

ВЕКТОР НАУКИ Тольяттинского государственного университета

Основан в 2008 г.

№ 2 (48)

2019

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 направлению «Металлургия и материаловедение»

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

Заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение»

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

Заместитель главного редактора по направлению «Сварка, родственные процессы и технологии»

Ковтунов Александр Иванович, д. т. н., доцент

Редакционная коллегия:

Бочкарев Петр Юрьевич, д. т. н., профессор

Бржозовский Борис Максевич, д. т. н., профессор

Виноградов Алексей Юрьевич, к. ф.-м. н., Doctor of Sciences (Engineering), профессор

Гаврюшин Сергей Сергеевич, д. т. н., профессор

Герштейн Грегори, Doctor of Sciences (Engineering)

Глезер Александр Маркович, д. ф.-м. н., профессор

Гречников Федор Васильевич, академик РАН, д. т. н., профессор

Денисенко Александр Федорович, д. т. н., профессор

Казаков Александр Анатольевич, д. т. н., профессор

Карпов Михаил Иванович, член-корреспондент РАН, д. т. н., профессор

Кацман Александр Владимирович, к. ф.-м. н., PhD

Кудря Александр Викторович, д. т. н., профессор

Кузьмин Сергей Викторович, д. т. н., профессор

Ларишин Василий Петрович, д. т. н., профессор

Макаров Алексей Викторович, д. т. н.

Максимова Светлана Васильевна, д. т. н.

Мулюков Радик Рафикович, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор

Наймарк Олег Борисович, д. ф.-м. н., профессор

Носов Николай Васильевич, д. т. н., профессор

Пиллинский Александр Вениаминович, к. т. н., доцент

Романов Алексей Евгеньевич, д. ф.-м. н., доцент

Рубаник Василий Васильевич, д. т. н.

Старобинский Рудольф Натанович, д. т. н., профессор

Сундер Рамасуббу, член Индийской академии наук, PhD, Dr.

Табачков Владимир Петрович, д. т. н., профессор

Худобин Леонид Викторович, д. т. н., профессор

Шшиков Владимир Александрович, д. т. н.

Эстрин Юрий Захарович, д. ф.-м. н., профессор

Входит в перечень рецензируемых научных журналов, зарегистрированных в системе «Российский индекс научного цитирования», в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

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, Россия, Самарская область, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Тел.: (8482) 54-63-64

E-mail: vektornaukitgu@yandex.ru

Сайт: <http://www.tltsu.ru>

Подписано в печать 28.06.2019.

Выход в свет 30.08.2019.

Формат 60×84 1/8.

Печать цифровая.

Усл. п. л. 8,8.

Тираж 50 экз. Заказ 3-421-19.

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 (Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по направлению «Металлургия и материаловедение»

Мерсон Дмитрий Львович, доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института перспективных технологий (Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по направлению «Машиностроение и машиноведение»

Шайкин Александр Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические машины и системы управления» (Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия).

Заместитель главного редактора по направлению «Сварка, родственные процессы и технологии»

Ковтунов Александр Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы» (Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия).

Редакционная коллегия:

Бочкарев Петр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин» (Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия).

Бржозовский Борис Максович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» (Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия).

Виноградов Алексей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Doctor of Engineering, профессор (Норвежский технологический университет, Тронхейм, Норвегия).

Гаврюшин Сергей Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия).

Герштейн Грегори, Doctor of Engineering, заведующий лабораторией (Ганноверский университет имени Готфрида Вильгельма Лейбница, Ганновер, Германия).

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

Гречников Федор Васильевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением (Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия).

Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные станочные и инструментальные системы» (Самарский государственный технический университет, Самара, Россия).

Казаков Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлургические и литейные технологии», руководитель научно-испытательной лаборатории «Металлургическая экспертиза» (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия).

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

Кацман Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, PhD, старший научный сотрудник (Технион – Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль).

Кудря Александр Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металловедения и физики прочности (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия).

Кузьмин Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, первый проректор (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия).

Ларшин Василий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения (Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина).

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

Максимова Светлана Васильевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом «Физико-химические процессы пайки» (Институт электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины, Киев, Украина).

Мулюков Радик Рафикович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор (Институт проблем сверхпластичности металлов Российской академии наук, Уфа, Россия).

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

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» (Самарский государственный технический университет, Самара, Россия).

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

Романов Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, доцент, декан и профессор факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия), главный научный сотрудник сектора теории твердого тела (Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия).

Рубаник Василий Васильевич, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, заведующий лабораторией физики металлов (Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь).

Старобинский Рудольф Натанович, доктор технических наук, профессор, научный консультант (консалтинг-бюро “Prof. Starobinski. Silencers. Consulting and Engineering”, Гамбург, Германия).

Сундер Рамасуббу, член Индийской академии наук, PhD, Dr., директор (“BISS (P) Ltd”, Бангалор, Индия).

