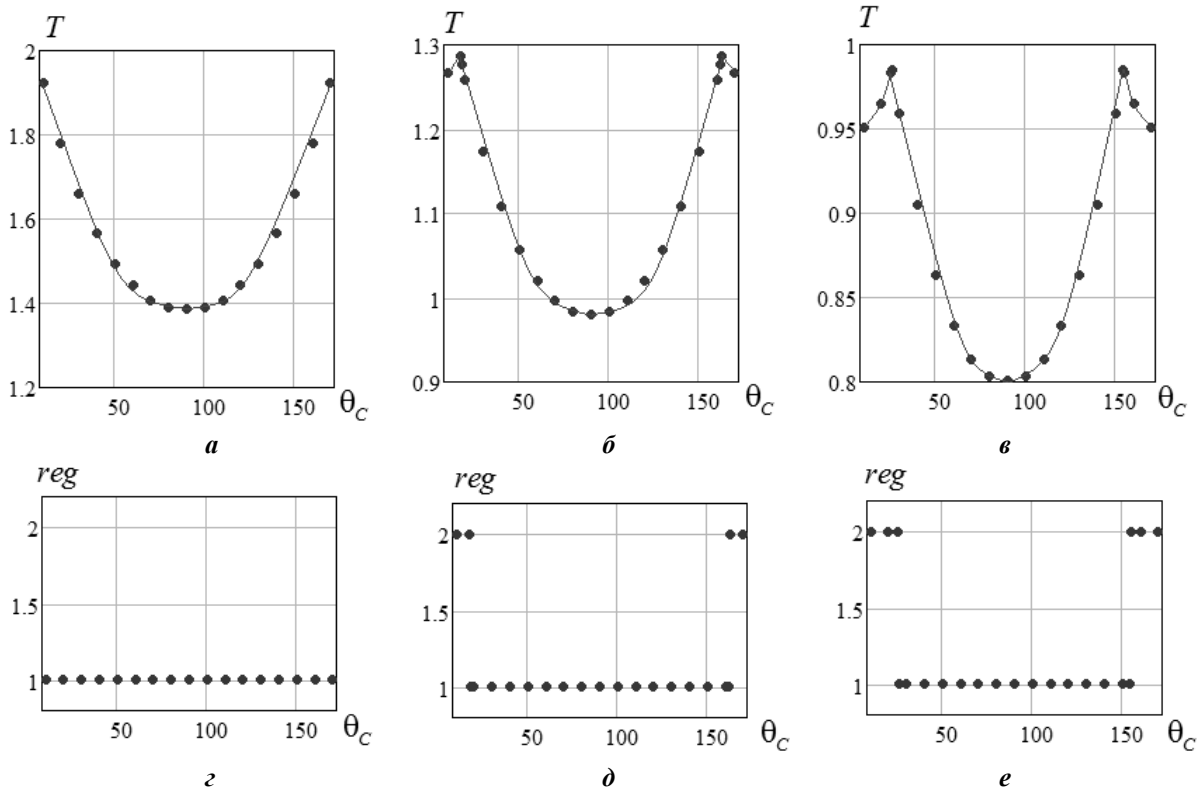


Рис. 6. Результаты математического моделирования при $t_r=6$ с, $l_1=0,4$ м:
 а-в – графики $T(\theta_C)$; г-е – режимы разгона; а, г – $v_C=1$ м/с; б, д – $v_C=2$ м/с; в, е – $v_C=3$ м/с

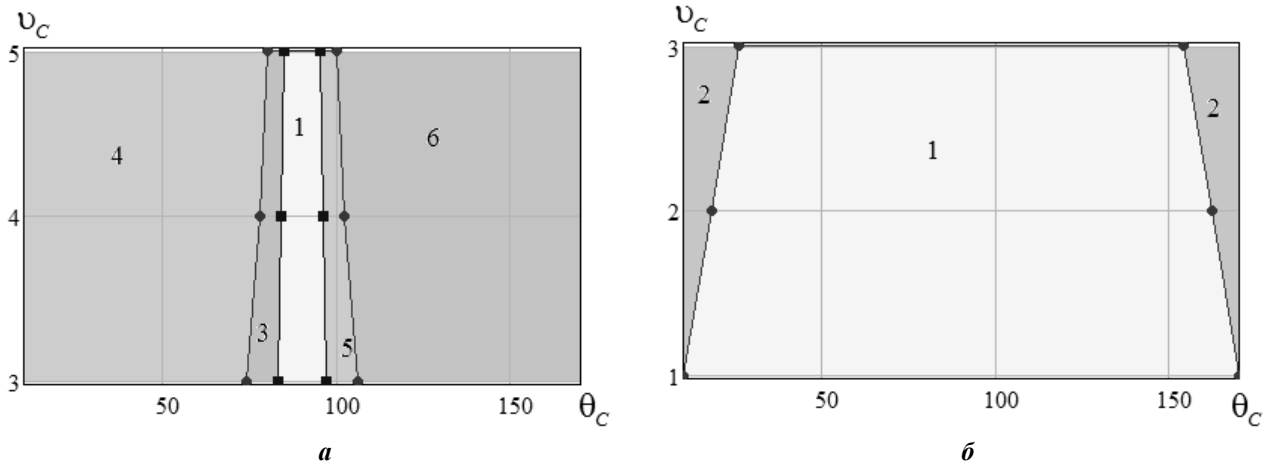


Рис. 7. Диаграммы режимов разгона $v_C(\theta_C)$: а – $t_r=2$ с, $l_1=0,1$ м; б – $t_r=6$ с, $l_1=0,4$ м

к которым относятся значение скорости v_C , угол θ_C наклона ее вектора к горизонту, а также время t_r достижения этой скорости, на рис. 7 представлены диаграммы режимов разгона.

Данные диаграммы будут востребованы при определении областей допустимых параметров робота, при которых его разгон происходит без отрыва одной из контактных точек или при отсутствии проскальзывания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Для реализации управляемого движения прыгающих роботов важно иметь возможность управлять режимами их разгона. В работе было продемонстрировано, что режимы контактного взаимодействия прыгающих роботов и опорной поверхности могут меняться в зависимости от выбранных параметров разгона. Удалось установить области параметров разгона робота (желаемой скорости центра масс и угла, задающего направление этой скорости), реализующие различные режимы контактного взаимодействия. Одним из важных результатов является то, что область параметров, реализующих режим разгона при наличии двух точек опоры стопы без проскальзывания, в значительной степени зависит от выбора длины стопы, а также от выбора времени разгона. Это указывает на то, что выбор конструктивных параметров и параметров системы управления прыгающего робота может производиться путем задания таких значений этих величин, которые бы обеспечивали требуемую форму областей параметров разгона. При некорректном выборе длины стопы или времени разгона область параметров, соответствующая желаемому режиму работы робота, может стать слишком малой для реализации прыжков в заданном направлении. Также удалось установить зависимость между моментом отрыва робота и величиной и направлением желаемой скорости центра масс в момент отрыва. Данная зависимость имеет гладкий участок и точки разрыва, причем положение этих точек также связаны с упомянутыми выше конструктивными параметрами робота и параметрами его системы управления.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 18-31-00075.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovač M., Fuchs M., Guignard A., Zufferey J.C., Floreano D. A miniature 7g jumping robot // Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2008. P. 373–378.
2. Zaitsev V., Gvirzman O., Hanan U.B., Weiss A., Ayali A., Kosa G. A locust-inspired miniature jumping robot // Bioinspiration & biomimetics. 2015. Vol. 10. № 6. P. 066012.
3. Niiyama R., Nagakubo A., Kuniyoshi Y. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system // Proceeding – IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2007. P. 2546–2551.
4. Noh M., Kim S.-W., An S., Koh J.-S., Cho K.-J. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots // IEEE Transactions on Robotics. 2012. Vol. 28. № 5. P. 1007–1018.
5. Kovač M., Fauria O., Zufferey J.C., Floreano D. The EPFL jumpglider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings // 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). 2011. P. 1503–1508.
6. Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю. Исследование высоты и дальности полета прыгающего робота с системой крыльев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 3. С. 116–123.
7. Яцун С.Ф., Рукавицын А.Н., Волкова Л.Ю. Исследование динамики управляемого прыжка робота // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4-5. С. 1355–1358.
8. Ворочаева Л.Ю., Яцун С.Ф. Математическое моделирование управляемого движения колесного пятизвенного прыгающего робота // Известия РАН. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 68–93.
9. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Моделирование движения многозвенного прыгающего робота и исследование его характеристик // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. № 4. С. 137–149.
10. Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф. Изучение влияния положения точки закрепления ноги прыгающего робота в корпусе на характер движения устройства // Нелинейная динамика. 2013. Т. 9. № 2. С. 327–342.

11. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Этапы движения четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 181. С. 109–118.
12. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 24. С. 86–92.
13. Bolotnik N., Pivovarov M., Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics and Control of a Two-Module Mobile Robot on a Rough Surface // *Mechanisms and Machine Science*. 2014. Vol. 22. P. 141–148.
14. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 191–216.
15. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.
16. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Методы управления движением шагающих внутритрубных роботов // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 1. С. 163–195.
17. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics // *Robotics: Science and Systems*. 2015. Vol. 11. P. 1–9.
18. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–6.
19. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints // *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2016. P. 63–68.
20. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of Constrained LQR for Control of Walking in-pipe Robots // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics). 2017. P. 1–6.
21. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Этапы движения четырехзвенного робота, перемещающегося с отрывом от поверхности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 181. С. 109–118.
22. Яцун С.Ф., Волкова Л.Ю., Ворочаев А.В. Исследование режимов разгона четырехзвенного прыгающего аппарата // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 24. С. 86–92.
23. Bolotnik N., Pivovarov M., Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics and Control of a Two-Module Mobile Robot on a Rough Surface // *Mechanisms and Machine Science*. 2014. Vol. 22. P. 141–148.
24. Ворочаева Л.Ю., Яцун А.С., Яцун С.Ф. Моделирование движения пятизвенного ползающего робота с управляемым трением по поверхности с препятствиями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 3. С. 191–216.
25. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.
26. Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Методы управления движением шагающих внутритрубных роботов // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5. № 1. С. 163–195.
27. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics // *Robotics: Science and Systems*. 2015. Vol. 11. P. 1–9.
28. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. P. 1–6.
29. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints // *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. 2016. P. 63–68.
30. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of Constrained LQR for Control of Walking in-pipe Robots // 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics). 2017. P. 1–6.
31. Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu. A study of the height and length of the jumping robot with a system of wings. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tehnologii*, 2016, no. 3, pp. 116–123.
32. Yatsun S.F., Rukavitsyn A.N., Volkova L.Yu. Research of the operated robot dynamics. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2012, vol. 14, no. 4-5, pp. 1355–1358.
33. Vorochaeva L.Yu., Yatsun S.F. Mathematical simulation of the controlled motion of the five-link wheeled jumping robot. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2015, vol. 54, no. 4, pp. 567–592.
34. Volkova L.Yu., Yatsun S.F. Simulation of motion of a multilink jumping robot and investigation of its characteristics. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2013, vol. 52, no. 4, pp. 637–649.
35. Volkova L.Yu., Yatsun S.F. Studying of regularities of movement of the jumping robot at various positions of a point of fixing of foot. *Nelineynaya dinamika*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 327–342.
36. Yatsun S.F., Loktionova O.G., Volkova L.Yu., Vorochaev A.V. Stages of movement of the four-link jumping robot. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2013, no. 181, pp. 109–118.
37. Jatsun S.F., Volkova L.Yu., Vorochaev A.V. Investigation of acceleration modes of the four-link jumping device. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 19, no. 24, pp. 86–92.
38. Bolotnik N., Pivovarov M., Zeidis I., Zimmermann K. Dynamics and Control of a Two-Module Mobile Robot on a Rough Surface. *Mechanisms and Machine Science*, 2014, vol. 22, pp. 141–148.
39. Vorochaeva L.Yu., Yatsun A.S., Yatsun S.F. Simulation of the motion of a five-link crawling robot with controlled friction on a surface having obstacles. *Journal of Computer and Systems Science International*, 2017, vol. 56, no. 3, pp. 527–552.
40. Zhuravlev V.F. *Osnovy teoreticheskoy mekhaniki* [Fundamentals of theoretical mechanics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2008. 304 p.
41. Savin S.I., Vorochaev L.Yu. Control methods for in-pipe walking robots. *Cloud of Science*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 163–195.
42. Caron S., Pham Q.-C., Nakamura Y. Leveraging Cone Double Description for Multi-contact Stability of Humanoids with Applications to Statics and Dynamics. *Robotics: Science and Systems*, 2015, vol. 11, pp. 1–9.
43. Savin S., Vorochaeva L. Nested quadratic programming-based controller for pipeline robots. *2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2017, pp. 1–6.
44. Mason S., Rotella N., Schaal S., Righetti L. Balancing and walking using full dynamics LQR control with contact constraints. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2016, pp. 63–68.
45. Savin S., Jatsun S., Vorochaeva L. Modification of Constrained LQR for Control of Walking in-pipe Robots. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” (Dynamics)*, 2017, pp. 1–6.

REFERENCES

1. Kovač M., Fuchs M., Guignard A., Zufferey J.C., Floreano D. A miniature 7g jumping robot. *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2008, pp. 373–378.
2. Zaitsev V., Gvirsmann O., Hanan U.B., Weiss A., Ayali A., Kosa G. A locust-inspired miniature jumping robot. *Bioinspiration & biomimetics*, 2015, vol. 10, no. 6, p. 066012.
3. Niiyama R., Nagakubo A., Kuniyoshi Y. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. *Proceeding – IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2546–2551.
4. Noh M., Kim S.-W., An S., Koh J.-S., Cho K.-J. Flea-inspired catapult mechanism for miniature jumping robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, vol. 28, no. 5, pp. 1007–1018.
5. Kovač M., Fauria O., Zufferey J.C., Floreano D. The EPFL jumpglider: A hybrid jumping and gliding robot with rigid or folding wings. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011, pp. 1007–1018.

**THE STUDY OF INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF MASS CENTER TRAJECTORY
OF A JUMPING ROBOT ON ITS ACCELERATION MODES**

© 2018

L.Yu. Vorochaeva, PhD (Engineering), assistant professor of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics

S.I. Savin, PhD (Engineering), senior researcher of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics

Southwest State University, Kursk (Russia)

Keywords: jumping robot; acceleration modes; acceleration time; control system; mass center trajectory.

Abstract: The characteristic property of all robotic systems moving with the repeated liftoff from the support surface is the flight phase when it is extremely difficult to control the movement of a robot and correct its trajectory. Therefore, it is relevant to ensure the movement of a device during acceleration and its liftoff from the surface with such parameters that the system behaves properly during the flight. The authors of the paper solved this issue by the formation of the desired trajectory of the robot's mass center during the acceleration of the device.

The robot consists of a body and acceleration module formed by three elements, two of which are a sliding pair and the other are connected to each other and to the body by means of rotary joints. The trajectory of the robot's mass center during the acceleration is formed in such a way that, during the required time, the certain numerical value of velocity is achieved, the vector of which is directed at the specified angle to the horizon. To provide such a trajectory of movement, the authors developed the control system with the controller built on the linear quadratic programming.

In the result of numerical simulation, six acceleration modes when varying the control parameters are determined: during some of them, a robot contacts the surface in two supporting points that are either stationary or sliding along the surface; during the other, the liftoff of one of the two supporting points or the tilting of the device (in the case when the liftoff of a supporting point takes place at the first moments of acceleration) takes place. The authors drew the diagrams of the acceleration modes that can be used to determine the ranges of permissible parameters of a jumping robot for accelerating in the required mode.

ОПЫТНЫЕ ПРОМЫСЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТРУБ НЕФТЯНОГО СОРТАМЕНТА

© 2018

М.А. Выбойщик, доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)
С.А. Князькин, кандидат технических наук,
начальник отдела промышленных испытаний
ООО «ИТ-Сервис», Самара (Россия)

Ключевые слова: нефтепромысловая среда; нефтегазопроводные трубы; насосно-компрессорные трубы; байпас; лифтовая колонна; механические свойства; коррозионная стойкость; водородное растрескивание; углекислотная коррозия; продукты коррозии.

Аннотация: Исчерпание существующих и введение новых месторождений приводит к постоянному увеличению коррозионной агрессивности добываемых сред, что повышает интенсивность разрушения нефтепромыслового оборудования. Для обеспечения достаточной работоспособности оборудования необходимы разработка и освоение новых сталей повышенной прочности и коррозионной стойкости. Требуется увеличение объема и разработки новых методик промышленных испытаний труб, только на основе таких испытаний можно получить надежные представления о механизмах и кинетике происходящих процессов коррозионно-механического разрушения и оценить работоспособность трубопроводных систем в реальных условиях эксплуатации определенного месторождения.

Приведены разработанные методики трех основных видов опытных промышленных испытаний: байпасные линии, периодический контроль лифтовых колонн и периодический контроль действующих трубопроводов. Характерной особенностью предложенных испытаний является системное проведение сравнительного анализа текущего состояния с состояниями до эксплуатации и предшествующих этапов испытаний. Для этого промышленные испытания сопровождаются обязательными дополнительными исследованиями, которые по функциональному назначению объединены в две группы. Первая группа характеризует исходное состояние металла и изменение его свойств после испытаний (химический и фазовый состав, структурное состояние металла, механические свойства, коррозионная стойкость). Вторая группа характеризует вызванные испытаниями коррозионные повреждения внутренней поверхности трубы (состояние внутренней поверхности; выявление преобладающего вида коррозионного разрушения; оценка скорости общей и локальной коррозии; фазовый, химический состав и морфология продуктов коррозии; микробиологические исследования).

Предложенные методики испытания позволяют получить наиболее полную информацию о работоспособности и кинетике развития разрушения труб в определенных условиях эксплуатации. В качестве примера приведены результаты сравнительных промышленных испытаний лифтовых колонн НКТ из новой стали 15Х5МФБЧ и из традиционных сталей 35Г2С и 35Г2Ф при эксплуатации на пяти месторождениях с разным составом добываемых сред.

ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение агрессивности добываемых сред и использование методов интенсивной добычи (закачка углекислого газа, термическая стимуляция паром и др.) ускоряют и локализуют процессы коррозионного разрушения, что значительно повышает удельную частоту отказов нефтепромыслового оборудования, которая, по данным добывающих компаний [1], в разы и десятки раз превышает допустимые показатели для трубопроводных систем. Не менее удручающее положение и с нефтедобывающим оборудованием. Для многих скважин срок эксплуатации насосно-компрессорных труб составляет 3–6 месяцев, происходят катастрофические разрушения и обрыв лифтовых колонн [2; 3].

Повышение работоспособности оборудования обычно достигается использованием материалов более высокой прочности и коррозионной стойкости в агрессивных нефтепромысловых средах. Разработка и создание таких материалов основывается на наличии представлений о кинетике происходящих процессов коррозионно-механического разрушения. Требуется большое количество лабораторных и промышленных исследований и испытаний. Вопрос осложняется тем, что результаты лабо-

раторных испытаний на стойкость к углекислотной коррозии в значительной степени зависят от особенностей используемых методик [4; 5] и не всегда дают значения, сопоставимые с другими лабораторными [6–8] и натурными испытаниями. Отсутствуют методики лабораторных испытаний сталей на стойкость в средах, насыщенных H_2S и CO_2 , и установившиеся представления о совместном воздействии водородного растрескивания и углекислотной коррозии [9–11]. Это обуславливает необходимость разработки методик и расширения базы промышленных испытаний, на результатах которых целесообразно базировать основные представления и принимаемые решения. На основе результатов многочисленных промышленных испытаний удалось разработать, внедрить [12–14] и запатентовать [15–17] новые перспективные стали (13ХФА, 08ХМФБЧА и 15Х5МФБЧ) для изготовления насосно-компрессорных и нефтегазопроводных труб повышенной прочности и коррозионной стойкости.

Цель работы – повышение эффективности испытаний по оценке работоспособности нефтепромысловых труб и достоверности получаемых результатов по механизму и кинетике развития разрушения металла в процессе эксплуатации.

ПРОВЕДЕНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Представлены три основных вида опытных промышленных испытаний (ОПИ) нефтегазопроводных труб (НГПТ) и насосно-компрессорных труб (НКТ): байпасные испытания НГПТ, периодический контроль состояния НКТ в процессе эксплуатации лифтовых колонн, контроль состояния действующих трубопроводов.

Опытные промышленные испытания, как правило, проводятся на месторождениях с высокой агрессивностью добываемых сред (содержащих H₂S, CO₂ и бактериальную зараженность) и используются для решения следующих задач:

- сравнительный анализ коррозионной стойкости труб, используемых в настоящее время, и труб из новых сталей;
- оценка срока безаварийной эксплуатации труб;
- выдача рекомендаций практического использования труб из новых марок сталей.

Промысловые испытания сопровождали обязательными дополнительными исследованиями, которые по функциональному назначению целесообразно объединить в две группы. Первая группа характеризует исходное состояние металла и изменение его свойств после испытаний и включает в себя следующие исследования:

- химический, фазовый состав и структурное состояние металла в исходном состоянии;
- механические свойства на растяжение и значения ударной вязкости;
- коррозионные характеристики (NACE TM 0284 и 0177, метод D) до и после испытаний;

– анализ изменения механических свойств, ударной вязкости и коррозионной стойкости металла, обусловленные испытаниями.

Вторая группа характеризует вызванные испытаниями коррозионные повреждения внутренней поверхности трубы и включает следующие исследования:

- анализ состояния внутренней поверхности трубы, выявление преобладающего вида коррозионного разрушения, оценка скорости общей и локальной коррозий;
- исследование фазового, химического составов и морфологии продуктов коррозии;
- микробиологические исследования.

Последовательность проведения и перечень обязательных исследований, сопровождающих ОПИ, показаны на рис. 1 на примере проведения байпасных испытаний.

Байпасные испытания

Байпасные испытания максимально приближены к реальным условиям эксплуатации определенного трубопровода. Испытательный полигон (стенд) состоит из действующего трубопровода, параллельно которому монтируется байпасная линия, составленная из последовательно расположенных исследуемых труб (катушек). В зависимости от конструкции стенда, действующий трубопровод и байпасная линия располагаются в горизонтальной или вертикальной плоскости. Типичный вид испытательного стенда (горизонтальное расположение линий) показан на рис. 2.

В зависимости от задачи испытаний в состав байпасной линии включали катушки из разных марок сталей или из одной стали, но в различном структурном состоянии.

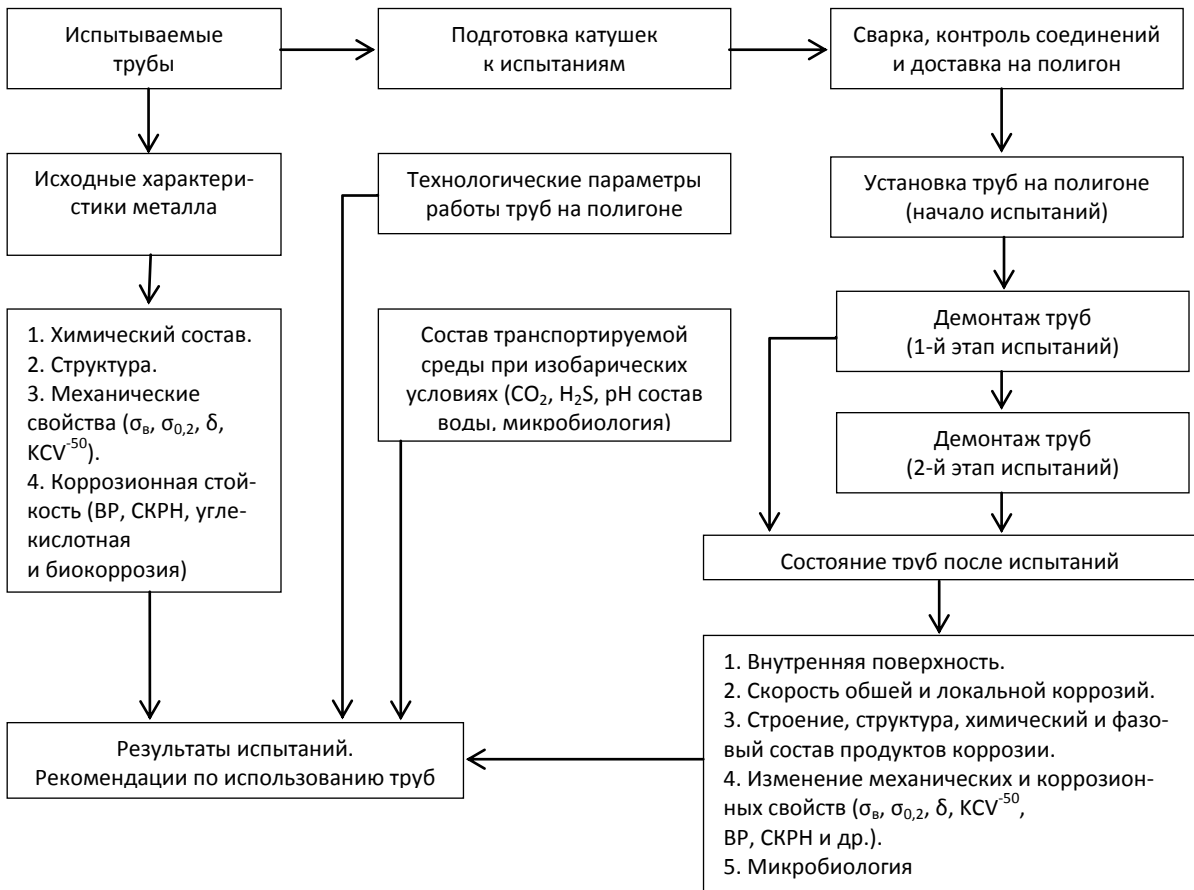


Рис. 1. Схема проведения промышленных испытаний труб (байпасные испытания)



Рис. 2. Байпасные испытания образцов труб (катушек) в составе напорного нефтепровода организации ООО «РН-Юганскнефтегаз»

Нами разработана специальная методика [18] проведения байпасных испытаний, содержащая последовательность проводимых работ, а также перечень необходимых дополнительных исследований из этой методики (рис. 1). Основными преимуществами байпасных испытаний труб являются соответствие параметров испытаний реальным условиям эксплуатации определенного трубопровода и возможность периодической смены образцов труб (катушек) без остановки трубопроводов. Однако из-за ограниченной протяженности объектов исследований (катушек) влияние структурной неоднородности и локальных дефектов труб не всегда проявляется.

Байпасные испытания были проведены на территории Коми, Поволжья, Западной Сибири и Ставропольского края в организациях ООО «РН-Юганскнефтегаз» (месторождения Мамонтовское, Приразломное и Правдинское); ООО «РН-Ставропольнефтегаз» (месторождение Озек-Суатское); ООО «Лукойл-Коми» (месторождение Усинское); ООО «Газпромнефть-Хантос»; ТПП «Лукойл-Усинскнефтегаз» (месторождение Вознесенское). Выбирали месторождения с наиболее агрессивной добываемой средой и промышленные трубопроводы, наиболее подверженные коррозионному разрушению (нефтеоборачивные коллекторы, выкидные линии).

Периодический контроль состояния НКТ в процессе эксплуатации

Разработана специальная методика, которая предусматривает использование действующих скважин для проведения периодического мониторинга состояния НКТ в реальных условиях эксплуатации [2; 19; 20]. От-

бор образцов НКТ производится в трех местах по высоте эксплуатируемой подвески (верх – устье, середина, низ – забой) и осуществляется в процессе текущих или капитальных ремонтов скважины, выбранной для проведения промышленных испытаний.

Перед проведением испытаний проводится выбор, оценка и описание условий испытаний, которая включает следующие позиции:

- физико-химические характеристики попутно добываемой воды pH, ионного состава (Ca^{2+} , $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$, Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-}), общей минерализации, содержания агрессивных компонентов – H_2S , CO_2 ;
- состав газовой фазы, на наличие коррозионно-агрессивных компонентов – H_2S , CO_2 ;
- биозараженность планктонными и прикрепленными формами коррозионно-опасных микроорганизмов;
- технологические параметры работы скважины (давление, температура, обводненность, газовый фактор, глубина спуска лифтовой колонны, глубина динамического уровня, количество добываемой жидкости, давление насыщения, количество взвешенных частиц и пр.) и геологии рабочих пластов;
- история эксплуатации лифтовых подвесок: состояние на момент спуска (новые, ремонтные), количество спускоподъемных операций, средний межремонтный период, средний общий срок наработки подвесок до их замены, причины ремонтов и замены подвесок, состояние глубинно-насосного оборудования, наличие (отсутствие) фактов сквозной коррозии лифтовой колонны;
- наличие (отсутствие) асфальтно-смоло-парафиновых отложений и применяемых методов интенсификации нефтеотдачи пластов;

- технологические факторы (растягивающие, изгибающие и вибрационные нагрузки);
- состояния НКТ текущей лифтовой подвески по глубине скважины.

Следующим этапом проведения испытаний является формирование базы сравнения, представляющей комплекс данных, характеризующих свойства, структуру и состояние НКТ подвески, перед ее спуском в скважину, выбранную для промышленных испытаний. При первичной эксплуатации НКТ в подвеске в комплекс исходных характеристик входят следующие данные:

- химический состав стали и неметаллических включений (проверка технологии модифицирования), металлографические параметры (степень загрязненности неметаллическими включениями, размер зерна, структурная полосчатость, оценка микроструктуры);
- механические свойства при одноосном растяжении, контроль твердости по окружности и длине трубы;
- ударная вязкость при отрицательных температурах (до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- стойкость к водородному растрескиванию и образованию блистерингов в сероводородсодержащей среде по стандарту NACE TM 0284;
- стойкость к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по стандарту NACE TM 0177, методы A, C, D.

Если подвеска уже эксплуатировалась ранее, то дополнительно в базу сравнения включаются следующие данные, полученные на образцах НКТ, отобранных из верхней, средней и нижней областей подвески:

- анализ поверхности исследуемых объектов, степени локальной коррозии и выявление характера коррозионных поражений;
- фазовый, химический состав и морфология продуктов коррозии;
- микробиологический анализ продуктов коррозии с поверхности НКТ.

Проведение испытаний

Скважина со спущенными испытываемыми трубами работает до ближайшей остановки на ремонт (обычно более 6 месяцев). В процессе ремонтных работ из эксплуатируемой подвески отбираются три трубы для последующих исследований: 1-я НКТ из интервала с первой по десятую трубу подвески, 2-я НКТ из средней части подвески и 3-я НКТ из интервала с первой по десятую трубу подвески, считая от глубинного насоса. Система отбора труб показана на схеме расположения лифтовой колонны в добывающей скважине (рис. 3).

Отбор НКТ проводится из ранее работавшей подвески, а также при каждом ремонтном цикле эксплуатации опытной подвески. Такой подход позволил контролировать состояние НКТ по мере увеличения срока их эксплуатации.

Каждая поступившая в лабораторию НКТ после промышленных испытаний проходит следующий комплекс исследований:

- анализ поверхности испытанных труб, определение характера и степени локализации коррозионных поражений;
- анализ фазового и химического состава продуктов коррозии;

- анализ строения, структуры и адгезионных свойств продуктов коррозии;
- микробиологический анализ продуктов коррозии;
- оценка изменения механических свойств при одноосном растяжении;
- оценка изменения уровня ударной вязкости при отрицательных температурах (до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- анализ изменения коррозионных свойств по стойкости к образованию блистерингов в сероводородсодержащей среде по стандарту NACE TM 0284;
- анализ изменения коррозионных свойств по стойкости к сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением по стандарту NACE TM 0177, методы A, C, D.

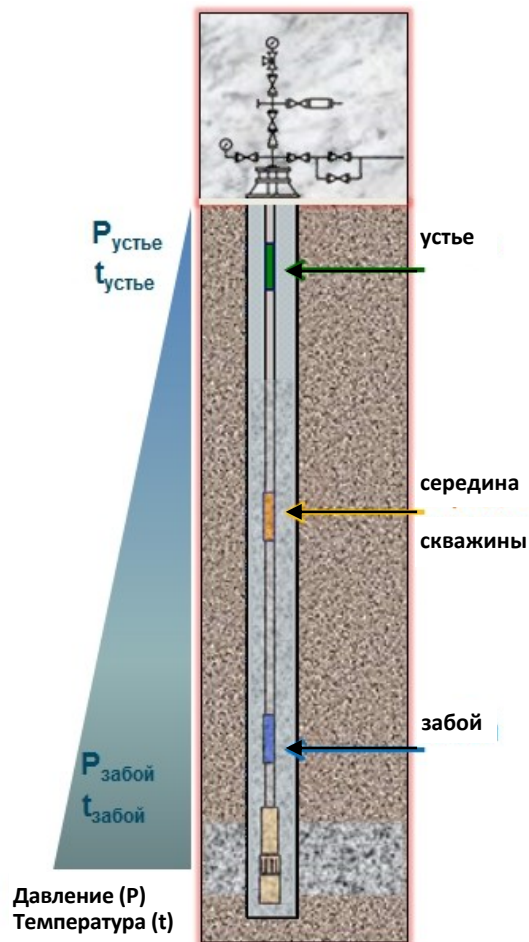


Рис. 3. Схематическое изображение добывающей скважины, лифтовой колонны и мест отбора НКТ для исследования

По описанной методике в скважинах месторождений Усинское и Возейское, Западно-Полуденное, Северное и Восточный Вах были проведены сравнительные ОПИ для оценки работоспособности лифтовых колонн, составленных из НКТ, изготовленных из традиционных сталей 35Г2С и 32Г2Ф, и НКТ из новой стали 15Х5МФБЧ. Результаты испытаний, показывающих возможности методики, приведены в таблице 1 [4].

Таблица 1. Состав среды и результаты промышленных испытаний

Месторождение/ № скважины	Обводненность, %	В воде		Cl ⁻ , г/л	Минерализация, г/л	Наработка НКТ* обычного исполнения	Наработка опытных НКТ	Изменение наработки относительно обычных НКТ	Ведущий механизм коррозии + отягчающие факторы
		CO ₂ , мг/л	H ₂ S, мг/л						
ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»									
Усинское/4266	88	79,2	92,9	18,7	31,2	230	1100	4,8	Углекислотный + сульфиды, биокоррозия
Возейское/1177	95	202,4	4,8	34,6	59,5	395	827	2,1	Углекислотный + биокоррозия
ОАО «Томскнефть» ВНК									
Западно-Полуденное/427	–	160	0,0	12,9	22,0	122	1107	9,1	нет данных
Северное/254	–	980	0,3	9,9	16,5	98	1411	14,4	нет данных
Северное/506	–					101	790	7,8	Углекислотная язвенная коррозия
Восточный Вах/824	–	350	0,1	20,0	32,8	77	2083	27,1	Равномерная углекислотная коррозия
Восточный Вах/879	–	410	0,0	20,0	33,0	111	1687	15,2	

Примечание: * – средняя наработка по трем последним подвескам.

Контроль состояния действующих трубопроводов

Трубопровод с известной историей эксплуатации и развития разрушений, выполненный из труб традиционных марок сталей, заменяется на новый трубопровод, собранный из труб, изготовленных из разработанной стали.

При таких испытаниях отбор образцов для проведения полного комплекса лабораторных исследований возможен только в следующих случаях: плановый и ревизионный ремонт трубопровода; отказ (разрушение) системы; временная остановка работы и вывод трубопровода из эксплуатации. Именно отсутствие определенной периодичности сроков контроля является недостатком этого метода испытаний. Однако для оценки работоспособности трубопроводных систем, особенно для сравнения эксплуатационных параметров старых и новых систем, такие испытания являются наиболее наглядными и надежными.

ВЫВОДЫ

1. Результаты лабораторных испытаний на стойкость к углекислотной коррозии во многом зависят от используемых методик, и значения, полученные разными лабораториями и промышленными испытаниями, значительно отличаются.

2. Представлены разработанные методики трех видов опытных промышленных испытаний нефтегазопроводных и насосно-компрессорных труб: байпасные испытания, периодический контроль труб в составе лифтовых колонн, контроль состояния действующих трубопроводов.

3. Опытные промышленные испытания, проведенные по разработанным методикам, позволяют получить полную информацию о работоспособности труб и механизмах и кинетике развития разрушения металла

в процессе эксплуатации в условиях определенного месторождения нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа повышения надёжности ОАО «НК Роснефть»: материалы по реализации 2012 // Российский союз промышленников и предпринимателей. URL: rscpp.pф/.
2. Иоффе А.В., Тетюева Т.В., Выбойщик М.А., Князькин С.А., Зырянов А.О. Коррозионно-механическое разрушение насосно-компрессорных труб из углеродистых сталей при эксплуатации в средах, содержащих сероводород // Металловедение и термическая обработка материалов. 2012. № 10. С. 4–9.
3. Методика «Исследование патрубков НКТ после эксплуатации с целью выявления ведущих механизмов коррозии и степени их повреждаемости после эксплуатации». Самара: Самарский инженерно-технический центр, 2008. 53 с.
4. Зырянов А.О. Исследование коррозионного разрушения насосно-компрессорных труб из стали 15Х5МФБЧ в высоко агрессивных нефтепромысловых средах и усовершенствование технологии термической обработки этих труб : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2018. 23 с.
5. Заботин А.Л., Иоффе А.В., Стогова С.В. Способ коррозионных испытаний сталей: патент РФ № 2235309, 2004.
6. Маркин А.Н., Низамов Р.Э. CO₂-коррозия нефтепромыслового оборудования. М.: ВНИИОЭНГ, 2003. 188 с.
7. Sun J., Sun C., Wang Y. Effect of Cr Content on the Electrochemical Behavior of Low Chromium X65 Steel in CO₂ Environment // International Journal of Electrochemical Science. 2016. Vol. 11. P. 8599–8611.

8. Ko M., Ingham B., Laycock N., Williams D.E. In situ synchrotron X-ray diffraction study of the effect of chromium additions to the steel and solution on CO₂ corrosion of pipeline steels // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 80. P. 237–246.
9. Sun J., Sun C., Lin X., Cheng X. Effect of Chromium on Corrosion Behavior of P110 Steels in CO₂-H₂S Environment with High Pressure and High Temperature // *Materials*. 2016. Vol. 9. P. 200–210.
10. Li D.P., Zhang L., Yang J.-W., Lu M.-X., Ding J.-H., Liu M.-L. Effect of H₂S concentration on the corrosion behavior of pipeline steel under the coexistence of H₂S and CO₂ // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 21. № 4. P. 388–394.
11. Choi Y.-S., Nestic S., Ling S. Effect of H₂S on the CO₂ corrosion of carbon steel in acidic solution // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56. № 4. P. 1752–1760.
12. Выбойщик М.А., Иоффе А.В., Борисенкова Е.А., Денисова Т.В., Сорокин А.В. Коррозионная повреждаемость нефтепроводных труб из хром-молибден-содержащих сталей в условиях высокой агрессивности добываемой среды // *Металловедение и термическая обработка материалов*. 2012. № 10. С. 29–33.
13. Тетюева Т.В., Иоффе А.В., Выбойщик М.А., Князькина С.А., Трифонова Е.А., Зырянов А.О. Влияние модифицирования, микролегирования и термической обработки на коррозионную стойкость и механические свойства стали 15Х5М // *Металловедение и термическая обработка материалов*. 2012. № 10. С. 15–22.
14. Иоффе А.В., Тетюева Т.В., Ревякин В.А., Борисенкова Е.А., Князькин С.А., Денисова Т.В. Коррозионно-механическое разрушение трубных сталей в процессе эксплуатации // *Металловедение и термическая обработка материалов*. 2012. № 10. С. 22–28.
15. Луценко А.Н., Немтинов А.А., Голованов А.В., Ефимов С.В., Филатов Н.В., Хорева А.А., Мальцев А.Б., Рослякова Н.Е., Князькин С.А., Ревякин В.А., Иоффе А.В., Тетюева Т.В., Денисова Т.В. Сталь: патент РФ № 2361958, 2009.
16. Денисова Т.В., Жукова С.Ю., Иоффе А.В., Ревякин В.А., Тетюева Т.В., Трифонова Е.А. Высокопрочная труба для нефтяных скважин: патент РФ № 2368836, 2009.
17. Денисова Т.В., Иоффе А.В., Ревякин В.А., Тазетдинов В.И., Тетюева Т.В., Трифонова Е.А., Фазылов Ш.С., Юдин П.Е. Коррозионно-стойкая сталь для насосно-компрессорных и обсадных труб: патент РФ № 2414521, 2009.
18. Методика «Проведение промышленных испытаний соединительных деталей нефтегазопроводов в условиях реальных нефтепроводов». Самара: ИТ-Сервис, 2012. 25 с.
19. Князькин С.А. Выбор состава и структуры стали для изготовления насосно-компрессорных труб с повышенными эксплуатационными характеристиками : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 2013. 165 с.
20. Князькин С.А., Иоффе А.В., Выбойщик М.А., Зырянов А.О. Особенности коррозионного разрушения насосно-компрессорных труб при эксплуатации в средах с повышенным содержанием углекислого газа // *Металловедение и термическая обработка материалов*. 2012. № 10. С. 10–14.

REFERENCES

1. The reliability improvement program of OJSC “NK Rosneft”: the materials of implementation of 2012. *Rossiyskiy soyuz promyshlennikov i predprinimateley*. URL: pcpn.ppf/.
2. Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Vyboyshchik M.A., Knyazkin S.A., Zyryanov A.O. Corrosion-mechanical fracture of tubing from carbon and alloy steels operating in environments containing hydrogen sulfide. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 492–497.
3. *Metodika “Issledovanie patrubkov NKT posle ekspluatatsii s tselyu vyyavleniya vedushchikh mekhanizmov korrozii i stepeni ikh povrezhdaemosti posle ekspluatatsii”* [Technique “The study of TBG connection pipes after the operation for the purpose of identifying the leading corrosion mechanisms and the degree of their damaging after production activity”]. Samara, Samarskiy inzhenerno-tehnicheskii tsentr Publ., 2008. 53 p.
4. Zyryanov A.O. *Issledovanie korrozionnogo razrusheniya nasosno-kompressornykh trub iz stali 15Kh5MFbCh v vysoko agressivnykh neftepromyslovykh sredakh i usovershenstvovanie tekhnologii termicheskoy obrabotki etikh trub*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [The study of corrosive destruction of production tubing made of 15H5MFbCh steel in highly-aggressive oil-field environment and the improvement of the technology of thermal processing of these pipes]. Samara, 2018. 23 p.
5. Zabotin A.L., Ioffe A.V., Stogova S.V. *Sposob korrozionnykh ispytaniy staley* [The method of corrosion tests of steels], patent RF no. 2235309, 2004.
6. Markin A.N., Nizamov R.E. *SO₂-korroziya neftepromyslovogo oborudovaniya* [CO₂-corrosion of oilfield equipment]. Moscow, VNIIOENG Publ., 2003. 188 p.
7. Sun J., Sun C., Wang Y. Effect of Cr Content on the Electrochemical Behavior of Low Chromium X65 Steel in CO₂ Environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 2016, vol. 11, pp. 8599–8611.
8. Ko M., Ingham B., Laycock N., Williams D.E. In situ synchrotron X-ray diffraction study of the effect of chromium additions to the steel and solution on CO₂ corrosion of pipeline steels. *Corrosion Science*, 2014, vol. 80, pp. 237–246.
9. Sun J., Sun C., Lin X., Cheng X. Effect of Chromium on Corrosion Behavior of P110 Steels in CO₂-H₂S Environment with High Pressure and High Temperature. *Materials*, 2016, vol. 9, pp. 200–210.
10. Li D.P., Zhang L., Yang J.-W., Lu M.-X., Ding J.-H., Liu M.-L. Effect of H₂S concentration on the corrosion behavior of pipeline steel under the coexistence of H₂S and CO₂. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2014, vol. 21, no. 4, pp. 388–394.
11. Choi Y.-S., Nestic S., Ling S. Effect of H₂S on the CO₂ corrosion of carbon steel in acidic solution. *Electrochimica Acta*, 2011, vol. 56, no. 4, pp. 1752–1760.
12. Vyboyshchik M.A., Ioffe A.V., Borisenkova E.A., Denisova T.V., Sorokin A.V. Corrosion damage of oil line pipes from chromium-molybdenum-containing steels under conditions of high aggressiveness of produced medium. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 519–523.

13. Tetyueva T.V., Ioffe A.V., Vyboishchik M.A., Knyazkina S.A., Trifonova E.A., Zyryanov A.O. Effect of inoculation, microalloying and heat treatment on corrosion resistance and mechanical properties of steel 15Kh5M. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 504–511.
14. Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Revyakin V.A., Borisenkova E.A., Knyazkin S.A., Denisova T.V. Corrosion-mechanical fracture of pipe steels in operation. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 512–518.
15. Lutsenko A.N., Nemtinov A.A., Golovanov A.V., Efimov S.V., Filatov N.V., Khoreva A.A., Maltsev A.B., Roslyakova N.E., Knyazkin S.A., Revyakin V.A., Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Denisova T.V. *Stal* [Steel], patent RF no. 2361958, 2009.
16. Denisova T.V., Zhukova S.Yu., Ioffe A.V., Revyakin V.A., Tetyueva T.V., Trifonova E.A. *Vysokoprochnaya truba dlya neftyanykh skvazhin* [High-tensile pipe for oil wells], patent RF no. 2368836, 2009.
17. Denisova T.V., Ioffe A.V., Revyakin V.A., Tazetdinov V.I., Tetyueva T.V., Trifonova E.A., Fazylov Sh.S., Yudin P.E. *Korrozionno-stoykaya stal dlya nasosno-kompresornyykh i obsadnykh trub* [Corrosion-resistant steel for production tubing and casing pipes], patent RF no. 2414521, 2009.
18. Metodika “Provedenie promyslovykh ispytaniy soedinitelnykh detaley neftegazoprovodov v usloviyakh realnykh nefteprovodov” [The technique “Carrying out field tests of joining parts of oil-and-gas tubing under the conditions of real oil-pipelines”]. Samara, IT-Servis Publ., 2012. 25 p.
19. Knyazkin S.A. *Vybor sostava i struktury stali dlya izgotovleniya nasosno-kompresornyykh trub s povyshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami*. Dis. kand. tekhn. nauk [The selection of the composition and the structure of steel for production of oil-well tubing with the enhanced operational characteristics]. Penza, 2013. 165 p.
20. Knyazkin S.A., Ioffe A.V., Vyboishchik M.A., Zyryanov A.O. Special features of corrosion fracture of tubing operating in media with elevated content of carbon dioxide. *Metal Science and Heat Treatment*, 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 498–503.

PILOT TESTS OF OIL-WELL TUBING

© 2018

M.A. Vyboishchik, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), professor of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)
S.A. Knyazkin, PhD (Engineering), Head of Department of Field Tests
LLC “IT-Service”, Samara (Russia)

Keywords: oil-field environment; oil-and-gas pipeline tubes; oil-well tubing; bypass; production string; mechanical properties; corrosion resistance; hydrogen cracking; carbon dioxide corrosion; corrosion products.

Abstract: The depletion of the existing and the introduction of new oil fields lead to the continuously growing corrosion activity of the produced fluids what increases the intensity of breakdown of the oil field equipment. To ensure the adequate working capacity, it is necessary to develop and apply new steels with the increased strength and corrosion resistance. It is necessary as well to increase the volume and to develop new methods of field tests; based on such tests only it is possible to obtain the reliable understanding of the mechanisms and the kinetics of the ongoing processes of the corrosive-mechanical destruction and to assess the working capacity of the pipeline systems under the actual operating conditions of a certain field.

The authors present the developed techniques of three main types of pilot tests: the bypass lines, the intermittent monitoring of production strings and the intermittent monitoring of the operating pipelines. The characteristic feature of the suggested tests is the systematic comparative analysis of the current state with the states before operating and the states of preceding stages of tests. For this reason, pilot tests come with the additional tests that are combined in two groups according to their functionality. The first group characterizes the initial state of metal and the change of its properties after tests (chemical and phase composition, the structural condition of metal, mechanical properties, corrosion resistance). The second group characterizes the corrosion damage of the pipeline inner surface caused by the tests (the inner surface condition; the identification of the prevailing type of the corrosive destruction; the evaluation of the rate of general and local corrosion; phase and chemical composition and the morphology of corrosion products; microbiology testing).

The suggested testing techniques allow obtaining the fullest information on the operating capacity and the kinetics of pipes failure development under the certain operating conditions. As an example, the authors describe the results of comparative field tests of the TBG production strings made of 15H5MFBC steel and of 35G2S and 35G2F conventional steels when operating on five fields with different composition of produced fluids.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СТЕЛЕК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© 2018

Н.В. Носов, доктор технических наук, профессор*А.П. Зябочкина*, аспирант*Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)*

Ключевые слова: ортопедические стельки; деформация ортезов; CAE-анализ; 3D-модель стелек; технологический маршрут обработки; программирование обработки на станках с ЧПУ; себестоимость изготовления индивидуальных стелек.

Аннотация: В работе представлены результаты исследований, направленных на повышение качества индивидуальной ортопедической стельки путем разработки и внедрения в процесс проектирования современных методов компьютерного моделирования, анализа материалов стельки и учета их механического поведения при эксплуатации.

В экспериментальной части проводилось сжатие образцов из комбинированных EVA-материалов. Полученные физико-механические свойства были смоделированы в CAE-системе. Посредством CAE-системы исследована деформация свода стельки при различной нагрузке и комбинировании EVA-материалов различной твердости.

Спроектирована в OrthoModel модель стельки, экспортированная в формат файла STL. Затем с помощью программы FreeCAD формат STL экспортировали в STEP, так как ANSYS более адаптирован для твердотельного формата. Создана конечно-элементная модель стельки, к которой прикладывались рабочие нагрузки. Получены напряжения и деформации стельки в процессе нагружения в зависимости от комбинации материала и геометрических параметров стопы.

В работе предложена методика проектирования индивидуальных ортопедических стелек, выбрана рациональная конструкция и материал стелек. Проведены расчеты деформации стелек при нагрузке, которые учтены в последующем при программировании обработки стелек на станках с ЧПУ. Имея 3D-модель стельки, можно не только изготовить ее на станке с ЧПУ, но и напечатать на 3D-принтере. Важная часть работы – это обоснование себестоимости изготовления индивидуальных ортопедических стелек; расчеты показывают, что дорогостоящая технология вполне себя оправдывает.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований направлены на повышение качества индивидуальной ортопедической стельки путем разработки и внедрения в процесс проектирования современных методов компьютерного моделирования, анализа материалов стельки и учета их механического поведения при эксплуатации.

В отличие от физико-механических свойств металлов, которые имеют 2 параметра, позволяющие описать напряженно-деформированное состояние (далее – НДС) по линейному закону, материал этиленвинилацетат (далее – ЭВА) обладает нелинейными свойствами и большим числом параметров (4–6), влияющих на НДС [1; 2].

Ортопедические стельки из ЭВА носятся в сложных динамических условиях [3]. Стопа совершает разнообразные движения при стоянии, ходьбе, беге с различной амплитудой и частотой. Процесс эксплуатации ортеза сопровождается сложным комплексом повторных механических действий между стопой, стелькой и обувью [4; 5]. Применение метода конечных элементов (МКЭ) может позволить определить деформацию тканей, граничное давление в ступне, деформацию ортеза, распределение нагрузок и многое другое.

Есть несколько интересных примеров по моделированию стопы и ортезов [6]. В статье [7] смоделирована трехмерная модель ноги для исследования давления стопы на опору, результаты сравнивались с литературными данными. При моделировании в ANSYS учитывались нелинейные свойства материалов, большие деформации и другие особенности граничных условий при решении задачи.

В работах [8; 9] исследовалось влияние эффекта применения ортезов при максимальном контакте со сводом стопы. Были проведены сравнения контактного давления ноги на объемную и плоскую стельки. В расчетах учитывались нелинейные свойства материалов. Результаты конечно-элементного анализа показали, что использование ортопедических стелек с полноконтактным сводом снижает высокие контактные давления в метатарзальной области и области пятки за счет перераспределения нагрузки.

Стельки из эластичного упругого ЭВА – достаточно сложный продукт. Упругие свойства и недостаточная жесткость стельки из ЭВА, а также варибельность веса пациента не позволяют просто и быстро реализовать производство индивидуальных стелек, обеспечивающих заданную поддержку свода [10; 11]. В связи с этими проблемами для конструирования стельки важно изучить свойства ЭВА, проанализировать деформации высоты свода стельки для разных весовых категорий пациентов. Также необходима разработка методов объективной оценки свойств ортопедической стельки, прогиба (перемещения) свода для пациентов определенной весовой категории, получение в лабораторных условиях показателей, согласующихся с технологическими и эксплуатационными свойствами материала.

Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) ортопедической стельки позволит изучить механическое поведение высоты продольного свода, связать назначаемые материал и высоту свода с антропометрическими параметрами человека – высотой свода и необходимой нагрузкой на свод, для коррекции.

Цель работы – освоение выпуска новой конкурентоспособной продукции – индивидуальных ортопедических стелек на основе разработки трехмерной модели стелек с использованием компьютерных технологий, повышения качества, производительности и сокращения сроков технологической подготовки производства. Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести анализ существующих технологий изготовления индивидуальных ортопедических стелек, материалов и наиболее распространенных конструкций ортезов.

2. Исследовать физико-механические свойства упругих эластичных EVA-материалов и образцов из этих материалов на сжатие.

3. Разработать конечно-элементную модель в программе ANSYS. Провести исследование деформации модели стельки при различной силе нагружения и комбинации материалов.

4. На основе CAE-анализа разработать модель индивидуальной ортопедической стельки.

5. Рассчитать затраты на подготовку производства и себестоимость изготовления индивидуальных ортезов.

САЕ-АНАЛИЗ

Для исследования деформации стельки воспроизведем поведение свойств материала образцов в программе ANSYS на образцах. Для наших экспериментов был выбран материал образцов – ЭВА с двумя видами твердости. Белый ЭВА имеет твердость по Шору 50 ± 3 , а бежевый – 70 ± 3 . Данные о материале предоставил производитель [12]. Из ЭВА были собраны двухслойные образцы, которые имели 2 комбинации по твердости – 70 и 70 Шор (образец № 1) и 50 и 70 Шор (обра-

зец № 2). Высота одного слоя 10 ± 1 мм. Профиль образцов прямоугольный со сторонами 20×30 мм. Общая высота образцов 20 ± 2 мм.

Для этого была построена половина высоты образца при указании симметрии по нижней стороне модели. На верхнюю поверхность была приложена половина нагрузки – 150 Н, и в свойства модели были заложены графики поведения материалов, полученные из результатов эксперимента на сжатие (рис. 1, 2).

Для первого образца наибольшей твердости характерно перемещение около 2,7 мм, для второго образца со слоями различной твердости перемещение существенно больше, оно составило 6,3 мм (рис. 3). Также из графиков (рис. 1, 2) видно, что при нагрузке до 30 кг упругий и эластичный ЭВА ведет себя по закону линейной упругости.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ НА СЖАТИЕ

Основным свойством любой индивидуальной ортопедической стельки является перераспределение давления на стопу за счет 2 факторов: эластичных свойств материала (амортизация) и геометрических параметров стельки (выкладка свода и др. конструктивов), что было доказано в статье [10].

Известно [11], что конструкционный материал ортеза при ходьбе испытывает нагрузки, как на сжатие, так и на удар, что приводит к деформации стельки и изменению геометрии, особенно элемента, поддерживающего продольный свод.

Установлено, что высота продольного свода для разных людей может варьироваться от 12 до 30 мм. Чаще всего встречается высота свода до 20 мм, поэтому

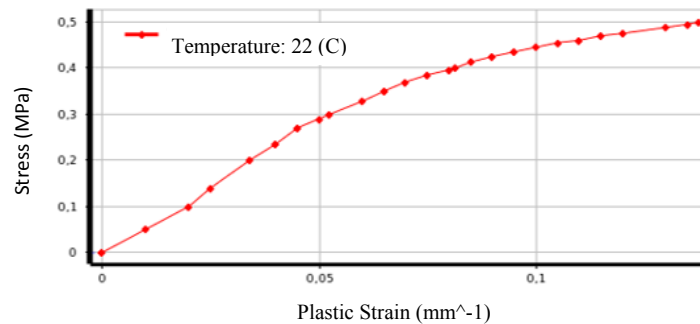


Рис. 1. Свойства образца № 1

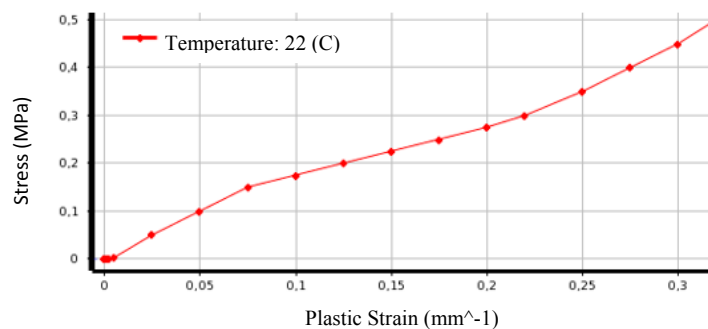


Рис. 2. Свойства образца № 2

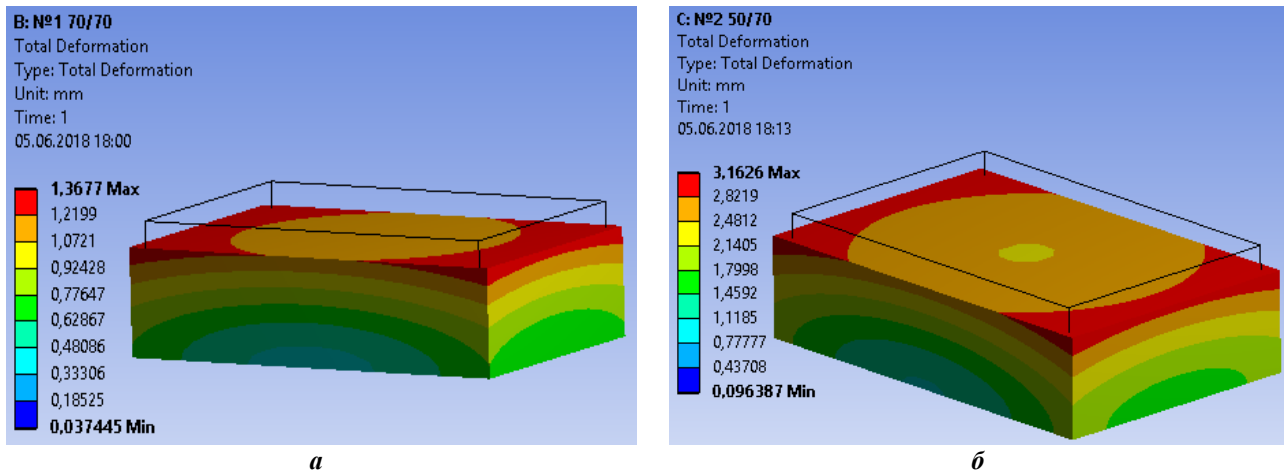


Рис. 3. Перемещение исследуемых образцов
a – образец № 1 (перемещение составило 2,7354 мм);
б – образец № 2 (перемещение составило 6,3252 мм)

для проводимых испытаний на сжатие высота образцов будет составлять 20 мм.

Важным параметром исследования деформации стельки является определение максимальной силы нагружения стопы. Этот параметр был исследован Кевином Кёрби [13–15]. Он предложил проводить на пациентах клинический тест «сопротивление супинации». Этот тест позволяет получить количественную оценку силы, которая должна воздействовать на свод для сохранения стопы в нейтральном (корригированном) положении. Этот параметр может отличаться для правой и левой ноги. В среднем сила может варьироваться от 60 до 300 Н, поэтому в наших исследованиях была принята нагрузка 300 Н.

Исследование на сжатие образцов проводилось на испытательной машине Instron 5988 Bluehill 3 с программным обеспечением Bluehill 3 Testing Software при комнатной температуре, в соответствии с ГОСТ 269-66 [16–18].

Для исследования механических свойств образцов были выбраны следующие параметры испытаний: скорость нагружения – 0,1 мм/с, прилагаемое усилие –

300 Н. Результаты испытаний эксперимента показаны на рис. 4, 5.

Результаты испытаний на сжатие силой 300 Н показали, что у образца № 1 перемещение составило около 2,7 мм, а у образца № 2 в два раза больше – почти 6,3 мм. Такая разница деформации получилась из-за того, что первый образец собран из более твердых слоев ЭВА. Результаты испытаний на сжатие хорошо согласуются с поведением материалов, построенным в программе ANSYS. Это позволит использовать данные о материалах для дальнейшего анализа конструкции стельки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ СТЕЛЕК

Для создания конечно-элементной модели стельки и работы в ANSYS нужно выполнить ряд действий. Спроектированную в OrthoModel модель стельки экспортируем в формат файла STL. Далее с помощью программы FreeCAD формат STL экспортируем в STEP, так как ANSYS более адаптирован для твердотельного формата (рис. 6).

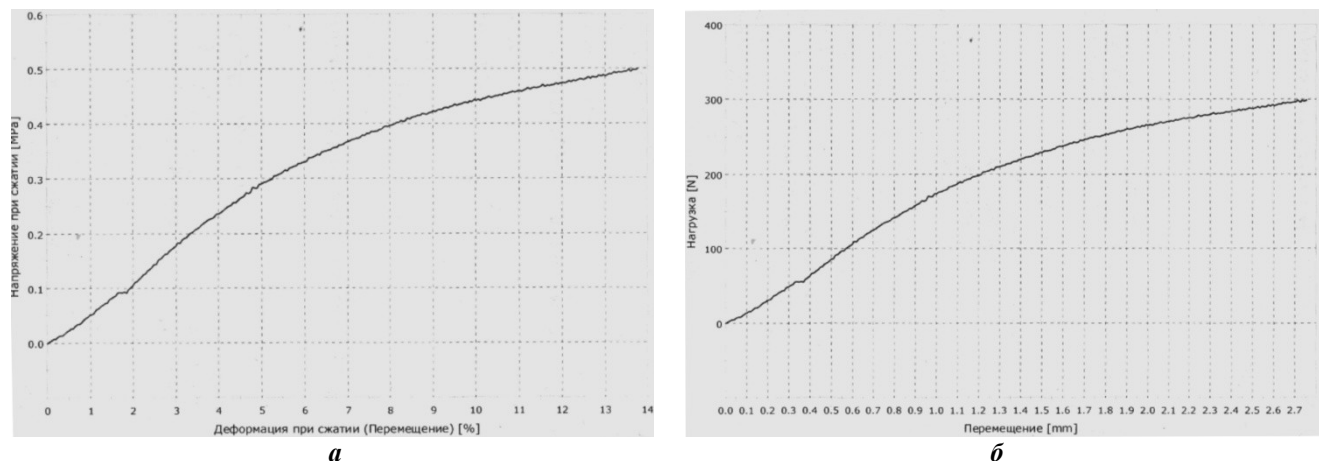


Рис. 4. Графики испытания на сжатие образца № 1:
a – зависимость перемещения от нагрузки; *б* – зависимость деформации от напряжения

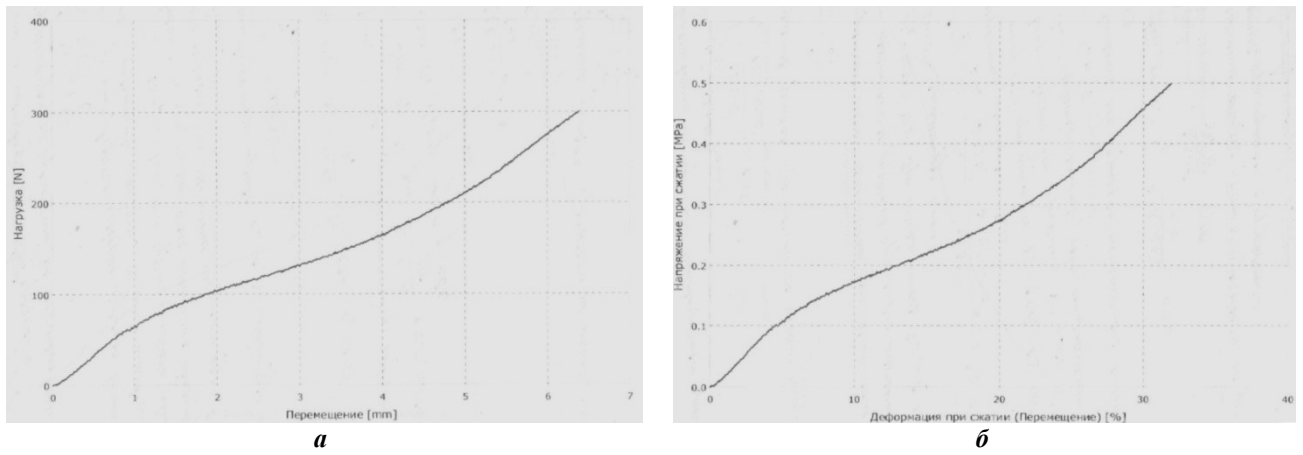


Рис. 5. Графики испытания на сжатие образца № 2:
а – зависимость перемещения от нагрузки; *б* – зависимость деформации от напряжения

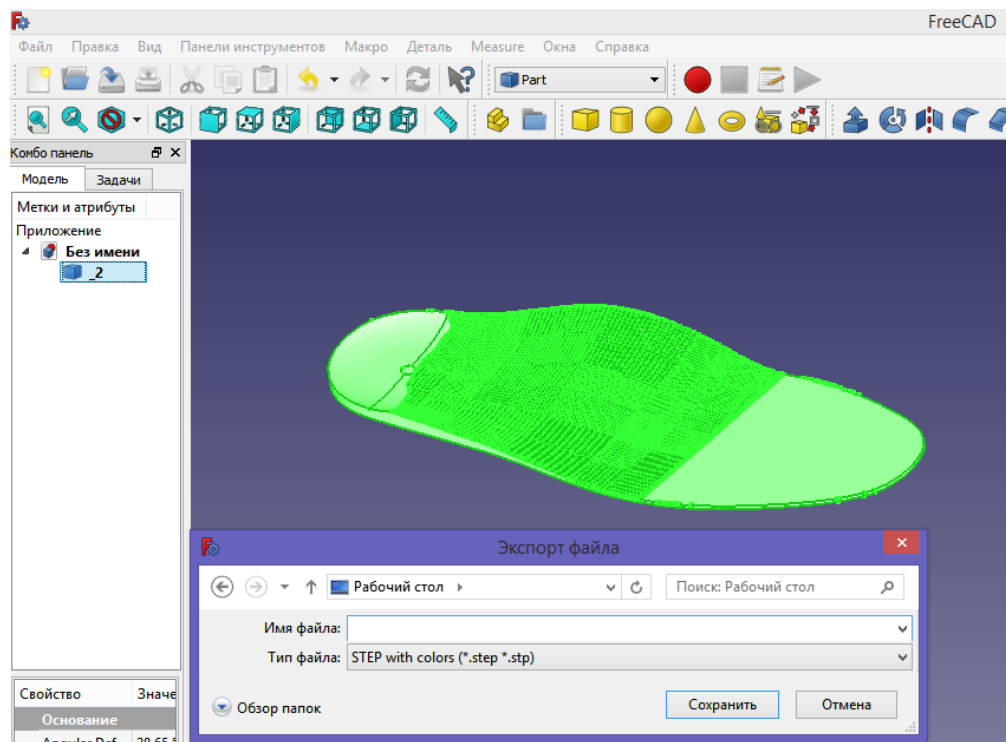


Рис. 6. Экспорт модели из FreeCAD в формат файла STEP

Подгружаем в созданный ранее проект геометрию, задаем ей материал первого образца. Далее разбиваем модель на сетку размером 4 мм. На поверхность свода задаем силу нагружения 300 Н. По нижней поверхности модели стельки задаем опору. Ограничиваем перемещение модели по осям *Z* и *Y*. Результаты нагружения свода стельки из материала, соответствующего образцу № 1 и № 2, представлены на рис. 7. Для образца № 1 максимальная деформация составила 1,06 мм, а для образца № 2 – 1,52 мм. Результаты зависимости деформаций высоты от нагрузки при комбинировании материалов по твердости занесены в таблицу № 1.

Данные результаты позволяют разработчику конструкции стелек учитывать нагрузки на свод стопы пациента и повысить эффективность работы стелек при эксплуатации.

ПРОГРАММИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ В САМ-СИСТЕМЕ

Задание на фрезерный станок с ЧПУ будет сгенерировано в программе OrthoMill. Маршрут обработки представлен в таблице 2.

РАСЧЕТ СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ СТЕЛЕК

Были выполнены расчетные калькуляции себестоимости услуг по проектированию и изготовлению одной пары индивидуальных стелек по методике [19; 20]. Все расчетные данные занесены в таблицы 3–6, расчеты выполнялись с использованием программы EXCEL.

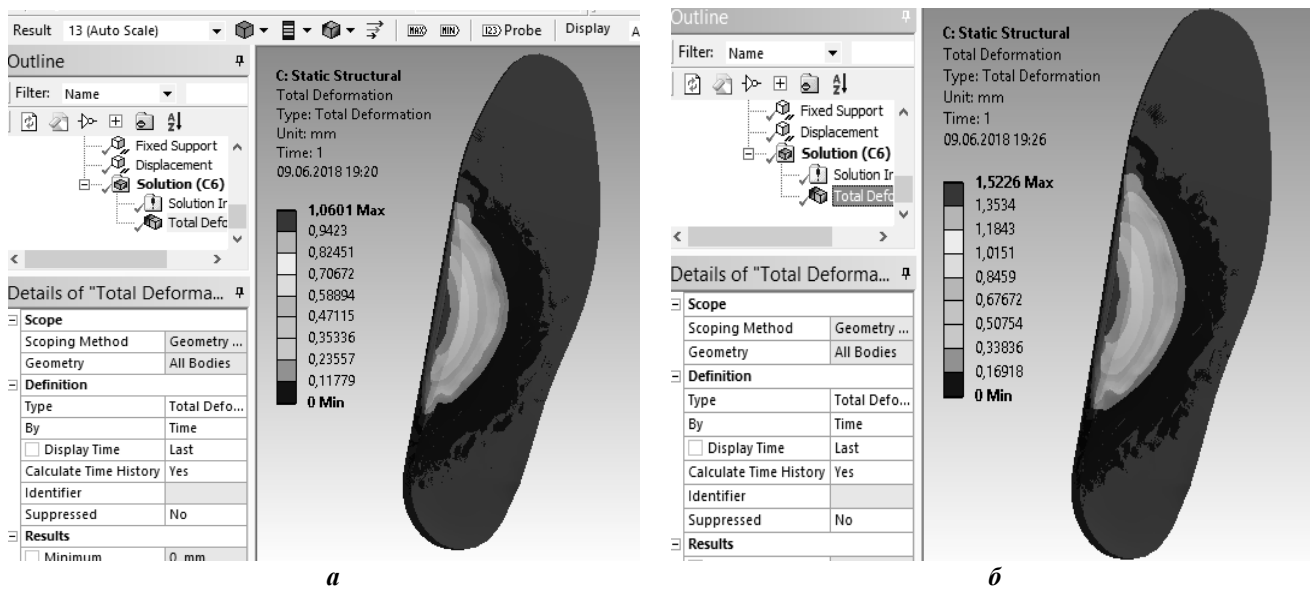


Рис. 7. Деформация свода:
а – образец № 1 – 1,06 мм при максимальной нагрузке 300 Н,
б – образец № 2 – 1,52 мм при максимальной нагрузке

Таблица 1. Деформация свода в зависимости от комбинации материала и силы нагружения

№	Нагрузка, Н	Перемещение, мм	
		№ 1 (70/70 Шор)	№ 2 (50/70 Шор)
1	50	0,18	0,30
2	100	0,37	0,54
3	150	0,53	0,78
4	200	0,71	1,02
5	250	0,89	1,27
6	300	1,06	1,52

Расчет времени работы по проектированию:
 При 8-часовом рабочем дне: 250 дней*8 ч = 2 000 раб. ч в год.
 Себестоимость 1 ч – 123 842,81 руб./166,66 ч/мес. = 743,09 руб.

Экспериментальное время проектирования одной пары индивидуальных стелек составило 0,25 ч. Произведем соответствующие расчеты себестоимости проектирования (таблица 4).

Расчет времени работы по изготовлению:
 При 8-часовом рабочем дне: 250 дней*8 ч = 2 000 раб. ч в год.
 Время работы по проектированию – 2 000 ч/год, или 166,66 ч/мес.

Себестоимость 1 ч – 351 883,01 руб./166,66 ч/мес. = 2 111,38 руб.

Экспериментальное время изготовления 1 пары индивидуальных стелек составило 0,9 ч. Произведем соответствующие расчеты себестоимости изготовления (таблица 6).

Суммарная цена на одну пару индивидуальных стелек составляет 2 600 руб. Прибыль составляет 5,6 % от цены. В расчетах рассматривалась минимальная цена, которая в два раза ниже средней стоимости по изготовлению индивидуальных стелек для взрослых (7 000 руб.). Таким образом, разработанная технология проектирования

и изготовления индивидуальных ортопедических стелек является конкурентной и позволит клиентам, которых в г. Самаре около 1 500, обоснованно выбрать предприятие-изготовителя по более низкой цене.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

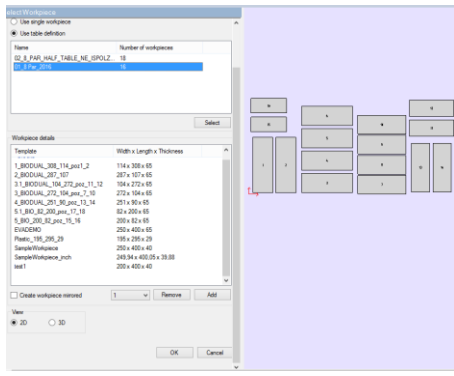
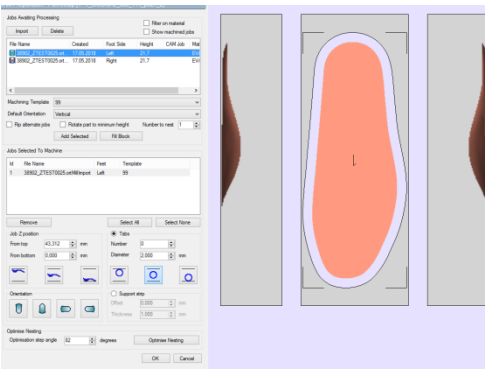
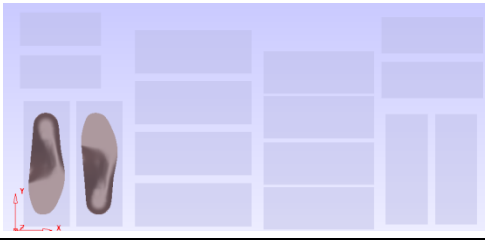
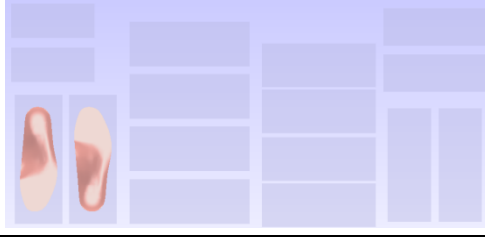
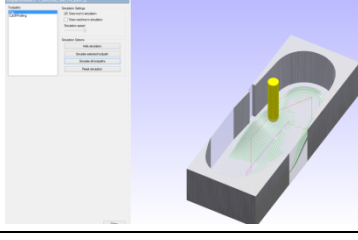
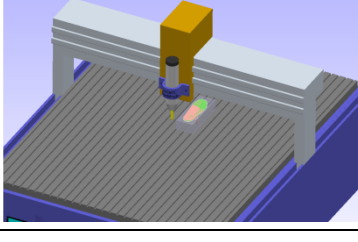
1. Выполнен анализ возможности использования материала на основе ЭВА, возможностей его применения в разных областях. Сделаны выводы о возможном применении материала ЭВА для изготовления индивидуальных ортопедических стелек с необходимостью подбора твердости в соответствии с весовой категорией пациента.

2. Проведено испытание на сжатие образцов из ЭВА. Полученные характеристики материала были перенесены в программу ANSYS для воспроизведения деформаций на конечно-элементной модели стельки.

3. Проведено оценочное моделирование напряженно-деформированное состояния стельки из ЭВА при силе давления 300 Н. На основании полученных результатов была составлена база по деформации свода стельки в зависимости от 2 комбинаций материала и 6 сил нагружения, что позволит учитывать в конструкции ортезов необходимые нагрузки на свод пациента и повысить эффективность эксплуатации.

4. Произведены расчетные калькуляции себестоимости услуг по проектированию и изготовлению одной

Таблица 2. Обработка стельки в OrthoMill

№	Переходы	Порядок выполнения
1		<p>Создание файла обработки. Выбор расположения будущих заготовок производится по умолчанию. Каждая позиция имеет свою нумерацию и ограничение по размерам заготовки</p>
2		<p>Установка левой модели стельки на первую позицию. Назначение код шага фрезы по умолчанию. Заготовка автоматически базируется по центру отведенной зоны. Вторая парная позиция правой стельки устанавливается аналогично</p>
3		<p>Расположение будущих стелек. Генерация обработки файла</p>
4		<p>Окраска моделей стелек меняется при генерировании обработки</p>
5		<p>Симуляция обработки заготовки</p>
6		<p>Симуляция фрезерной обработки</p>
7		<p>Сохранение файла обработки</p>

Примечание: На выходе программа сохраняет два отдельных файла: фрезерование геометрии ортеза и гравирование контура, которые отправляются на станок с ЧПУ.

Таблица 3. Затраты на проектирование индивидуальных стелек

№№	Статья	Наименование статей расходов	Расходы, руб/мес.
1	211	Оплата труда	60 395,50
2	213	Начисление на оплату труда 30,2 %	18 239,44
3		Итого	78 634,94
4	271	Амортизация	
5		Ноутбук Acer Aspire – 40 000,00 руб./36 мес. (3 года)=1 111,11	1 111,11
6	221	Услуги связи	
7		Интернет	1 000,00
8	223	Коммунальные услуги	815,53
9		1. Водоснабжение – 145,24 руб. на 1 чел. (водопотребление х/в – 20,47 руб/куб. м; водоотведение – 8,71 руб/куб. м; гор. водоснабжение – 116,06 руб/куб. м)	
10		На 1 человека – 1,25 куб. м/мес.*1*145,24 руб/куб. м=181,55	181,55
11		2. Отопление 1 кв. м – 35,08 руб.	
12		12 кв. м*35,08 руб.=420,96 руб.	420,96
13		3. Электроэнергия	
14		Лампы: 0,04 кВт/ч*8 шт.*8 ч*21 день=53,76 кВт	
15		53,76 кВт*3,17 руб.=170,42 руб.	170,42
16	225	Расходы на содержание оборудования	21,30
17		Ноутбук Acer Aspire – 0,04 кВт/ч*1*8 ч*21 день=6,72 кВт	
18		6,72 кВт*3,17 руб.=21,30 руб.	21,30
19		Итого себестоимость	81 582,88
20		Накладные расходы 38 %	31 001,49
21		Прибыль 10 %	11 258,44
22			
23		Всего	123 842,81

Таблица 4. Расчет себестоимости проектирования одной пары индивидуальных ортопедических стелек

Время проектирования одной пары индивидуальных стелек, ч	0,25
Себестоимость 1 часа, руб.	743,09
Себестоимость работ по проектированию 1 пары, руб.	185,77
НДС 18 % от себестоимости работ по проектированию 1 пары, руб.	33,44
Себестоимость работ по проектированию 1 пары, с НДС 18 %, руб.	219,21
Стоимость работ по проектированию 1 пары, с НДС 18 %, руб. – в приказ	300,00
В т. ч. НДС 18 % стоимости работ по проектированию 1 пары, руб.	45,76

Таблица 5. Затраты на изготовление индивидуальных стелек

№№	Статья	Наименование статей расходов	Расходы, руб/мес.
1	211	Оплата труда (2 чел.)	71 869,60
2	213	Начисление на оплату труда 30,2 %	21 704,62
3		Итого	93 574,22
4	340	Материалы	120 960,00
5		основной материал – 310*16 пар стелек*21 день=10 4160,00 руб.	104 160,00
6		укрывной материал – 50*16 пар стелек*21 день=16 800,00 руб.	16 800,00
7	271	Амортизация	10 873,01
8		Станок фрез. ЧПУ SUDA 1212 – 400 000,00 руб./84 мес. (7 лет)=4761,90	4 761,90
9		Сканер оптический Iqube-3QCAM – 322 000,00 руб./84 мес. (7 лет)=3833,33	3 833,33
10		Ноутбук Acer Aspire – 40 000,00 руб./36 мес. (3 года)=1 111,11	1 111,11
11		ПК Intel Core i7-4770 – 42 000,00 руб./36 мес. (3 года)=1 166,67	1 166,67
12	221	Услуги связи	
13		Интернет	1 000,00
14	223	Коммунальные услуги	3 700,90
15		1. Водоснабжение – 145,24 руб. на 1 чел. (водопотребление х/в – 20,47 руб/куб. м; водоотведение – 8,71 руб/куб. м; гор. водоснабжение – 116,06 руб/куб. м)	

16		На 2 человека – 1,25 куб. м/мес.*2*145,24 руб/куб. м=363,10 руб.	363,10
17		2. Отопление 1 кв. м – 35,08 руб.	2 315,28
18		54 кв. м*35,08 руб.=1 894,32 руб.	1 894,32
19		12 кв. м*35,08 руб.=420,96 руб.	420,96
19		3. Электроэнергия	
20		Лампы: 0,04 кВт/ч*48 шт.*8 ч*21 день=322,56 кВт	
21		322,56 кВт*3,17 руб.=1 022,52 руб.	1 022,52
22	225	Расходы на содержание оборудования	1 698,86
23		Ноутбук Acer Aspire – 0,04 кВт/ч*1*8 ч*21 день=6,72 кВт	
24		6,72 кВт*3,17 руб.=21,30 руб.	21,30
25		ПК Intel Core i7-4770 – 0,15 кВт/ч*1*8 ч*21 день=25,20 кВт	
26		25,20кВт*3,17=79,88 руб.	79,88
27		Станок фрез. ЧПУ SUDA 1212 – 3 кВт/ч*1*8 ч*21 день=504 кВт	
28		504 кВт*3,17=1 597,68 руб.	1 597,68
29		Итого себестоимость	231 806,99
30		Накладные расходы 38 %	88 086,66
31		Прибыль 10 %	31 989,36
32			
33		Всего	351 883,01

Таблица 6. Расчет себестоимости изготовления одной пары индивидуальных ортопедических стелек

Время изготовления 1 пары, час	0,90
Себестоимость 1 часа, руб.	2 111,38
Себестоимость работ по изготовлению 1 пары, руб.	1 900,24
НДС 18 % от себестоимости работ по изготовлению 1 пары, руб.	342,04
Себестоимость работ по изготовлению 1 пары, с НДС 18 %, руб.	2 242,29
Стоимость работ по изготовлению 1 пары, с НДС 18 %, руб. – ЦЕНА	2 300,00 Р
В т. ч. НДС 18 % стоимости работ по изготовлению 1 пары, руб.	350,85 Р

пары индивидуальных стелек. Цена за проектирование – 300 руб., цена за производство – 2300 руб. Итого суммарная цена на одну пару индивидуальных стелек составляет 2 600 руб. Прибыль по минимально назначенной цене – 5,6 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов В.В. Клинико-экспериментальное исследование материала для изготовления защитных зубных шин на основе этиленвинилацетата методом термомформирования : автореф. дис. ... канд. мед. наук. М., 2017. 24 с.
- ГОСТ 269-66 (СТ СЭВ 983-89) Резина. Общие требования к проведению физикомеханических испытаний. М.: Издательство стандартов, 1993. 11 с.
- Wu L. Nonlinear finite element analysis for musculoskeletal biomechanics of medial and lateral plantar longitudinal arch of Virtual Chinese Human after plantar ligamentous structure failures // *Clinical Biomechanics*. 2007. Vol. 22. № 2. P. 221–229.
- Cheung J.T., Zhang M., Leung A.K., Fan Y.B. Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing—a material sensitivity study // *Journal Biomechanics*. 2005. Vol. 38. № 5. P. 1045–1054.
- George J.J., Bhowmick A.K. Influence of matrix polarity on the properties of ethylene vinyl acetate-Carbon Nanofiller Nanocomposites // *Nanoscale Research Letters*. 2009. Vol. 4. № 7. P. 655–664.
- Chen W.-P., Tang F.-T., Ju C.-W. Stress distribution of the foot during mid-stance to push-off in barefoot gait: a 3-D finite element analysis // *Clinical Biomechanics*. 2001. Vol. 6. № 7. P. 614–620.
- Abd Elbary A.M., Aljuraide N.I. Effect of electron-beam irradiation on the mechanical properties of poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) – PPY polymer blends // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2016. Vol. 7. № 9. P. 1487–1504.
- Zaini N.A.M., Ismail H., Rusli A. Tensile, thermal, flammability and morphological properties of sepiolite filled ethylene propylene diene monomer (EDPM) rubber composites // *Iranian Polymer Journal*. 2018. Vol. 27. № 5. P. 287–296.
- Sasikalal A., Kalal A. Thermal stability and mechanical strength analysis of EVA and blend of EVA with natural rubber // *Materials today: Proceedings*. 2018. Vol. 5. № 2. P. 8862–8867.
- Shimazaki Y., Nozu S., Inoue T. Shock-absorption properties of functionally graded EVA laminates for footwear design // *Polymer Testing*. 2016. Vol. 54. P. 98–103.
- Taha Z., Norman M.S., Omar S.F.S., Suwarganda E. A finite element analysis of a human foot model to simulate neutral standing on ground // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 147. P. 240–245.
- Cheung J.T.-M., Zhang M. Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite

- element method // *Medical Engineering & Physics*. 2008. Vol. 30. № 3. P. 269–277.
13. Платунов К.М., Бахтияров И.Х. Работа подошвы в обуви // *Сборник трудов ЦНИИКЗ*. Т. 2. Вып. 1. М.: Медгиз, 1935. С. 200–319.
 14. Eco-cover: производство и продажа экологически чистых покрытий для спорта и дома. URL: eco-cover.ru/.
 15. Anggoro P.W., Saputra E., Tauviquirrahman M., Jamari J., Bayuseno A.P. A 3-dimensional finite element analysis of the insole shoe orthotic for foot deformities // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. № 15. P. 5254–5260.
 16. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
 17. Каталог продукции // Eco-cover: производство и продажа экологически чистых покрытий для спорта и дома. URL: eco-cover.ru/product-catalogue/eva-sheet/areas-of-application.html.
 18. Roy KJ. Force, pressure, and motion measurements in the foot: current concepts // *Clin Podiatr Med Surg*. 1988. Vol. 5. № 3. P. 491–508.
 19. Косилова А.Г., Мещеряков Р.П. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.
 20. Мельник Е.А. Экономика предприятия. М.: Юрайт, 2013. 303 с.
- REFERENCES**
1. Borisov V.V. *Kliniko-eksperimentalnoe issledovanie materiala dlya izgotovleniya zashchitnykh zubnykh shin na osnove etilenvinilatsetata metodom termoformirovaniya*. Avtoref. dis. kand. med. nauk [Clinical-experimental study of the material for the production of EVA protective dental splints using the thermal formation method]. Moscow, 2017. 24 p.
 2. GOST 269-66 (ST SEV 983-89) *Rezina. Obshchie trebovaniya k provedeniyu fizikomekhanicheskikh ispytaniy* [Rubber. General requirements for physical mechanical testing]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1993. 11 p.
 3. Wu L. Nonlinear finite element analysis for musculoskeletal biomechanics of medial and lateral plantar longitudinal arch of Virtual Chinese Human after plantar ligamentous structure failures. *Clinical Biomechanics*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 221–229.
 4. Cheung J.T., Zhang M., Leung A.K., Fan Y.B. Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing—a material sensitivity study. *Journal Biomechanics*, 2005, vol. 38, no. 5, pp. 1045–1054.
 5. George J.J., Bhowmick A.K. Influence of matrix polarity on the properties of ethylene vinyl acetate-Carbon Nanofiller Nanocomposites. *Nanoscale Research Letters*, 2009, vol. 4, no. 7, pp. 655–664.
 6. Chen W.-P., Tang F.-T., Ju C.-W. Stress distribution of the foot during mid-stance to push-off in barefoot gait: a 3-D finite element analysis. *Clinical Biomechanics*, 2001, vol. 6, no. 7, pp. 614–620.
 7. Abd Elbary A.M., Aljuraide N.I. Effect of electron-beam irradiation on the mechanical properties of poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) – PPY polymer blends. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2016, vol. 7, no. 9, pp. 1487–1504.
 8. Zaini N.A.M., Ismail H., Rusli A. Tensile, thermal, flammability and morphological properties of sepiolite filled ethylene propylene diene monomer (EDPM) rubber composites. *Iranian Polymer Journal*, 2018, vol. 27, no. 5, pp. 287–296.
 9. Sasikala A., Kala A. Thermal stability and mechanical strength analysis of EVA and blend of EVA with natural rubber. *Materials today: Proceedings*, 2018, vol. 5, no. 2, pp. 8862–8867.
 10. Shimazaki Y., Nozu S., Inoue T. Shock-absorption properties of functionally graded EVA laminates for footwear design. *Polymer Testing*, 2016, vol. 54, pp. 98–103.
 11. Taha Z., Norman M.S., Omar S.F.S., Suwarganda E. A finite element analysis of a human foot model to simulate neutral standing on ground. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 147, pp. 240–245.
 12. Cheung J.T.-M., Zhang M. Parametric design of pressure-relieving foot orthosis using statistics-based finite element method. *Medical Engineering & Physics*, 2008, vol. 30, no. 3, pp. 269–277.
 13. Platonov K.M., Bakhtiarov I.Kh. The work of the sole in footwear. *Sbornik trudov TsNIKZ*. Moscow, Medgiz Publ., 1935. Vol. 2, vyp. 1, pp. 200–319.
 14. Eco-cover: production and sale of environmentally friendly coatings for sports and at home. URL: eco-cover.ru/.
 15. Anggoro P.W., Saputra E., Tauviquirrahman M., Jamari J., Bayuseno A.P. A 3-dimensional finite element analysis of the insole shoe orthotic for foot deformities. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 15, pp. 5254–5260.
 16. Басов К.А. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS tasks and examples]. Moscow, KompyuterPress Publ., 2002. 224 p.
 17. Product Catalog. *Eco-cover: proizvodstvo i prodazha ekologicheskikh chistykh pokrytiy dlya sporta i doma*. URL: eco-cover.ru/product-catalogue/eva-sheet/areas-of-application.html.
 18. Roy KJ. Force, pressure, and motion measurements in the foot: current concepts. *Clin Podiatr Med Surg*, 1988, vol. 5, no. 3, pp. 491–508.
 19. Kosilova A.G., Meshcheryakov R.P. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of mechanic engineer technologist]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. Vol. 2, 496 p.
 20. Melnik E.A. *Ekonomika predpriyatiya* [Economics of the enterprise]. Moscow, Yurayt Publ., 2013. 303 p.

**COMPUTATIONAL SIMULATION
OF THE PROCESS OF INSOLES DEFORMATION DURING THE USE**

© 2018

N.V. Nosov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor

A.P. Zyabochkina, postgraduate student

Samara State Technical University, Samara (Russia)

Keywords: corrective insoles; orthoses deformation; CAE analysis; insole 3D model; processing roadmap; programming of processing using CNC machines; cost of individual insoles production.

Abstract: The paper presents the results of the study aimed at the improvement of the quality of individual corrective insole through the development and the introduction to the designing process of the modern methods of computational simulation, and the insole material analysis and consideration of their mechanical behavior during the use.

The experimental part involved the compression of samples made of composite EVA-materials. The obtained physical and mechanical properties were modeled in the CAE system. Using the CAE system, the authors studied the deformation of the insole arch under different pressures and combination of EVA-materials of different hardness.

The insole model was designed in OrthoModel and exported to the STL file format. Later, using the FreeCAD software, the STL format was exported to the STEP format as the ANSYS system is more customized for the solid-state format. The authors created the finite-element model of the insole which was exposed to different working loads. The stresses and deformations of the insole in the process of loading depending on the combination of a material and the foot geometrical parameters were obtained.

The authors of the paper suggested the technique of designing of the individual corrective insoles, selected the rational design and the material of insoles. The deformation of insoles under the load is calculated and considered in the further programming of insole processing using CNC machines. Having the insole 3D model, it is possible both to produce it using the CNC machine and to print it on a 3D printer. An important part of the paper is the justification of the production cost of individual corrective insoles. The calculations show that the expensive technology works well.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ПОД ШТАМПОВКУ НА СКЛОННОСТЬ К РАСТРЕСКИВАНИЮ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛМцАЖН 59-3,5-2,5-0,5-0,4

© 2018

А.В. Святкин, кандидат технических наук, доцент
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: латунь ЛМцАЖН; растрескивание заготовок; температура штамповки; рост зерна; пластическая деформация; сравнительный металлографический анализ; динамическая рекристаллизация; метастабильные выделения; пластичность.

Аннотация: Поскольку причина задержанного разрушения двухфазных латуней до конца не определена, промышленные поставки полуфабрикатов обладают нестабильными технологическими свойствами. В результате экспериментальных работ получены противоречивые данные касательно корневой причины растрескивания и влияния роста зерна при нагреве на склонность к образованию трещин, между тем современные требования к технологическим процессам требует максимальной минимизации потерь при переработке проката.

Статья посвящена подбору температурных интервалов горячей пластической деформации для исключения и уточнения связи размеров зерна β -фазы с растрескиванием, выполненных на основе промышленного эксперимента с последующим сравнительным металлографическим анализом партий различной технологичности. Был проведен сравнительный промышленный эксперимент между партиями различной технологичности, уточнены реальная температура горячей деформации, проведена подконтрольная штамповка с различной температуры нагрева. При последующем металлографическом анализе подтверждено предположение, что увеличение температуры штамповки может увеличивать уровень отклонений в одном случае и снижать в другом. Исследовано влияние исходной микроструктуры сплава ЛМцАЖН 59-3,5-2,5-0,5-0,4, температуры нагрева под штамповку на уровень и вид дефектности заготовок блокирующих колец синхронизатора изготовленных из различных партий труб. Установлено, что условия производства труб являются для растрескивания более значимым фактором, чем температура нагрева в заданном интервале. При нагреве до 780 °С на отдельных партиях формируется крупное зерно, что может быть обусловлено исходной текстурой зерна β' -фазы, однако не является корневой причиной разрушения. При нагреве до 700 °С не происходит растворение силицидов высокой дисперсности, что, возможно, обуславливает зарождение скрытых трещин при штамповке. Оптимальной температурой нагрева является 750 °С.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема растрескивания латунных полуфабрикатов в машиностроении привлекает уже не одно поколение исследователей и, к сожалению, до сих пор не имеет однозначного решения [1]. Вопрос о причинах растрескивания до сих пор является дискуссионным. За последние годы наибольший интерес вызывает проблема разрушения двухфазных латуней, упрочненных силицидами ($Mn, Fe)_3Si_3$ [2–4]. В работе [2] устанавливалась связь разрушения с чистотой шихты и химическим составом.

Значительный вклад в исследование проблемы внесли уральские металловеды. В работах [3–5] показано, что к растрескиванию труб ЛМцАЖН 59-3,5-2,5-0,5-0,4 (далее – ЛМцАЖН) склонны партии с содержанием α -фазы в количестве не более 5 %, а также с высоким уровнем остаточных напряжений, значимую долю которых составляют напряжения второго рода. Из этого можно заключить, что корневой причиной растрескивания труб являлось неравновесное состояние материала труб, зафиксированное при охлаждении после горячего прессования в сочетании с напряжениями, наведенными при косоалковкой правке. Корректирующие мероприятия, включающие в себя в том числе приведение материала труб в более стабилизированное состояние [5] посредством отжига, проведенные по результатам этих работ, позволили полностью исключить растрескивание трубной заготовки как у производителя труб, так и у потребителя.

В последние годы были подробно исследованы структура и свойства двухфазных комплексно легированных латуней, установлены условия разрушаемости

силицидов, связь разрушений с величиной зерна β -фазы [4; 6; 7]. В работе [8] предположено, что разрушение заготовок при штамповке обусловлено высокой температурой нагрева под штамповку, что приводит к росту зерна β -фазы и, как следствие, ослаблению межзеренной связи. Было показано, что снижение температуры нагрева с 780 до 700 °С позволяет исключить вероятность неконтролируемого роста зерна.

Отдельный интерес представляет вывод, что причиной межзеренного растрескивания после горячей штамповки является полное отсутствие пластичной α -фазы, способной релаксировать остаточные напряжения. Тем не менее последнее предположение требует перепроверки, так как в промышленных условиях растрескивание заготовок при штамповке носит не постоянный, а «всплесковый» характер. Известно, что часть партий труб проходит без рекламаций по трещинам, часть партий отличается повышенной склонностью к трещинообразованию. Вопрос о влиянии α -фазы на релаксацию остаточных напряжений пока оставим открытым, однако стоит заметить, что для данного сплава отсутствие стабильной α -фазы после штамповки является нормой, как правило, стабильная α -фаза после охлаждения штампованных заготовок не образуется. Между тем ранее было показано, что хрупкое разрушение латунных заготовок зачастую обусловлено исходным качеством полуфабрикатов – прутков или труб [2; 9].

Также опытная штамповка на сниженной температуре нагрева хоть и привела к снижению дефектности, но не исключила его полностью. Таким образом,

температура нагрева под штамповку хоть и влияет на растрескивание, но, по-видимому, не является корневой причиной всплесков разрушений. Таким образом, обоснована необходимость проверить связь склонности к разрушениям заготовок с температурой нагрева под штамповку.

Цель работы – определение влияния температуры нагрева под штамповку на растрескивание заготовок из ЛМцАЖН.

МЕТОДИКА РАБОТЫ

Для ответа на вопрос о причинах разрушения труб был спланирован комплекс мероприятий, включающий в себя лабораторные и промышленные опытно-экспериментальные работы. Для каждой партии труб фиксировался химический и фазовый состав, твердость, остаточные напряжения согласно действующим нормативным документам на поставку (ТУ 184550-106-033-97). Фактический фазовый состав определялся с помощью системы анализа изображений SIAMS 700. Также было предложено дополнительно оценивать не только фактический фазовый состав, но и теоретический, так как известно [5], что на соотношение α - и β -фаз значимое влияние оказывают условия производства труб и неоднородность фазового состава по длине и окружности трубы, обусловленная, вероятно, различными начальными условиями деформирования переднего и утяжненного конца прессованной заготовки. Теоретический расчет содержания α -фазы и цинкового эквивалента проводили на основе коэффициентов Гийе [10] по методике [11–13] с учетом поправок [14].

Оценку действительного зерна проводили по ГОСТ 21073.0 – 21073.1. Каждая деталь после штамповки прозванивалась с целью выявления трещин. По одной детали от партии проверялось на наличие остаточных напряжений первого рода путем радиального распила аналогично работе [15]. Проводился металлографический анализ с выявлением микроструктуры путем травления в $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Химический состав образцов труб определялся по ГОСТ 25086, ГОСТ 1652.1 – ГОСТ 1652.5, ГОСТ 1652.10 – ГОСТ 1652.12.

На первом этапе провели оценку фактической температуры горячей деформации деталей. Особенностью процесса штамповки кольца синхронизатора из ЛМцАЖН является то, что после печного нагрева заготовка транспортируется на пресс свободным перемещением – скатывается по лотку – до манипулятора, далее манипулятором перемещается под пресс. Полное время транспортировки составляет 9 с. За это время температура заготовки неизбежно снизится, что может привести к существенной потере пластичности. Для измерения температуры колец применялся инфракрасный термометр «Кельвин». Диапазон измеряемых температур 200...1300 °С, предел относительной допускаемой погрешности ± 1 °С. Разрешение по температуре 1 °С. Перед измерением температуры колец фиксировалась температура с термометра печи. В период измерений температура составляла 785...790 °С, что соответствует установленному техпроцессом диапазону 770...790 °С. Доведительный интервал потери температуры от печи до манипулятора составляет 82 ± 25 °С. С помощью тензодатчиков определено изменение температуры заготовок в печи. Установлено понижение температуры на 20 °С

в месте выдачи заготовок из печи по сравнению с предыдущим измерением, что объясняется подстуживанием, так как окно выдачи заготовок не защищено от теплообмена с окружающей средой. Таким образом, при температуре нагрева 770...790 °С кольца перед захватом манипулятором имеют температуру $\sim 690 \pm 25$ °С. Температура колец перед ударом штампа 670 ± 25 °С. Латунные сплавы с содержанием легирующих элементов, эквивалентных содержанию цинка 42,3...45,5 % (типа ЛМцАЖН), обладают максимальной пластичностью при температуре 620...680 °С [16]. Таким образом, реальная температура начала деформации колец из латуни ЛМцАЖН близка к оптимальному интервалу для данного сплава. Снижение температуры нагрева до 700 °С может негативно сказаться на пластичности сплава, так как в этом случае температура начала деформации, учитывая допуск в ± 10 °С, может снизиться до 590 ± 25 °С, тогда температура штамповки может совпадать в условиях упорядочивания β -фазы $\beta \rightarrow \beta'$, протекающего при 390...580 °С [17], а также с началом выделения α -фазы, что неизбежно негативно скажется на пластичности сплава [18; 19]. Отсюда более рациональной представляется штамповка с предварительным нагревом до 740...760 °С. Исходя из вышеизложенного, выбраны 3 режима нагрева под штамповку: 700 °С (в соответствии с выводами [8]), 750 °С и 780 °С (серийный режим).

На втором этапе провели подконтрольную штамповку опытно-промышленных партий при различных температурах нагрева (700 °С, 750 °С, 780 °С), причем анализировались партии, как склонные, так и не склонные к растрескиванию. С целью корректного сравнения данных по отклонениям в геометрии заготовок («недоштамповка»), в каждой партии фиксировалась представительная выборка, на которой оценивалось количество заготовок с дефектами, отштампованных в одинаковый период времени от замены инструмента и от начала работы нагревательной печи и штампа. Далее детали подвергались металлографическому анализу, а также проводилось исследование на электронном сканирующем микроскопе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дополнительно к партиям с признаком «растрескивание при штамповке», детали которых проанализированы в работе [8], отштамповано 5 партий труб ЛМцАЖН с серийной и пониженной температурой нагрева под штамповкой (серийный процесс – 780 °С, 12 мин, опытный процесс – 700 °С – 2 партии, 750 °С – 3 партии, выдержка в печи 12 мин). Все партии подвергались полному приемочному контролю, без отклонений. Химический состав анализируемых партий приведен в таблице 1, для сравнения в таблице приведен химический состав партий с растрескиванием.

В таблице 1 обращает на себя внимание расслоение по химическому составу групп партий с растрескиванием и без растрескивания, прежде всего по содержанию примесей, однако анализ этого факта значительно расширяет рамки настоящей работы и здесь подробно не рассматривается.

При проведении эксперимента со штамповкой с предварительного нагрева до температуры 700 °С (партии № 2, 3) установлен преждевременный выход из

Таблица 1. Химический состав партий труб марки ЛМцАЖН, масс. %

партия	Основные элементы					Примеси, н.б.				α-фаза расчётное
	Cu	Mn	Al	Fe	Ni	Si	Sn	Pb	Всего	%
Требования к химсоставу	58,5–60,5	3,0–4,0	2,0–3,0	0,3–0,7	0,3–0,5	≤0,2	≤0,2	≤0,2	≤0,5	≥5
партии без растрескивания при штамповке										
1	60,30	3,30	2,20	0,48	0,35	0,08	0,05	0,06	0,19	19,3
2	59,70	3,40	2,30	0,45	0,37	0,07	0,05	0,08	0,20	12,1
3	60,20	3,50	2,30	0,45	0,43	0,07	0,05	0,05	0,17	17,6
4	59,50	3,50	2,40	0,59	0,39	0,07	0,04	0,06	0,17	8,9
5	59,90	3,40	2,20	0,51	0,37	0,07	0,05	0,06	0,18	16,0
партии с растрескиванием при штамповке										
1'	60,49	3,09	2,30	0,70	0,49	0,15	0,08	0,20	0,43	22,6
2'	60,50	3,07	2,19	0,67	0,43	0,15	0,16	0,19	0,50	23,6
3'	60,2	3,01	2,27	0,62	0,43	0,12	0,11	0,18	0,41	18,5
4'	59,8	3,60	2,40	0,48	0,48	0,14	0,05	0,02	0,21	13,7
5'	59,4	3,20	2,30	0,35	0,33	0,11	0,08	0,17	0,36	8,9

стройка штампового инструмента, в дальнейшем опытные партии штамповались только с предварительного нагрева до 750 °С (партии № 1, 4, 5).

Результаты по дефекту «недоштамповка», который описывает все отклонения по геометрии (как правило, незаполнение формы), выявленные при 100 %-ном контроле заготовок, приведены на рис. 1.

На операции «прозванивание» трещины в заготовках не выявлены ни в одной партии. Таким образом, были получены результаты, не вполне соответствующие результатам первого промышленного эксперимента [8]. От всех подконтрольных партий были отобраны заготовки для металлографического анализа. Для сравнения с ними были представлены заготовки из партий (№ 1'–5') с растрескиванием штампованных заготовок. Основное

различие между партиями первого и второго экспериментов состояло в том, что первый эксперимент проводился в период повышенной дефектности (растрескивания), второй – на партиях без растрескивания. Полученные результаты показывают, как значительно могут меняться технологические свойства сплава между различными партиями труб, т.е. фактически условиями их производства. При этом в рамках существующих технических требований к сплаву возможно как получение партий, у которых повышение температуры от 700 до 780 °С повышает склонность к хрупкому разрушению [8], так и партий, аналогичное повышение температуры которых повышает пластичность (партии № 1–5) при отсутствии растрескивания. Следует заметить, что это согласуется с данными, приведенными в работах [2; 17],

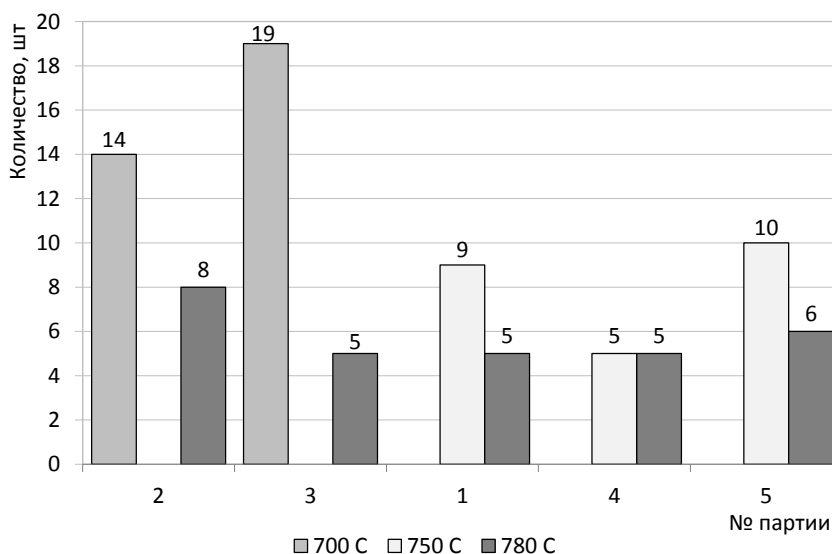


Рис. 1. Уровень брака по дефекту «недоштамповка» на заготовках из представительной выборки при различной температуре штамповки

где показано, что в зависимости от химического состава сплав ЛМцАЖН можно разделить на 2 группы с различными интервалами температурного перехода $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ и $\beta \rightarrow \beta'$.

На рис. 2 приведены фотографии макроструктуры заготовок опытных партий. Проиллюстрировано, что структура заготовок после штамповки имеет две зоны – с выраженной пластической деформацией зерна

и с равноосным зерном. При этом в двух случаях при штамповке с нагрева до 780 °С выявлено значительное укрупнение зерна (рис. 2 в), что не привело к растрескиванию ни одной заготовки в партии. Таким образом, протекание вторичной рекристаллизации при нагреве под штамповку, вероятно, не является корневой причиной разрушений. Рис. 2 иллюстрирует, что после штамповки процесс динамической рекристаллизации на

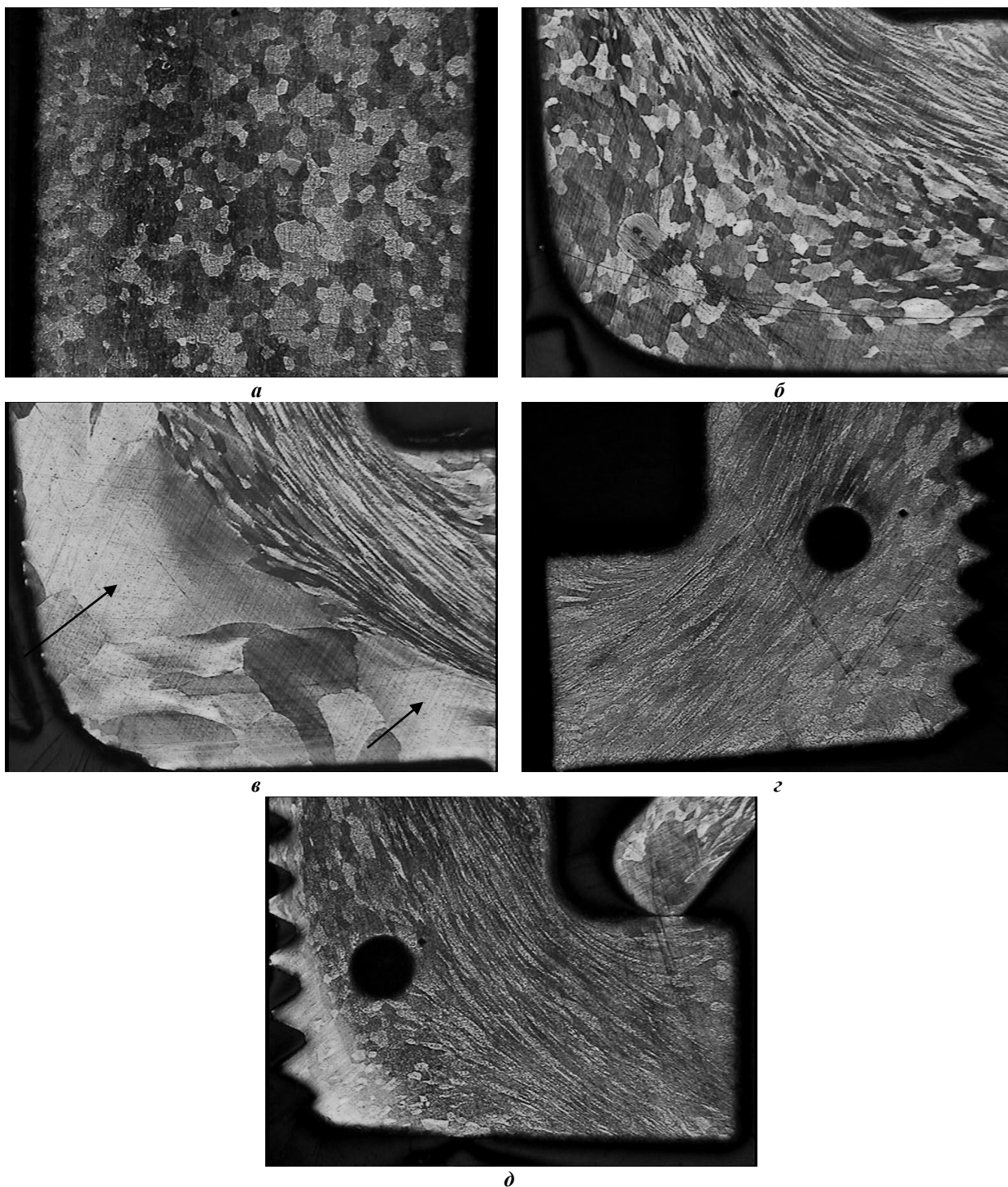


Рис. 2. Размер действительного зерна β -фазы и макроструктура партия 4, $\times 16$
 а – исходная заготовка; б – штампованная заготовка (t нагрева 750 °С);
 в – штампованная заготовка (t нагрева 780 °С), стрелками указана вторичная рекристаллизация;
 г – готовая деталь (t нагрева под штамповку 700 °С); д – готовая деталь (t нагрева 780 °С)

отдельных участках заготовок протекает не до конца, напротив, в другой части заготовки сохраняется температура, достаточная для протекания вторичной рекристаллизации. При этом с уменьшением температуры нагрева увеличивается доля участка заготовки с нерекристаллизованными зёрнами (рис. 2 б–д). Установлено, что на отдельных партиях труб в состоянии поставки по внутренней поверхности в структуре выявляются участки с вытянутым зёрном, характерным для холодной деформации (рис. 3). Это указывает на то, что окончание прессования на заводе-изготовителе произошло при пониженной температуре, что привело к деформации на локальных участках внутренней поверхности труб. Таким образом, процесс резкого укрупнения зерна при штамповке может быть обусловлен в том числе исходной структурой труб, что приводит к формированию на отдельных участках текстуры зёрен β' -фазы (рис. 3). Для подтверждения предположения проводили провоцирующий нагрев до 780 °С фрагментов с наличием текстуры β' -фазы. В результате получали зерно, аналогичное рис. 2 в. Таким образом, помимо температуры нагрева под штамповку, фактором, способствующим протеканию вторичной рекристаллизации, являются условия производства труб на заводе-изготовителе. При этом отмечено, что резкое укрупнение размера зерна отмечается только на заготовках, нагретых до температуры 780 °С.

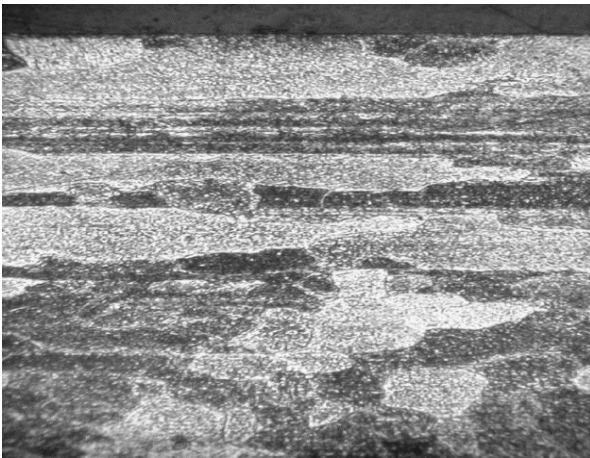
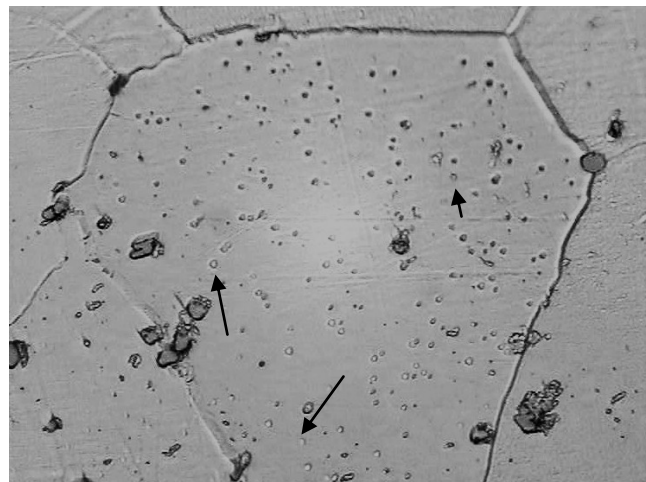


Рис. 3. Текстура зёрен β' -фазы, на поверхности трубной заготовки партии 4, $\times 50$

Сравнительный металлографический анализ партий № 1–5 и № 1'–5' (без растрескивания и с растрескиванием) выявил некоторые различия в микроструктуре. Микроструктура основы в партиях № 1–5 состоит из однородных зёрен β -фазы. Во всех образцах партий № 1'–5' в зёрнах β -фазы и вокруг силицидов выявляются признаки начального выделения α -фазы – метастабильные когерентные выделения правильной формы, границы зёрен утолщены (рис. 4). Обобщенные данные по сравнению партий с «растрескиванием» и «без растрескивания» приведены в таблице 2.

При штамповке заготовок с температуры 700 °С когерентные выделения вокруг силицидов практически не выявляются, что обусловлено меньшим перегревом сплава относительно линии фазового равновесия $\alpha+\beta\rightarrow\beta$.

Основным выводом, следующим из таблицы 2, является различная технологичность партий сплава при повышении и понижении температуры штамповки: если в партиях с «растрескиванием» уменьшение температуры нагрева снижает уровень брака по трещинам и по «недоштамповкам», то в партиях «без растрескивания» уменьшение температуры нагрева приводит к увеличению «недоштамповок», т. е. фактически снижается пластичность. При этом размер действительного зерна в среднем больше в партиях, не склонных к разрушению.



а



б

Рис. 4. Когерентные выделения (указаны стрелками), партия № 1', увеличение: а – $\times 500$; б – $\times 1000$

Пожалуй, большую информацию для понимания причин резкого изменения технологичности дает рис. 5. На нем показан приблизительный интервал перехода $\beta\leftrightarrow\alpha+\beta$ сплава с нанесенными вертикалями, отвечающими за различный уровень цинкового эквивалента [10].

В зависимости от разброса химического состава в пределах 2,1 % $Zn_{экв}$ температура начала $\beta\leftrightarrow\alpha+\beta$ может отличаться на ~ 115 °С [20; 21], что, естественно, негативно сказывается на стабильности технологических свойств.

После проведения металлографического анализа заготовок партии № 1 были изучены под электронным микроскопом. Во вторичных электронах выявлено, что

Таблица 2. Сравнительный анализ «дефектных» и «бездефектных» партий

Партии	Техпроцесс	Температура штамповки, °С	Трещины, %	α-фаза	Отклонения по геометрии*, %	Балл зерна β-фазы
«с трещинами»	базовый	780	21	когерентная по границам зерен и в зерне	13,0	4, ед. 0
	опытный	700	3	единичные когерентные выделения	11,0	4, ед. 2
«без трещин»	базовый	780	0	отсутствует	6,0	0...4
	опытный	750	0		8,0	0...4
	опытный	700	0		16,5	2...4

* по представительной выборке. Данные по отклонениям геометрических параметров между опытными партиями усреднены

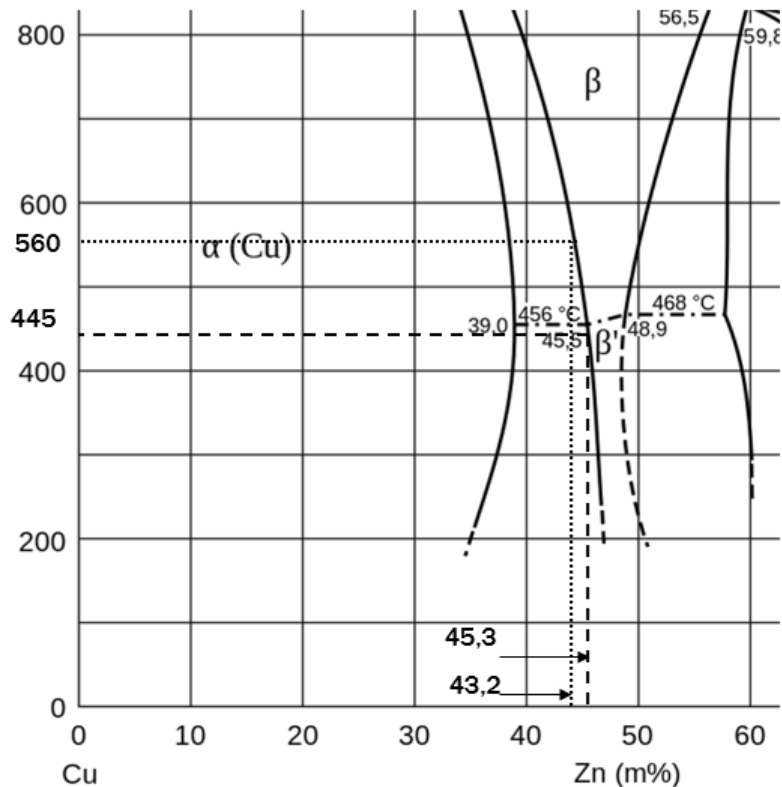


Рис. 5. Фрагмент диаграммы Cu-Zn, иллюстрирующий разность фазового перехода $\beta \leftrightarrow \alpha + \beta$ в зависимости от химического состава сплава ЛМцАЖН

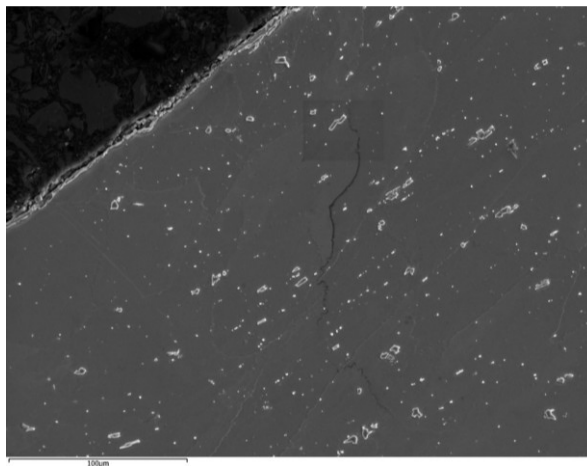


Рис. 6. Трещина в образце (изображение во вторичных электронах)

при нагреве заготовок до 700 °С в структуре выявляется большое количество включений на основе системы Mn-Fe-Si (силициды) высокой дисперсности (рис. 6), в отличие от заготовок с нагревом до 780 °С. Наличие силицидов высокой дисперсности, видимо растворяющихся при дальнейшем повышении температуры, способствует повышению твердости и в то же время приводит к снижению пластичности сплава, а значит, увеличивает риск растрескивания при штамповке. Действительно, в одном образце была обнаружена микротрещина, не выявленная при металлографическом анализе (рис. 6).

Трещина имеет как межкристаллитный, так и транскристаллитный характер, но не выходит на поверхность заготовки. Тем не менее наличие дефекта такого рода подтверждает невозможность применения указанной температуры нагрева под штамповку в рамках существующей технологии.

Таким образом, признано целесообразным снижение температуры штамповки до 750±10 °С. Дальнейшая переработка промышленных партий подтвердила перспективность выбранного режима.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В рамках существующих технических требований на поставку латуни ЛМцАЖН возможно получение партий с качественно различными технологическими свойствами. При этом часть партий склонна к растрескиванию при штамповке.

2. В результате штамповки в заготовках формируется две зоны: зона с рекристаллизованным зерном и зона с пластически деформированными зёрнами.

3. Рост зерна при нагреве до 780 °С обусловлен не только температурой, но и условиями производства труб, в частности формированием текстуры зерен β'-фазы вследствие подстуживания при прессовании.

4. Нагрев до температуры 780 °С не является основной причиной растрескивания, однако такая температура является завышенной, что провоцирует рост зерна β-фазы на отдельных участках.

5. При охлаждении на воздухе заготовок с температуры 700 °С и выше фиксируется однофазная основа сплава, стабильная α-фаза не выделяется ни при каких условиях.

6. Штамповка с печного нагрева до 700 °С увеличивает количество отклонений по геометрии и может провоцировать образование скрытых трещин.

7. Склонность к разрушению, по-видимому, определяется температурой перехода β→β+α и β→β', что зависит от химического состава.

8. Наиболее оптимальной температурой нагрева под штамповку является 750±10 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобылев А.В. Растрескивание медных сплавов. М.: Металлургия, 1993. 352 с.
2. Курбаткин И.И., Белов Н.А., Райков Ю.Н., Горин А.Д., Антипов В.В. Формирование структуры многокомпонентной марганцевой латуни и ее связь с появлением брака // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2002. № 5. С. 58–62.
3. Тропотов А.В., Жукова Л.М., Рязанцев Ю.В., Копыл М.Д., Котляров И.В. Оптимизация химиче-

ского состава и свойств специальных латуней для изготовления блокирующих колец синхронизаторов коробки передач // Материалы в автомобилестроении: материалы II Международной научно-практической конференции. Тольятти: АВТОВАЗ, 2004. С. 389–394.

4. Тропотов А.В., Пугачева Н.Б., Рязанцев Ю.В., Жукова Л.М. Исследование остаточных напряжений в изделиях, изготовленных из сложнолегированных латуней // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 1. С. 28–32.
5. Овчинников А.С., Логинов Ю.Н. Разработка технологии изготовления труб из сложнолегированной латуни ЛМцАЖН // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 11. С. 24–28.
6. Пугачева Н.Б. Структура промышленных α+β-латуней // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 2. С. 23–29.
7. Пугачева Н.Б., Тропотов А.В., Смирнов С.В., Кузьмин О.С. Влияние содержания железа в легированной латуни ЛМцАЖКС на состав и морфологию силицидов (Fe,Mn)₃Si₃ // Физика металлов и металловедение. 2000. Т. 89. № 1. С. 62–69.
8. Пугачева Н.Б., Лебедь А.В. Влияние структуры прессованной трубной заготовки из латуни 59Cu-3,5Mn-2,5Al-0,5Fe-0,4Ni на характер разрушения при последующей горячей штамповке // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2012. № 4. С. 180–187.
9. Копыл М.Д., Азизбеян В.Г. Исследование причин трещинообразования в процессе изготовления блокирующих колец синхронизаторов из сложнолегированной латуни марки ЛМцАЖН на Волжском автозаводе // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник трудов III Международной конференции. М.: ФГБУН ИМиМ им. А.А. Байкова, 2009. С. 360–362.
10. Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. М.: МИСИС, 2001. 416 с.
11. Котов Д.А., Мысик Р.К., Еремин А.А., Волков М.И., Жукова Л.М. Прогнозирование фазового состава сложнолегированных латуней // Литейщик России. 2005. № 9. С. 17–21.
12. Святкин А.В. Обеспечение стабильности фазового состава и свойств износостойких латуней типа ЛМцА для изготовления деталей автомобильного назначения : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2009. 165 с.
13. Муратов В.С., Святкин А.В. Совершенствование технологии изготовления прутков из латуни типа ЛМцА // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 2. С. 36–39.
14. Шендерей П.Э., Святкин М.В., Святкин А.В., Лазутов П.Н., Прасолов С.Г. Определение практической применимости прогнозирования фазового состава сложнолегированных латуней // Евразийское научное объединение. 2015. Т. 1. № 7. С. 35–37.
15. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество продукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
16. Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.

17. Курбаткин И.И., Белов Н.А., Райков Ю.Н., Румянцева О.В., Похлебенина Л.А., Антипов В.В. Влияние легирующих элементов и технологических факторов на фазовый состав и свойства латунных труб, применяемых в автомобильной промышленности // Цветные металлы. 2001. № 5. С. 73–76.
18. Святкин А.В., Муратов В.С. Исследование зависимости фазового состава и твердости от температуры отжига двухфазной латуни ЛМЦА 58-2-1 // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 10. С. 37–39.
19. Курбаткин И.И., Пружинин И.Ф., Фалкон В.И., Курбатов В.П. Влияние химического состава и режимов обработки на механические и эксплуатационные свойства кремнисто-марганцовистых латуней // Цветные металлы. 1996. № 9. С. 60–63.
20. Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Лысова Е.В. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. М.: Наука, 1979. 375 с.
21. Диаграммы состояния двойных металлических систем. В 3 т. Т. 3. Кн. II / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1997. 1024 с.
9. Kopyl V.D., Azizbekyan V.G. Research of the reasons cracks formation in the production course of the blocking rings of synchronizers from complex alloy brass Cu-Mn-Al-Fe-Ni on the Volga automobile works. *Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov: sbornik trudov III Mezhdunarodnoy konferentsii*. Moscow, FGBUN IMiM im. A.A. Baykova Publ., 2009, pp. 360–362.
10. Kolachev B.A., Elagin V.I., Livanov V.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov i splavov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Nonferrous Metals and Alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2001. 416 p.
11. Kotov D.A., Mysik R.K., Eremin A.A., Volkov M.I., Zhukova L.M. Prediction of the phase composition of complex alloyed brass. *Liteyshchik Rossii*, 2005, no. 9, pp. 17–21.
12. Svyatkin A.V. *Obespechenie stabilnosti fazovogo sostava i svoystv iznosostoykikh latuney tipa LMtSA dlya izgotovleniya detaley avtomobilnogo naznacheniya*. Dis. kand. tekhn. nauk [Ensuring stability of phase composition and properties of wear-resistant brasses of Face type for the manufacture of automotive parts]. Samara, 2009. 165 p.
13. Muratov V.S., Svyatkin A.V. Perfection of manufacturing technology of LMTsA brass bars. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni*, 2007, no. 2, pp. 36–39.
14. Shenderoy P.E., Svyatkin M.V., Svyatkin A.V., Lazutov P.N., Prasolov S.G. Determination of the practical applicability of predicting the phase composition of complex alloyed brass. *Evrasiyskoe nauchnoe obedinenie*, 2015, vol. 1, no. 7, pp. 35–37.
15. Sokolov I.A., Uralskiy V.I. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo produktsii* [Residual stresses and product quality]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 96 p.
16. Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Med i mednye splavy. Otechestvennye i zarubezhnye marki* [Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2004. 336 p.
17. Kurbatkin I.I., Belov N.A., Raykov Yu.N., Rummyantseva O.V., Pokhlebenina L.A., Antipov V.V. Effect of alloying elements and technological factors on phase composition and properties of brass tubes used in the automotive industry. *Tsvetnye metally*, 2001, no. 5, pp. 73–76.
18. Svyatkin A.V., Muratov V.S. Research of dependence of phase structure and hardness from annealing temperature LMtSA58-2-1 two-phase brass. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni*, 2009, no. 10, pp. 37–39.
19. Kurbatkin I.I., Pruzhinin I.F., Falcon V.I., Kurbatov V.P. Effect of chemical compound and treatment schedule on the mechanical and operational properties of silicon-manganese brasses. *Tsvetnye metally*, 1996, no. 9, pp. 60–63.
20. Drits M.E., Bocharov N.R., Guzey L.S., Lysova E.V. *Dvoynye i mnogokomponentnye sistemy na osnove medi* [Double and multicomponent systems on the basis of copper]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 375 p.
21. Lyakisheva N.P., ed. *Diagrammy sostoyaniya dvoynnykh metallicheskiykh sistem* [Charts of a condition of double metal systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1997. Vol. 3, kn. II, 1024 p.

REFERENCES

1. Bobylev A.V. *Rastreskivanie mednykh splavov* [Cracking of copper alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1993. 352 p.
2. Kurbatkin I.I., Belov N.A., Raykov Yu.N., Gorin A.D., Antipov V.V. Formation of the structure of multi-component manganese brass and its relationship with the appearance of marriage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2002, no. 5, pp. 58–62.
3. Tropotov A.B., Zhukova L.M., Ryazantsev Yu.V., Kopyl M.D., Kotlyarov I.V. Optimization of the chemical composition and properties of the special brass for the manufacture of blocking rings of synchronizers of a transmission. *Materialy v avtomobilestroenii: materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Tolyatti, AVTOVAZ Publ., 2004, pp. 389–394.
4. Tropotov A.V., Pugacheva N.B., Ryazantsev Yu.V., Zhukova L.M. A study of residual stresses in articles produced from complexly-alloyed brass. *Metal Science and Heat Treatment*, 2006, vol. 48, no. 1-2, pp. 31–35.
5. Ovchinnikov A.S., Loginov Yu.N. Development of technology for manufacture of Cu-Zn-Mn-Al-Fe-Ni brass tubes. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni*, 2014, no. 11, pp. 24–28.
6. Pugacheva N.B. Structure of industrial $\alpha+\beta$ brasses. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, vol. 49, no. 1-2, pp. 67–74.
7. Pugacheva N.B., Tropotov A.V., Smirnov S.V., Kuzmin O.S. Effect of iron content on the composition and morphology of $(\text{Fe,Mn})_5\text{Si}_3$ silicide particles in alloyed LMTssaZhKS brass. *The physics of metals and metallography*, 2000, vol. 89, no. 1, pp. 62–69.
8. Pugacheva N.B., Lebed A.V. The influence of the pressed hollow billet of brass 59Cu-3,5Mn-2,5Al-0,5Fe-0,4Ni structure on the fracture mode of destruction with following hot stamping. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki*, 2012, no. 4, pp. 180–187.

**THE INFLUENCE OF HEATING TEMPERATURE FOR FORGING
ON THE CRACKING TENDENCY OF A Cu-Mn-Al-Fe-Ni 59-3.5-2.5-0.5-0.4 WORKPIECE**

© 2018

A.V. Svyatkin, PhD (Engineering), Associate Professor
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: CuMnAlFeNi brass; workpiece cracking; forging temperature; grain growth; plastic deformation; comparative metallographic analysis; dynamic recrystallization; metastable precipitation; plasticity.

Abstract: Since the cause of the delayed destruction of the two-phase brasses is not fully determined, the commercial supplies of semi-finished products have unstable technological properties. As the result of experimental work, the author obtained the contradictory data on the root cause of cracking and the influence of grain growth during heating on the crack formation tendency. Meanwhile, the current requirements to the technological processes need the maximum loss minimization during the mill products processing.

The paper covers the issue of the selection of temperature intervals of hot plastic deformation to eliminate and determine the relationship between the β -phase grain size and the cracking carried out on the basis of industrial experiment followed by the comparative metallographic analysis of batches with different handling properties. For this purpose, the author carried out the comparative industrial experiment between the batches with different handling properties, determined the actual temperature of hot deformation, and performed the controlled forging at different heating temperatures. The subsequent metallographic analysis proved the assumption that the increase in the forging temperature can increase the level of deviations in some cases and reduce in the others. The author studied the influence of the initial microstructure of the CuMnAlFeNi 59-3.5-2.5-0.5-0.4 alloy, the heating temperature of forging by the level and the type of defects of work material for the blocking synchronizer rings made of different batches of tubes. It is determined that the conditions for the production of pipes are the more significant factor for cracking than the heating temperature at the certain interval. When heating up to 780 °C, the large grains are formed in the individual batches that may be caused by the initial β' -phase grain texture but is not the root cause of destruction. When heating up to 700 °C, the high dispersion silicides do not dissolve, what may cause the origination of hidden cracks during forging. The optimum heating temperature is 750 °C.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИЗНОСА И РАЗРУШЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

© 2018

А.С. Селиванов, кандидат технических наук, доцент,

заместитель ректора-директор Института машиностроения

А.А. Балахнина, старший преподаватель кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

И.В. Сорока, старший преподаватель кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: износ и разрушение инструмента; выглаживание; ультразвуковое выглаживание; пластическая деформация инструмента; разрушение припоя и выпадение рабочей вставки; разрушение резьбового соединения.

Аннотация: В условиях необходимости внедрения передовых производственных технологий для соответствия разрабатываемых решений принципам индустрии 4.0 требуется развитие элементов автоматизации технологических процессов, включая прогнозирование. Понимание механизмов изнашивания инструмента и особенностей его разрушения при ультразвуковой упрочняющей обработке выглаживанием позволит разработать принципы прогнозирования ресурса работы инструмента и оптимизировать расходы на сопровождение технологических процессов. В статье рассмотрены особенности износа и разрушения инструмента при ультразвуковом выглаживании деталей машин. Показано, что при ультразвуковой обработке наряду с износом инструмента наблюдаются такие эффекты, как пластическая деформация инструмента, разрушение припоя и выпадение рабочей вставки, разрушение резьбового соединения в ультразвуковом концентраторе. В ходе проведенного анализа результатов выполненных микроскопических исследований определен ход поэтапного развития деформаций материала инструмента, дальнейшее развитие дефектов в процессе обработки до критических размеров. Определено положение основных очагов возникновения износа выглаживающего инструмента. Рассмотрены принципиальные отличия в развитии очагов износа при ультразвуковом выглаживании. Выполнен анализ графических материалов, полученных в процессе обработки при ультразвуковом выглаживании, определен характер дефектов рабочего участка инструмента. Сформулировано предположение о влиянии кавитации слоя смазочно-охлаждающих технологических средств или масляных пленок, остающегося на поверхности детали, на возникающие дефекты выглаживающего инструмента.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества механической обработки деталей машин является приоритетной задачей современного машиностроения [1–3]. Особую актуальность эта задача приобретает на финишных операциях технологического процесса изготовления деталей машин, когда окончательно формируются микрогеометрические и физико-механические свойства поверхностного слоя, особенно при обработке изделий из труднообрабатываемых материалов с особыми исходными физико-механическими свойствами [4–6]. Для получения качественных изделий из таких материалов в металлообработке нашли сравнительно новые, высокоэффективные методы комбинированных технологий, когда наряду с механическим воздействием в поверхностный слой обрабатываемого изделия вводится концентрированный поток дополнительной энергии, например энергии ультразвукового поля [7–9]. Одним из перспективных методов финишной обработки деталей машин являются технологии без снятия стружки – методы поверхностного пластического деформирования (ППД) [10]. Обработка деталей машин выглаживанием, как один из методов ППД, относится к статическим методам модификации поверхностного слоя пластическим деформированием специальным инструментом – выглаживателем [10]. В настоящее время теоретически обоснована и практически доказана эффективность применения технологии выглаживания для обеспечения заданных показателей качества деталей машин [9; 11]. Применение комбинированной обработки с введением энергии ультразвуковых колебаний позволяет расширить технологические возможности выглаживания, а в ряде случа-

ев и обеспечить единственную возможность качественной обработки деталей, особенно из труднообрабатываемых материалов.

В качестве инструментов для выглаживания отечественной промышленностью освоен серийный выпуск наконечников из синтетических алмазов (АСПК) типа «Карбонадо», термостойкого композиционного материала АКТМ и наконечников из природных алмазов со сферической, конической и цилиндрической рабочей частью. Кроме этого, для изготовления выглаживающих инструментов нашли применение сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора (CBN), твердые сплавы ВК6, ВК6ОМ, ВК8 как в сочетании с износостойкими покрытиями, так и без них [10]. Применение отмеченных инструментов возможно и для технологии ультразвуковой обработки. При этом вопрос износостойкости выглаживающего инструмента в условиях обработки с применением энергии ультразвука является актуальной задачей. Исследованию износостойкости, трещиностойкости и разрушения инструментов при различных методах механической обработки посвящены работы [12–14]. Вопросы изнашивания выглаживающих инструментов при обычном выглаживании, в том числе и без применения смазочно-охлаждающих жидкостей, на основе теплофизического анализа рассмотрены в работах [15–17]. Однако в литературе практически отсутствуют сведения об испытаниях на стойкость различного типа инструмента, работающего в ультразвуковом поле. Также отсутствуют практические рекомендации по рациональному инструментальному обеспечению технологии ультразвукового выглаживания.

Цель работы – установление отличительных механизмов изнашивания инструмента при ультразвуковом выглаживании по сравнению с обычной обработкой.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование проводили на токарном станке с ЧПУ модели 16Б16Т1С1, оснащённом технологическим комплексом для ультразвукового выглаживания (рис. 1 а) [8]. Технологический комплекс (рис. 1 б) состоит из устройства 1 с ультразвуковой колебательной системой на основе магнетострикционного преобразователя и конического концентратора и ультразвукового генератора 2 мощностью 0,4 кВт и частотой 22 кГц [8].

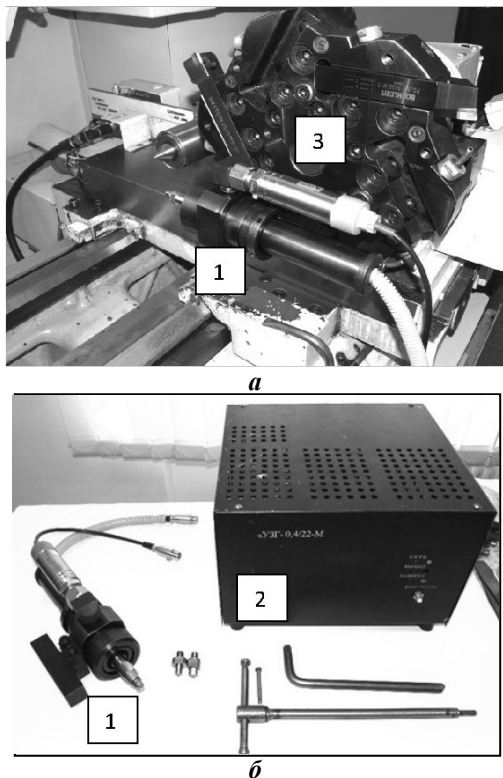


Рис. 1. Технологическое оснащение для ультразвукового выглаживания:

1 – ультразвуковое устройство для выглаживания; 2 – ультразвуковой генератор; 3 – револьверная головка токарного станка с ЧПУ

В качестве инструментов применяли стандартные выглаживающие наконечники из синтетического алмаза (АСПК «Карбонадо») со сферической рабочей вставкой радиусом 2,5 мм и исполнения II (по ТУ 2-037-100-89) с нарезанной на хвостовой части резьбой М5. Наконечники ввинчивали в специально изготовленный переходник, который устанавливали в ультразвуковом волноводе. На рис. 2 представлено фото инструментальной оснастки, используемой в экспериментальном исследовании. Инструменты, используемые в эксперименте, были обозначены соответственно «ОВ» – для обычного выглаживания и «УЗВ» – для ультразвукового.

Обработку обычным и ультразвуковым выглаживанием проводили на предварительно обточенных и шли-

фованных образцах из стали ХВГ (HRC 60...63) диаметром 40 мм и длиной 150 мм, с исходной шероховатостью $Ra=1,62$ мкм. Обработку производили на следующих режимах: статическое усилие 200 Н; подача $S=0,15$ мм/об; окружная скорость V составляла 35 м/мин. Наложение ультразвуковых колебаний на инструмент осуществлялось с амплитудой $\zeta=5$ мкм и частотой $f=22$ кГц в направлении внедрения выглаживающего инструмента. Обработку образцов выполняли в следующем порядке: новым инструментом с обозначением «ОВ» производили обработку цилиндрического участка образца длиной 100 мм без ультразвука; затем инструмент выкручивали из волновода для проведения микроскопического анализа; в волновод устанавливали новый инструмент с обозначением «УЗВ» и выполняли выглаживание цилиндрического участка длиной 100 мм с ультразвуком на тех же режимах. После обработки инструмент с обозначением «УЗВ» выкручивали для проведения микроскопического анализа. Далее снова устанавливали уже использованные инструменты сначала с обозначением «ОВ», а затем «УЗВ» и ими производили поочередную обработку цилиндрического участка новых образцов соответственно обычным и ультразвуковым выглаживанием. В такой последовательности всего было обработано 50 образцов.

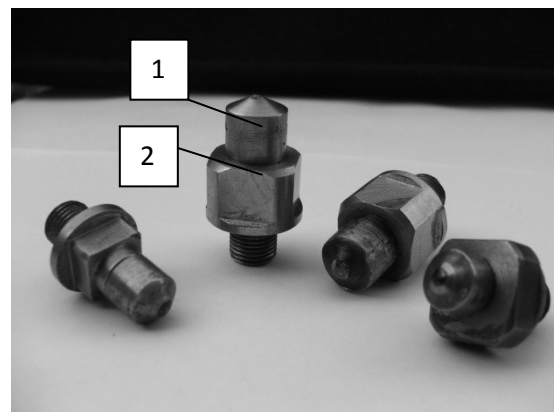


Рис. 2. Инструменты для ультразвукового выглаживания:

1 – наконечник из синтетического алмаза АСПК (по ТУ2-037-100-89) с радиусом рабочей вставки 2,5 мм; 2 – переходник для установки в ультразвуковом волноводе

Идентификацию состояния выглаживающих инструментов после обычного и ультразвукового выглаживания проводили с помощью оптической микроскопии на металлографическом микроскопе «Лабомет» с максимальным увеличением X800 и с помощью лазерной сканирующей микроскопии на микроскопе Lext.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов исследования показал, что при обычном и ультразвуковом выглаживании наблюдаются как общие черты характера износа и повреждения инструмента, так и принципиальные отличия, свойственные особенностям ультразвуковой обработки. Так, например,



Рис. 3. Характер поврежденности инструмента при ультразвуковом выглаживании

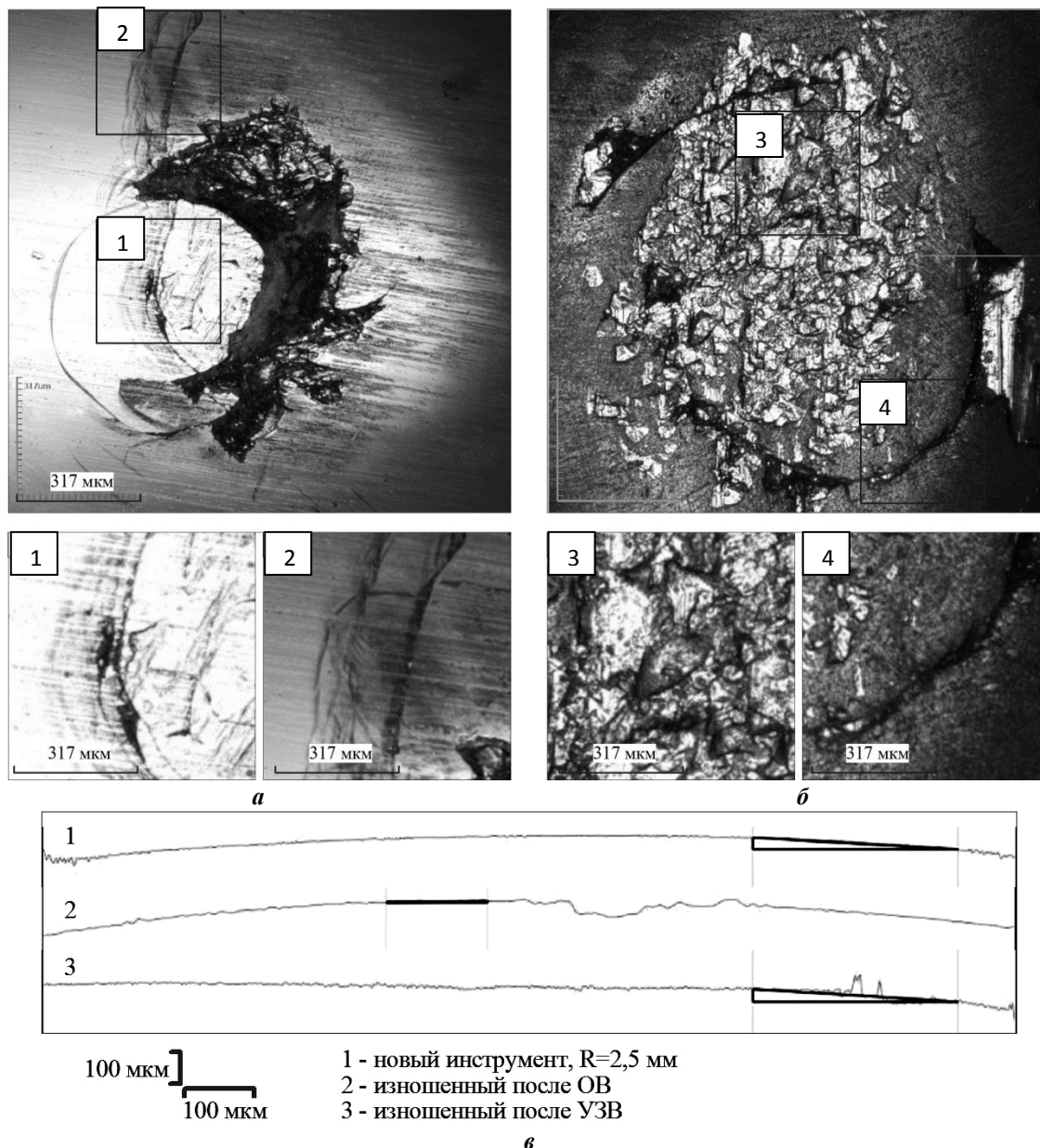


Рис. 4. Характер очагов износа инструмента:
 а – после обычного выглаживания; б – после ультразвукового выглаживания;
 в – профилограмма рабочей поверхности инструментов.
 Увеличенные зоны: 1 – система микротрещин на поверхности инструмента;
 2 – зародившиеся макротрещины; 3 – микросколы на поверхности инструмента;
 4 – пластическое «осаждение» рабочей поверхности инструмента

общим характером повреждения инструмента является его деформирование на краевом участке в результате «выхода» с цилиндрического участка на фаску при обработке образцов. При этом на рабочей поверхности инструмента наблюдаются пластически деформированные вмятины. Еще одним видом поврежденности инструмента, характерным как для обычного, так и для ультразвукового выглаживания, является пластическая деформация его контактной поверхности, в результате которой искажается форма профиля рабочей части инструмента. Для инструментов, работающих в ультразвуковом поле, в единственном случае наблюдалось «выпадение» инструментальной вставки вследствие разрушения припоя из-за высокочастотных вибраций, а также разрушение резьбового участка переходника (рис. 3). При идентификации износа инструмента принято считать геометрические параметры износа инструмента, характеризуемые площадкой и величиной (глубиной лунки) износа [18–20], хотя на самом деле очагам износа инструмента свойственна геометрически сложная топография поверхности, обусловленная особенностями механизмов его изнашивания.

На рис. 4 представлены фотографии инструментов после обычного и ультразвукового выглаживания, полученные с помощью лазерной сканирующей микроскопии, и профилограмма рабочей поверхности инструментов. Как следует из анализа рисунков, на поверхности инструментов наблюдаются принципиальные отличия в развитии очагов износа и механизмов изнашивания инструментов при обычном и ультразвуковом выглаживании.

Микроскопические исследования показали, что при обычной обработке в результате трения изначально развивается система микродеформационных «складок» материала, ориентированных перпендикулярно направлению вектора скорости (см. рис. 4 а, увеличенная зона 1). При дальнейшей эксплуатации инструмента микротрещины развиваются до критических размеров, объединяются друг с другом, и происходит отделение части материала, т. е. его износ (рис 4 а, увеличенная зона 2). Наиболее развитый участок очага износа выглаживающего инструмента смещен относительно центра оси инструмента в область, где в процессе обработки действует результирующая максимальная нагрузка (рис. 4 а). Принципиальные отличия в развитии очагов износа наблюдаются при ультразвуковом выглаживании. В этом случае инструмент испытывает значительные динамические нагрузки, и форма очага его износа имеет специфическую форму (рис. 4 б). Инструмент оказывает ударное воздействие на обрабатываемый материал практически в перпендикулярном направлении. При этом касательная сила трения минимальна, и в результате такой многочастотной ударной нагрузки вероятное разрушение инструмента будет происходить преимущественно микроскопами (рис. 4 б, увеличенная зона 3). Как видно из фотографий, очаг износа рабочего участка инструмента после ультразвуковой обработки представляет собой множество микрократеров, возникших в результате хрупкого ударного разрушения. При этом величина кратеров практически одинакова. Можно предположить, что на такой характер развития очагов износа при ультразвуковой обработке оказывает влияние кавитация слоя смазочно-охлаждающих технологических сред или масля-

ных пленок, остающегося на поверхности детали. Также для инструмента после ультразвукового выглаживания характерна пластическая осадка его участка, наиболее подверженного ударной нагрузке (рис. 4 в).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Качественный анализ характера износа инструмента позволил выявить характерные отличительные особенности механизмов изнашивания и развития очагов износа при обычном и ультразвуковом выглаживании. С использованием оптической и лазерной сканирующей микроскопии установлено, что при ультразвуковой обработке характер износа инструмента обусловлен формированием микросколов в рабочей части вследствие действия высокочастотных ударных нагрузок. При обычном выглаживании преобладающим механизмом изнашивания инструмента, наоборот, является формирование деформационных микротрещин в результате действия сил трения, при этом очаг износа смещен в область действия максимальной нагрузки. Кроме того, при ультразвуковом выглаживании возможны повреждения инструмента, связанные с выпадением рабочей вставки и разрушением резьбового участка переходника в результате действия вибрационной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Bobrovskij I.N., Melnikov P.A., Lukyanov A.A. Environmental Aspects of the Green Surface Plastic Deformation Technology of Car Parts // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 50. № 1. P. 012015.
2. Brailovskii M.I., Voskoboinik A.G., D'yakov A.A., Shmidt I.V. Optimal materials for the manufacture of metal-cutting machines // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. № 10. P. 846–850.
3. Pratap A., Patra K., Dyakonov A.A. Manufacturing Miniature Products by Micro-grinding: A Review // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 969–974.
4. Taskaev S., Skokov K., Khovaylo V., Karpenkov D., Ulyanov M., Bataev D., Dyakonov A., Gutfleisch O. Effects of severe plastic deformation on the magnetic properties of terbium // AIP Advances. 2018. Vol. 8. № 4. P. 048103.
5. Popova M.A., Kuznetsov V.P., Lesnikov V.P., Popov N.A., Konakova I.P. The structure and mechanical properties of single-crystal nickel alloys with Re and Ru after high-temperature holds // Materials Science and Engineering A. 2015. Vol. 642. P. 304–308.
6. Pratap A., Sahoo P., Patra K., Dyakonov A.A. Experimental Study of Tool Wear and Grinding Forces during BK-7 Glass Micro-grinding with Modified PCD Tool // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 229. № 1. P. 012033.
7. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н., Степчева З.В. Использование ультразвука при обработке заготовок шлифованием и выглаживанием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 8. С. 43–53.
8. Малышев В.И., Левашкин Д.Г., Селиванов А.С. Автоматизация гибридных и комбинированных технологий на основе модернизации станочного оборудования и выбора кинематических связей // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 70–74.

9. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Psakhie S.G., Savrai R.A., Malygina I.Y., Davydova N.A. Tribological aspects in nanostructuring burnishing of structural steels // *Physical Mesomechanics*. 2014. Vol. 17. № 4. P. 250–264.
10. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностно-пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
11. Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Grigoriev S.N., Bobrovskij I.N. Aspects of thermal field by wide burnishing // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 91. № 1. P. 012035.
12. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Stress state of wear-resistant tool coatings // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 36. № 6. P. 454–460.
13. Tabakov V.P. Crack resistance of tool coatings in continuous cutting // *Russian Engineering Research*. 2012. Vol. 32. № 5-6. P. 464–468.
14. Tabakov V., Chikhranov A., Sizov S. Increasing of the carbide cutting tool life by developing the multilayer coatings // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 129. P. 01038.
15. Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Bobrovskij I.N. Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 66. № 1. P. 012013.
16. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Gorgots V.G., Yurovskikh A.S. The analysis of speed increase perspectives of nanostructuring burnishing with heat removal from the tool // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 124. № 1. P. 012127.
17. Kuznetsov V.P., Tarasov S.Y., Nikonov A.Y., Filipov A.V., Voropaev V.V., Dmitriev A.I. Effect of adhesion transfer on the surface pattern regularity in nanostructuring burnishing // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1783. P. 020128.
18. Tabakov V.P., Vereschaka A.S., Vereschaka A.A. Multilayer composition coatings for cutting tools: Formation and performance properties // *Mechanics and Industry*. 2017. Vol. 18. № 7. P. 706.
19. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sladkov D.V. Nano-scale multi-layered coatings for cutting tools generated using assisted filtered cathodic-vacuum-arc deposition (AFCVAD) // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 327. P. 1454–1459.
20. Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Grigoriev S.N., Bobrovskij I.N. Simulation of thermal fields using different types of wide burnishing // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 91. № 1. P. 012034.
21. Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Bobrovskij I.N., Melnikov P.A., Lukyanov A.A. Environmental Aspects of the Green Surface Plastic Deformation Technology of Car Parts. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 50, no. 1, p. 012015.
22. Brailovskii M.I., Voskoboinik A.G., D'yakonov A.A., Shmidt I.V. Optimal materials for the manufacture of metal-cutting machines. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 10, pp. 846–850.
23. Pratap A., Patra K., Dyakonov A.A. Manufacturing Miniature Products by Micro-grinding: A Review. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 969–974.
24. Taskaev S., Skokov K., Khovaylo V., Karpenkov D., Ulyanov M., Bataev D., Dyakonov A., Gutfleisch O. Effects of severe plastic deformation on the magnetic properties of terbium. *AIP Advances*, 2018, vol. 8, no. 4, p. 048103.
25. Popova M.A., Kuznetsov V.P., Lesnikov V.P., Popov N.A., Konakova I.P. The structure and mechanical properties of single-crystal nickel alloys with Re and Ru after high-temperature holds. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 642, pp. 304–308.
26. Pratap A., Sahoo P., Patra K., Dyakonov A.A. Experimental Study of Tool Wear and Grinding Forces during BK-7 Glass Micro-grinding with Modified PCD Tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 229, no. 1, p. 012033.
27. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N., Stepcheva Z.V. Using the ultrasonic fluctuations in combined process of grinding and diamond smoothing. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2007, no. 8, pp. 43–53.
28. Malyshev V.I., Levashkin D.G., Selivanov A.S. Hybrid and combined technologies automation are based on CNC-machine equipment modernization and kinematical connections choice. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 70–74.
29. Kuznetsov V.P., Makarov A.V., Psakhie S.G., Savrai R.A., Malygina I.Y., Davydova N.A. Tribological aspects in nanostructuring burnishing of structural steels. *Physical Mesomechanics*, 2014, vol. 17, no. 4, pp. 250–264.
30. Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostno-plasticheskim deformirovaniem* [Finishing and hardening treatment by surface-plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 152 p.
31. Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Grigoriev S.N., Bobrovskij I.N. Aspects of thermal field by wide burnishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, no. 1, p. 012035.
32. Tabakov V.P., Chikhranov A.V. Stress state of wear-resistant tool coatings. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 6, pp. 454–460.
33. Tabakov V.P. Crack resistance of tool coatings in continuous cutting. *Russian Engineering Research*, 2012, vol. 32, no. 5-6, pp. 464–468.
34. Tabakov V., Chikhranov A., Sizov S. Increasing of the carbide cutting tool life by developing the multilayer coatings. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01038.
35. Grigoriev S.N., Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Bobrovskij I.N. Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 66, no. 1, p. 012013.
36. Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Gorgots V.G., Yurovskikh A.S. The analysis of speed increase perspectives of nanostructuring burnishing with heat removal from the tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 124, no. 1, p. 012127.

17. Kuznetsov V.P., Tarasov S.Y., Nikonov A.Y., Filipov A.V., Voropaev V.V., Dmitriev A.I. Effect of adhesion transfer on the surface pattern regularity in nanostructuring burnishing. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1783, p. 020128.
18. Tabakov V.P., Vereschaka A.S., Vereschaka A.A. Multi-layer composition coatings for cutting tools: Formation and performance properties. *Mechanics and Industry*, 2017, vol. 18, no. 7, p. 706.
19. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sladkov D.V. Nano-scale multi-layered coatings for cutting tools generated using assisted filtered cathodic-vacuum-arc deposition (AFCVAD). *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 327, pp. 1454–1459.
20. Bobrovskij N.M., Melnikov P.A., Grigoriev S.N., Bobrovskij I.N. Simulation of thermal fields using different types of wide burnishing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, no. 1, p. 012034.

THE QUALITATIVE ANALYSIS OF SPECIAL ASPECTS OF WEAR AND DESTRUCTION OF TOOLS DURING THE ULTRASONIC BURNISHING OF THE MACHINE PARTS

© 2018

A.S. Selivanov, PhD (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Mechanical Engineering

A.A. Balakhnina, senior lecturer of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”

I.V. Soroka, senior lecturer of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: tool wear and destruction; burnishing; ultrasonic burnishing; plastic deformation of a tool; solder destruction and the loss of a working insert; threaded joint destruction.

Abstract: Under the conditions of the necessity of introduction of the advanced production technologies to match the solutions being developed, the principles of industry 4.0 require the development of the elements for the automation of technological processes including forecasting. Understanding the mechanisms of tool wear and special aspects of its destruction during the ultrasonic strengthening treatment by burnishing will allow developing the principles of forecasting of the tool operational life and optimizing the costs for support of technological processes. The paper considers the special aspects of wear and destruction of a tool during the ultrasonic burnishing of machine parts. It is found that during the ultrasonic treatment, along with the tool wear, such effects as tool plastic deformation, solder destruction and the loss of a working insert, the destruction of a threaded joint in the ultrasonic concentrator are observed. During the analysis of the results of the performed microscopic studies, the authors determined the dynamics of step-by-step deformation of tool material, the further development of defects during the processing up to the critical dimensions. The position of main points of origin of the burnishing tool wear is determined as well. The authors considered the principal differences in the development of foci of wear during the ultrasonic burnishing, carried out the analysis of graphic materials obtained during the processing with ultrasonic burnishing, and determined the nature of defects of a tool working section. The assumption about the influence of cavitation of the lubricating-cooling technological medium layer or oil films remaining on the surface of a detail on the emerging defects of a burnishing tool is made.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ТОЧЕНИИ С НАЛОЖЕНИЕМ ВИБРАЦИЙ

© 2018

А.Н. Унянин, доктор технических наук, доцент
П.Р. Финагеев, аспирант

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: точение; точение с наложением вибраций; точение с наложением ультразвуковых колебаний; тепловые потоки; температурное поле.

Аннотация: Температура процесса резания оказывает существенное влияние на качество обработанной поверхности и работоспособность инструмента. Одним из средств повышения эффективности процесса резания является рациональное использование вибраций (колебаний), в том числе ультразвуковой частоты. Однако аналитические исследования температуры точения с наложением вибраций отсутствуют. Приняли, что суммарная мощность тепловыделения при точении равна сумме мощностей тепловыделения источников, возникающих как результат перехода в теплоту работы деформирования и работы сил трения на передней и задней поверхностях инструмента. Приведены математические зависимости для расчета составляющих суммарной мощности тепловыделения. Приняли во внимание, что напряжение текучести, определяющее силы резания и трения на контактных поверхностях резца, заготовки и стружки, зависит от температуры в области пластической деформации. Закон распределения плотности тепловыделения на плоскости сдвига приняли равномерным; на поверхности контакта стружки с передней поверхностью резца приняли комбинированный закон; на поверхности контакта резца с заготовкой – несимметричный нормальный. Дана зависимость для расчета глубины резания при наложении колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Теплообмен на границах объектов, контактирующих с технологической жидкостью или воздухом, задан в форме закона Ньютона – Рихмана. Уравнения теплопроводности контактирующих объектов решали совместно с общими граничными условиями в зоне контакта, используя метод конечных элементов. Методика расчета на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в оригинальных программах. Результаты расчета температур при точении без наложения колебаний сравнивали с результатами, полученными экспериментальным путем, при этом расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 10 %. Моделирование процесса точения с наложением ультразвуковых колебаний показало, что главная составляющая силы резания P_z снижается в среднем на 11 %, максимальная температура в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой – на 20 %, максимальная температура в зоне контакта передней поверхности резца со стружкой – на 26 %.

ВВЕДЕНИЕ

Температура зоны резания оказывает существенное влияние на работоспособность инструмента, качество обработанных поверхностей деталей и производительность обработки [1; 2]. Многие задачи, возникающие при проектировании технологических операций, не могут быть решены без знания температур на контактных поверхностях инструмента и в поверхностных слоях заготовки.

Тепловые процессы при резании, в том числе при точении, достаточно полно изучены [3; 4]. При аналитическом исследовании теплофизики процесса резания, исходя из принятого маршрута тепловых потоков [5], определяют соответствующие потоки в инструмент, стружку и заготовку, а затем составляют и решают уравнения теплопроводности для каждого объекта. Недостатком такого подхода является приближенный учет распределения тепловых потоков между объектами. Теплофизические характеристики материалов заготовки и инструмента, а также механические характеристики материала заготовки (пределы прочности и текучести) существенно зависят от температуры [6].

Для определения коэффициентов, характеризующих распределение тепловых потоков между контактирующими объектами, используют формулу Ф. Шаррона [7] и аналогичные зависимости. Однако значения теплофизических характеристик материалов, входящих в эти зависимости, не могут быть точно определены, по-

скольку до начала расчета не известна температура, от которой эти характеристики зависят. Поэтому перспективным является подход, при котором дифференциальные уравнения теплопроводности объектов решают совместно с общими граничными условиями в зоне контакта [8; 9].

Одним из средств повышения эффективности процессов механической обработки является использование энергии вибраций (колебаний), в том числе ультразвукового диапазона, которые изменяют многие параметры процесса, в том числе силы и температуры [10; 11]. Однако аналитическое исследование температур при точении с наложением вибраций не выполнено.

Для адекватной оценки температурного поля в процессе точения необходимы модели, учитывающие выделение теплоты в области стружкообразования и на поверхностях контакта резца с заготовкой и стружкой, взаимное перемещение контактирующих объектов (заготовки и стружки относительно резца), зависимость теплофизических характеристик материалов контактирующих объектов (режущей части инструмента и заготовки) и механических свойств материала заготовки от температуры, а также изменение глубины резания и механических характеристик материала заготовки при наложении колебаний.

Цель работы – исследование температурного поля при точении с наложением вибраций.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При теплофизическом анализе процесса точения полагают, что теплота выделяется в области стружкообразования (в плоскости сдвига) и на поверхностях контакта резца со стружкой и заготовкой [12] (рис. 1). В тепловую энергию преобразуется не вся работа пластического деформирования, а ее большая часть [13]. Однако при расчетах считают, что в тепловую энергию преобразуется вся работа деформирования [14]. Пластическая деформация материала заготовки осуществляется в объеме. В наших исследованиях приняты допущение, что источник тепловыделения, эквивалентный работе пластического деформирования, возникает в условной плоскости сдвига [12].

Общая мощность тепловыделения при точении равна сумме мощностей тепловыделения источников, возникающих в результате перехода в теплоту работы деформирования W_g и работы сил трения на передней W_{1T} и задней W_{2T} поверхностях резца.

Мощности источников тепловыделения можно определить как [3; 12]:

$$W_{1T} = F_1 \cdot V_1; W_{2T} = F_2 \cdot V;$$

$$W_g = P_Z \cdot V - (W_{1T} + W_{2T}),$$

где F_1 и F_2 – силы трения на поверхности контакта резца со стружкой и заготовкой соответственно, Н;

V – скорость резания, м/с;

P_Z – главная составляющая силы резания, Н;

V_1 – скорость перемещения стружки относительно резца, м/с: $V_1 = V/k_c$, где k_c – коэффициент утолщения стружки.

Из работ [15; 16] следуют зависимости:

$$F_1 = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left(\mu + \frac{\mu_1 \cdot (1 - \text{tg} \gamma)}{\sin \gamma} \right);$$

$$F_2 = 1,155 \cdot \mu_2 \cdot \sigma_{St} \cdot l_2 \cdot \frac{t_r}{\sin \varphi},$$

где σ_{St} – среднее по области пластической деформации напряжение текучести обрабатываемого материала, соответствующее средней температуре в этой области, Па;

$S_{об}$ – подача на оборот заготовки, м/об;

t_r – глубина резания, м;

μ – коэффициент трения по напряжению текучести ($\mu=0,5$ и $\mu=0,3$ при отсутствии и наличии внешней среды (СОТС) в зоне обработки соответственно);

μ_1, μ_2 – коэффициенты трения стружки о переднюю поверхность резца и задней поверхности резца о заготовку;

γ – передний угол резца, град.;

φ – главный угол резца в плане, град.;

l_2 – длина контакта задней поверхности резца с заготовкой, м;

u – коэффициент: $u=1$ при $\gamma \geq 0$; $u=1 - \sin \gamma$ при $\gamma < 0$.

$$\sigma_{St} = \sigma_s \cdot \left(1 - \frac{T_g}{T_{пл}} \right),$$

где σ_s – напряжения текучести при температуре 20 °С, Па;

T_g – температура в области пластической деформации, °С;

$T_{пл}$ – температура плавления материала обрабатываемой заготовки, °С.

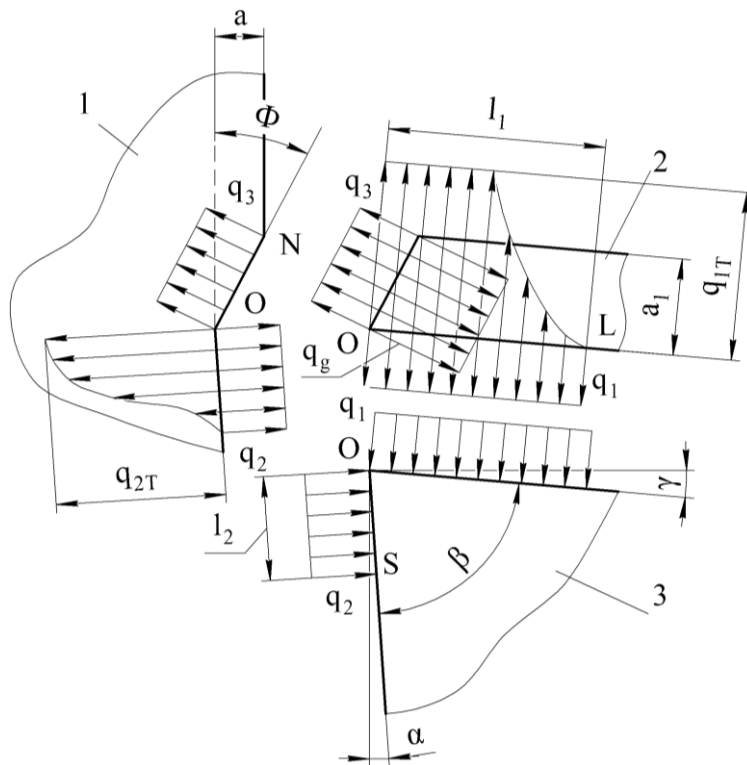


Рис. 1. Структурная схема теплообмена в зоне точения:
1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – резец

При работе резцом без площадки износа

$$l_2 = h_3 / \operatorname{tg} \alpha,$$

где h_3 – высота упругого поднятия материала заготовки в зоне задней поверхности резца, м;
 α – задний угол резца, град.

Параметр h_3 можно определить как [16]

$$h_3 = 1,155 \cdot \frac{\sigma_S}{E} \cdot h \times \left[\sin^2 \gamma + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{k_C} - \mu \cdot \sin^2 \gamma \right],$$

где E – модуль упругости материала обрабатываемой заготовки, Па;

h – размер заготовки (при точении наружной цилиндрической поверхности $h=d/2$, где d – диаметр обрабатываемой поверхности, м).

При работе резцом с площадкой износа

$$l_2 = l_n + \frac{h_3}{\operatorname{tg} \alpha},$$

где l_n – размер площадки износа, связанный с радиальным износом h_n зависимостью [17]

$$l_n = h_n \cdot [(ctg \alpha - \operatorname{tg} \gamma) \cdot (ctg \varphi + ctg \varphi_1) \cdot \sin \varphi],$$

где φ_1 – вспомогательный угол в плане, град.

Для расчета главной составляющей силы резания использовали зависимость [15; 16]

$$P_z = 1,155 \cdot \sigma_{St} \cdot u \cdot S_{об} \cdot t_r \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[1 + \mu_1 \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{(0,5 + \mu) \cdot u}{2 \cdot k_C} \right] \times \\ & \times \cos \gamma + \frac{k_C}{4 \cdot u \cdot \cos \gamma} + \mu \cdot \sin \gamma + \\ & + \frac{\mu_2 \cdot l_2}{u \cdot S_{об} \cdot \sin \varphi} + \frac{k_C \cdot S_{об} \cdot \sin^2 \varphi}{4 \cdot u \cdot t_r \cdot \cos \gamma} \end{aligned} \right\}$$

Закон распределения плотности тепловыделения на плоскости сдвига приняли равномерным [12], поэтому зависимость для расчета плотности тепловыделения имеет вид

$$q_g = \frac{W_g \cdot \sin \varphi}{t_r \cdot S_{об}},$$

где φ – угол сдвига:

$$\sin \varphi = \frac{\cos \gamma}{\sqrt{k_C^2 - 2 \cdot k_C \cdot \sin \gamma + 1}}.$$

При комбинированном законе распределения теплового источника в зоне контакта стружки с передней поверхностью резца плотность распределения можно определить как

$$q_{1T} = \frac{3 \cdot W_{1T} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot t_r \cdot l_1},$$

где l_1 – длина контакта стружки с резцом, которую можно рассчитать по зависимости [12]:

$$l_1 = t_r \cdot k_C^{0,1} \cdot [k_C \cdot (1 - \operatorname{tg} \gamma) + \operatorname{sec} \gamma].$$

При несимметричном нормальном распределении источника тепловыделения в зоне контакта резца с заготовкой максимальная плотность потока [12]

$$q_{2T} = \frac{2 \cdot W_{2T} \cdot \sqrt{k_0} \cdot \sin \varphi}{t_r \cdot \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf} \left[l_2 \cdot \sqrt{k_0} \right]},$$

где $k_0 = \frac{3}{l_2^2}$ – коэффициент; erf – функция [12].

При наложении синусоидальных колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности заготовки, глубина резания изменяется по закону

$$t_r^1 = t_r + A_y \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \tau + \varphi_k),$$

где A_y – амплитуда колебания в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, м;

f – частота ультразвуковых колебаний (УЗК), Гц;

φ_k – начальная фаза колебаний, рад.;

τ – время контакта резца с заготовкой, с.

Наложение колебаний приводит к качественному изменению процесса диспергирования материала заготовки и уменьшению его пределов прочности и текучести [18]. При наложении УЗК напряжение текучести материала заготовки

$$\sigma_{St}^1 = \sigma_{St} \cdot k_T,$$

где k_T – коэффициент, показывающий степень уменьшения напряжения текучести при наложении колебаний [18].

По данным [18] при амплитуде колебаний A_y от 5 мкм коэффициенты трения в зоне контакта инструмента с заготовкой уменьшаются до 1,5 раз.

Дифференциальные уравнения теплопроводности резца, заготовки и стружки решали совместно с общими граничными условиями в зоне контакта, что позволяло учесть распределение тепловых потоков между этими объектами [8; 9]. Теплообмен на границах объектов, контактирующих с технологической жидкостью или воздухом, задан в форме закона Ньютона – Рихмана, описывающего процесс конвективного теплообмена [12].

Необходимость совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, взаимное перемещение контактирующих объектов, необходимость учета зависимости теплофизических свойств контактирующих объектов и предела текучести материала заготовки от температуры, изменение глубины резания при наложении колебаний создают непреодолимые трудности аналитического решения уравнений теплопроводности. Задачу решали, используя численный метод

конечных элементов. При построении дискретных аналогов дифференциальных уравнений теплопроводности использовали универсальный метод баланса [19]. Методика расчета на основе дискретных аналогов уравнений теплопроводности реализована в оригинальных программах.

Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитать температуру в различных точках объектов (узлах сетки) через интервал времени, определенный исходя из устойчивости шага интегрирования по времени [19].

Программа написана на языке программирования Basic. Перед началом расчета вводятся исходные данные: размеры заготовки; размеры и геометрические параметры резца (передний угол γ , задний угол α , главный угол в плане ϕ и др.); элементы режима точения (скорость резания V , подача $S_{об}$, глубина резания t_r); коэффициенты трения μ , μ_1 и μ_2 ; теплофизические параметры материалов резца, заготовки, воздуха и СОТС в зависимости от температуры (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность); напряжения текучести материала заготовки в зависимости от температуры; амплитуда, частота и фаза накладываемых колебаний; параметры расчетной сетки. Программа строит расчетную сетку, рассчитывает устойчивые шаги по времени, силы резания и трения, плотности источников тепловыделения и температуры в различных точках контактирующих объектов. Температура, зафиксированная в данный момент времени, используется для расчета теплофизических характеристик объектов и напряжения текучести материала заготовки в последующий момент времени.

Фиксировали температуры в точках, расположенных на площадках контакта передней поверхности резца со стружкой и его задней поверхности с заготовкой, а так-

же температуру заготовки на различном расстоянии от обрабатываемой поверхности.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР

Численное моделирование температурного поля без наложения колебаний выполнили при следующих исходных данных: материал заготовки – сталь 40Х; материал режущей части резца – твердый сплав марки Т15К6; углы инструмента $\gamma=-4^\circ$, $\phi=45^\circ$; скорость резания $V=50, 100, 150$ и 200 м/мин; подача $S_{об}=0,21$ мм/об; глубина резания $t_r=1$ мм; $\mu_1=\mu_2=0,3$. Механические и теплофизические характеристики материала заготовки и резца (напряжение текучести σ_s , плотности, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) в зависимости от температуры определяли по данным [6; 20].

Результаты расчета температур при точении без наложения колебаний сравнивали с экспериментальными результатами, приведенными в [21]. Расхождение значений не превышает 10 % (таблица 1), что свидетельствует об адекватности разработанной методики.

Численное моделирование температурного поля при наложении колебаний выполнили при следующих исходных данных: диаметр заготовки – 30 мм; материал заготовки – сталь 45; материал режущей части резца – твердый сплав марки Т15К6; углы инструмента $\gamma=10^\circ$, $\phi=45^\circ$; скорость резания $V=2$ и 3 м/с; скорость подачи $S_{об}=0,1$ и $0,3$ м/мин; глубина резания $t_r=0,5$ и 1 мм; $\mu_1=\mu_2=0,3$ [3; 12].

Моделировали наложение УЗК амплитудой $A_y=5$ мкм и частотой $f=22000$ Гц в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности заготовки (таблица 2).

При моделировании процесса точения с наложением колебаний зафиксировано меньшее значение сил

Таблица 1. Сравнение результатов численного моделирования и эксперимента

Скорость резания V , м/мин	Температура резания расчетная T , °С	Температура резания экспериментальная $T_э$, °С	Расхождение расчетной и экспериментальной температур δ , %
50	755	750	0,7
100	961	880	8,4
150	992	980	1,2
200	1086	1060	2,4

Таблица 2. Результаты численного моделирования сил и температур при точении

Скорость резания V , м/мин	Подача $S_{об}$, мм/об	Глубина резания t_r , мм	Температура на передней поверхности T_1 , °С	Температура на задней поверхности T_2 , °С	Тангенциальная составляющая силы резания P_z , Н
120	0,1	0,5	404 / 256	351 / 257	30,9 / 27,4
	0,3		796 / 460	486 / 388	79,7 / 71,6
180	0,1		493 / 432	481 / 425	30,8 / 28,6
	0,3		826 / 644	633 / 447	79,3 / 72,2
120	0,1	1,0	475 / 414	425 / 378	75,2 / 66,8
	0,3		784 / 456	460 / 411	169,0 / 142,1
180	0,1		612 / 525	508 / 473	74,8 / 68,2
	0,3		831 / 640	739 / 444	167,1 / 141,2

Примечание: В числителе приведены значения сил и температур при точении без наложения колебаний, в знаменателе – с наложением колебаний.

и температур. Составляющая P_z силы резания снизилась в среднем на 11 %, максимальная температура в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой – на 20 %, в зоне контакта передней поверхности резца со стружкой – на 26 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Разработаны математические модели и программное обеспечение для расчета контактных температур точения, в том числе и с наложением колебаний. Модели учитывают зависимость теплофизических характеристик материалов контактирующих объектов и механических свойств материала заготовки от температуры, взаимное перемещение объектов, а также изменение глубины резания и механических характеристик материала заготовки при наложении колебаний.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений температур не превышает 10 %, что свидетельствует об адекватности разработанной методики.

Использование УЗК способствует уменьшению сил и температур. Сила P_z снизилась в среднем на 11 %, максимальная температура в зоне контакта задней поверхности резца с заготовкой – на 20 %, максимальная температура в зоне контакта передней поверхности резца со стружкой – на 26 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-47-730005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Петраков Ю.В., Драчев О.И. Моделирование процессов резания. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 240 с.
- Железнов Г.С., Схиртладзе А.Г. Процессы механической и физико-химической обработки материалов. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 456 с.
- Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 287 с.
- Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process // International Journal of Engineering Science and Technology. 2010. Vol. 2. P. 382–393.
- Воронцов А.Л. Исходные положения и критические замечания о современных методах теоретического исследования теплофизических процессов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № S3. С. 2–8.
- Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. А.С. Зубченко. 2-е изд., доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
- Воронцов А.Л. Определение температурных полей и контактных температур при резании. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № S8. С. 9–15.
- Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломасопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.
- Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 10–11.
- Nath C., Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting // International Journal of

- Machine Tools and Manufacture. 2008. Vol. 48. № 9. P. 965–974.
- Унянин А.Н. Аналитическое исследование температурного поля при фрезеровании с наложением ультразвуковых колебаний // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2. С. 229–235.
- Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
- Воронцов А.Л. Основные физико-математические положения новой теории. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. № S7. С. 14–23.
- Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. М.: Машиностроение, 1992. 240 с.
- Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 9. Практические расчеты параметров резания при точении // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 67–76.
- Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 7. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации сил резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 56–61.
- Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание, 2006. 512 с.
- Вологин М.Ф., Калашников В.В., Нерубай М.С., Штриков Б.Л. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
- Колдаев В.Д. Численные методы и программирование. М.: ИНФРА-М, 2009. 544 с.
- Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.
- Воронцов А.Л. Практические расчеты температуры резания. Часть 1 // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № S2. С. 14–23.

REFERENCES

- Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Modelirovanie protsessov rezaniya* [Modeling of Cutting Processes]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2011. 240 p.
- Zheleznov G.S., Skhirtladze A.G. *Protsessy mekhanicheskoy i fiziko-khimicheskoy obrabotki materialov* [The processes of mechanical and physicochemical treatment of materials]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2011. 456 p.
- Reznikov A.N. *Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov* [Thermal physics of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 287 p.
- Abhang L.B., Hameedullah M. Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010, vol. 2, pp. 382–393.
- Vorontsov A.L. Starting positions and critical remarks about modern methods of theoretical research of

- thermophysics processes. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. S3, pp. 2–8.
6. Zubchenko A.S., ed. *Marochnik staley i splavov* [Grading of steels and alloys]. 2nd izd., dop. i ispr. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
 7. Vorontsov A.L. Definition of temperature fields and contact temperatures at cutting Part 1. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. S8, pp. 9–15.
 8. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomasoperenosa* [Mechanical processing of blank parts in the circumstances of critical heat and mass transfer]. Moscow, RAN Publ., 2008. 250 p.
 9. Unyanin A.N., Khusainov A.S. The ultrasonic grinding process temperature field study. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, pp. 10–11.
 10. Nath C., Rahman M. Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, vol. 48, no. 9, pp. 965–974.
 11. Unyanin A.N. Analytical research on the temperature field at milling with ultrasonic oscillations superposition. *Vestnik Rybinskoy gosudarstvennoy aviatsionnoy tekhnologicheskoy akademii im. P.A. Soloveva*, 2017, no. 2, pp. 229–235.
 12. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p.
 13. Vorontsov A.L. The basic physical and mathematical positions of new theory Part 1. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2016, no. S7, pp. 14–23.
 14. Talantov N.V. *Fizicheskie osnovy protsessa rezaniya, iznashivaniya i razrusheniya instrumenta* [The physical basis of the cutting process of wear and destruction of the tool]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 240 p.
 15. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 9. Practical calculations of cutting parameters in turning. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 9, pp. 878–888.
 16. Vorontsov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting 7. Mathematical description of the formation of different chips, pulsation of the cutting force, and contact parameters of the machined billet surface and the rear cutter surface. *Russian Engineering Research*, 2008, vol. 28, no. 7, pp. 674–680.
 17. Yashcheritsyn P.I., Feldshteyn E.E., Kornievich M.A. *Teoriya rezaniya* [Cutting theory]. Minsk, Novoe znanie Publ., 2006. 512 p.
 18. Vologin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubay M.S., Shtrikov B.L. *Primenenie ultrazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke* [Application of ultrasonic vibrations and explosion when processing and assembling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p.
 19. Koldaev V.D. *Chislennyye metody i programmirovaniye* [Numerical methods and programming]. Moscow, INFRA-M Publ., 2009. 544 p.
 20. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezaniye materialov: Termomekhanicheskiy podkhod k sisteme vzaimosvyazey pri rezanii* [Metal cutting. Thermomechanical approach to the system of interconnections during cutting]. Moscow, MG TU im. N.E. Baumana Publ., 2001. 448 p.
 21. Vorontsov A.L. Practical calculations of temperature of cutting Part 1. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem*, 2017, no. S2, pp. 14–23.

**THE RESEARCH OF A TEMPERATURE FIELD WHEN TURNING
WITH VIBRATIONS SUPERPOSITION**

© 2018

A.N. Unyanin, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor

P.R. Finageev, postgraduate student

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

Keywords: turning; turning with vibrations superposition; turning with superposition of ultrasonic vibrations; heat flow; temperature field.

Abstract: The temperature of a cutting process influences significantly the quality of the treated surface and the performance of a tool. The rational use of vibrations, including the ultrasonic frequency vibrations is one of the means to improve the efficiency of a cutting process. However, there are no analytical studies of the temperature of turning with vibration superposition. It was accepted that the total heat output power when turning was equal to the sum of heat output powers of sources aroused as the result of the transition to the heat of work of deformation and work of friction forces on the leading and flank surfaces of a tool. The paper presents the mathematical dependences for calculation of the components of the total power of heat release. The authors took into account that the yield stress, which determines the cutting and frictional forces on the contact surfaces of a cutter, workpiece, and chip, depends on the temperature in the plastic deformation area. The law of distribution of thermal power density on the shear plane was taken as uniform; the combined law was adopted on the surface of the contact of a chip with the front surface of a cutter; the asymmetric normal law was adopted on the surface of the contact of a cutter with a workpiece. The authors gave the dependence for the calculation of the cutting depth when applying vibrations in the direction perpendicular to the treated surface. Heat exchange at the boundaries of the objects contacting with the process liquid or air is given in the form of the Newton-Richman law. The thermal conductivity equations of the contacting objects were solved in combination with the general boundary conditions in the contact zone using the finite element method. The method of calculation based on the discrete analogs of the heat conduction equations is implemented in the original programs. The authors compared the results of calculation of temperatures when turning without the vibrations superposition with the experimentally obtained results, in this case, the discrepancy between the calculated and experimental values does not exceed 10 %. The simulation of the turning process with the superposition of ultrasonic vibrations showed that the main component of the cutting force P_z reduced by a mean of 11 %, the maximum temperature in the zone of contact of the back surface of a cutter with a workpiece reduced by 20 %, and the maximum temperature in the zone of contact of the front surface of a cutter with a chip reduced by 26 %.

НАШИ АВТОРЫ

Балахнина Анна Александровна, старший преподаватель кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-20

E-mail: a.balakhnina@tltsu.ru

Боргардт Евгений Дмитриевич, младший научный сотрудник НИО-4 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

E-mail: euletech13@gmail.com

Веткасов Николай Иванович, 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: nppwt@ulstu.ru

Ворочаева Людмила Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры механики, мехатроники и робототехники.

Адрес: Юго-Западный государственный университет, 305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Тел.: (4712) 22-26-26

E-mail: mila180888@yandex.ru

Выбойщик Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 8 917 120-34-73

E-mail: vma@63.ru

Зябочкина Александра Павловна, аспирант.

Адрес: Самарский государственный технический университет, 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mail: alya.zyabokhkina@list.ru

Ивашин Павел Валентинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИО-4 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

E-mail: ivashinpv@gmail.com

Капустин Анатолий Иванович, заведующий лабораторией.

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: (8422) 77-81-03

E-mail: antak1949@mail.ru

Князькин Сергей Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела промышленных испытаний.

Адрес: ООО «ИТ-Сервис», 443001, Россия, г. Самара, ул. Ульяновская/Ярмарочная, 52/55.

Тел.: 8 987 437-34-41

E-mail: knyazkin@its.samara.com

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

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

E-mail: krishtal@tltsu.ru

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор.

Адрес: Самарский государственный технический университет, 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

Тел.: 8 917 101-91-78

E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Полунин Антон Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИО-4 Научно-исследовательского института прогрессивных технологий.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

E-mail: Anpol86@gmail.com

Савин Сергей Игоревич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры механики, мехатроники и робототехники.

Адрес: Юго-Западный государственный университет, 305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Тел.: (4712) 22-26-26

E-mail: savinswsu@mail.ru

Сапунов Валерий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: (8422) 41-80-16

E-mail: sapunov_vv@mail.ru

Святкин Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-46-32

E-mail: Aleksey.Svyatkin@vaz.ru

Селиванов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института машиностроения.

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-20

E-mail: selivas@inbox.ru

Сорока Ирина Валерьевна, старший преподаватель кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика».

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: (8482) 53-91-20

E-mail: soroka@tltsu.ru

Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент.

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: +7 903 320-53-51

E-mail: a_un@mail.ru

Финагеев Павел Рамдисович, аспирант.

Адрес: Ульяновский государственный технический университет, 432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.

Тел.: +7 904 184-74-63

E-mail: pavel_finageev@mail.ru

OUR AUTHORS

Balakhnina Anna Aleksandrovna, senior lecturer of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-91-20
E-mail: a.balakhnina@tltu.ru

Borgardt Evgeny Dmitrievich, junior researcher of the Research Division No. 4 of the Research Institute of Advanced Technologies.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: euletech13@gmail.com

Finageev Pavel Ramdisovich, postgraduate student.
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venetz Street, 32.
Tel.: +7 904 184-74-63
E-mail: pavel_finageev@mail.ru

Ivashin Pavel Valentinovich, PhD (Engineering), leading researcher of the Research Division No. 4 of the Research Institute of Advanced Technologies.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: ivashinpv@gmail.com

Kapustin Anatoly Ivanovich, Head of Laboratory.
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
Tel.: (8422) 77-81-03
E-mail: antak1949@mail.ru

Knyazkin Sergey Aleksandrovich, PhD (Engineering), Head of Department of Field Tests.
Address: LLC “IT-Service”, 443001, Russia, Samara, Ulyanovskaya/Yarmarochnaya Street, 52/55.
Tel.: 8 987 437-34-41
E-mail: knyazkin@its.samara.com

Krishtal Mikhail Mikhailovich, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Rector.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: krishtal@tltu.ru

Nosov Nikolay Vasilievich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor.
Address: Samara State Technical University, 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 244.
Tel.: 8 917 101-91-78
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Polunin Anton Viktorovich, PhD (Engineering), senior researcher of the Research Division No. 4 of the Research Institute of Advanced Technologies.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
E-mail: Anpol86@gmail.com

Sapunov Valery Viktorovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Mechanical Engineering”.
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
Tel.: (8422) 41-80-16
E-mail: sapunov_vv@mail.ru

Savin Sergey Igorevich, PhD (Engineering), senior researcher of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics.
Address: Southwest State University, 305040, Russia, Kursk, 50 let Oktyabrya Street, 94.
Tel.: (4712) 22-26-26
E-mail savinswsu@mail.ru

Selivanov Aleksandr Sergeevich, PhD (Engineering), Associate Professor, Director of the Institute of Mechanical Engineering.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-91-20
E-mail: selivas@inbox.ru

Soroka Irina Valerievna, senior lecturer of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-91-20
E-mail: soroka@tltsu.ru

Svyatkin Aleksey Vladimirovich, PhD (Engineering), Associate Professor.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-46-32
E-mail: Aleksey.Svyatkin@vaz.ru

Unyanin Aleksandr Nikolaevich, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor.
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venetz Street, 32.
Tel.: +7 903 320-53-51
E-mail: a_un@mail.ru

Vetkasov Nikolai Ivanovich, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Mechanical Engineering”.
Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
Tel.: (8422) 41-82-47
E-mail: nppwt@ulstu.ru

Vorochaeva Lyudmila Yurievna, PhD (Engineering), assistant professor of Chair of Mechanics, Mechatronics and Robotics.
Address: Southwest State University, 305040, Russia, Kursk, 50 let Oktyabrya Street, 94.
Tel.: (4712) 22-26-26
E-mail: mila180888@yandex.ru

Vyboishchik Mikhail Aleksandrovich, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), professor of Chair “Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 8 917 120-34-73
E-mail: vma@63.ru

Zyabochkina Aleksandra Pavlovna, postgraduate student.
Address: Samara State Technical University, 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 244.
E-mail: alya.zyabochkina@list.ru