Табаков Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» (Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия).

Худобин Леонид Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» (Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия).

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

Эстрин Юрий Захарович, доктор физико-математических наук, профессор (Университет им. Монаша, Мельбурн, Австралия).

СОДЕРЖАНИЕ

УГЛЕКИСЛОТНАЯ КОРРОЗИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБ В СРЕДАХ, НАСЫЩЕННЫХ H₂S И Cl М.А. Выбойщик, А.О. Зырянов, И.В. Грузков, А.В. Федотова.....	6
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ М.Ю. Захарченко, А.О. Кузнецов, А.С. Яковишин, В.П. Батищев, Б.Н. Костянчук, О.В. Захаров.....	18
КОМПЛЕКСНЫЙ ПАРАМЕТР ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПОРНЫХ ПЛАСТИН РЕЖУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РЕЗЦОВ А.Н. Кравцов.....	27
ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ПРОКОВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ Е.А. Кузьмина, Е.Ю. Приймак.....	34
ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТЗ-1 И ВТ22 Р.В. Ладыгин, Л.П. Ситкина, И.Н. Разумова.....	43
К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ГИДРОПРИВОДАМИ А.В. Месропян, Р.Р. Шарипов.....	49
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРАВКИ НА ЭНЕРГО-СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВРЕЗНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С.В. Мурашкин, А.С. Селиванов, В.И. Малышев.....	57
ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИУРЕТАНА ПРИ ПРОТЕКАНИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В.С. Ягубов, А.В. Щегольков.....	63
НАШИ АВТОРЫ.....	73

CONTENT

CARBON DIOXIDE CORROSION OF OILFIELD CASING AND TUBULAR GOODS IN MEDIA SATURATED WITH H₂S AND Cl M.A. Vyboyshchik, A.O. Zyryanov, I.V. Gruzkov, A.V. Fedotova.....	6
TEST STAND FOR LOW-FREQUENCY CALIBRATION OF ACCELEROMETERS M.Yu. Zakharchenko, A.O. Kuznetsov, A.S. Yakovishin, V.P. Batischev, B.N. Kostyanchuk, O.V. Zakharov.....	18
COMPLEX PARAMETER OF DURABILITY OF SUPPORT PLATES OF CUTTING ELEMENTS OF BLOCK-MODULAR CUTTERS A.N. Kravtsov.....	27
INFLUENCE OF FORGING FORCE ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM-CARBON STEELS WELDED JOINTS IN ROTARY FRICTION WELDING E.A. Kuzmina, E.Yu. Priymak.....	34
THE ROUGHNESS OF TREATED SURFACE UNDER THE ULTRASONIC SUPERFINISHING OF DETAILS FROM VT3-1 AND VT 22 TITANIUM ALLOYS R.V. Ladyagin, L.P. Sitkina, I.N. Razumova.....	43
ON THE EFFICIENCY OF FUZZY LOGIC APPLICATIONS IN HYDRAULIC ACTUATOR CONTROL SYSTEMS A.V. Mesropyan, R.R. Sharipov.....	49
THE STUDY OF INFLUENCE OF ULTRASONIC DRESSING ON THE ENERGY-FORCE INDICATORS OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING S.V. Murashkin, A.S. Selivanov, V.I. Malyshev.....	57
HEAT GENERATION OF NANOMODIFIED ELECTRICALLY-CONDUCTIVE POLYURETHANE DURING THE FLOW OF DIRECT CURRENT V.S. Yagubov, A.V. Shchegolkov.....	63
OUR AUTHORS.....	73

УГЛЕКИСЛОТНАЯ КОРРОЗИЯ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ТРУБ В СРЕДАХ, НАСЫЩЕННЫХ H₂S И Cl

© 2019

М.А. Выборщик, доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

А.О. Зырянов, кандидат технических наук, ведущий инженер

И.В. Грузков, ведущий инженер

А.В. Федотова, ведущий инженер

ООО «ИТ-Сервис», Самара (Россия)

Ключевые слова: нефтепромысловые среды; промышленные испытания; насосно-компрессорные трубы; нефтегазопроводные трубы; коррозионная стойкость; вид и кинетика коррозионного разрушения; углекислотная коррозия; продукты коррозии.

Аннотация: Углекислотная коррозия является одной из наиболее распространенных причин разрушения нефтедобывающего оборудования. Этот вопрос особенно актуален для Российской Федерации, где содержание углекислого газа в нефтепромысловых средах большинства месторождений высокое.

Работа посвящена получению информации по базовым вопросам разработки трубных сталей, стойких к углекислотной коррозии: вид и уровень легированности сталей, снижающих стойкость углекислотной коррозии ниже 0,2 мм/год; влияние высокого содержания в углекислотной среде коррозионно-активных компонентов H₂S и Cl на механизм и кинетику коррозионного разрушения. Для получения этой информации проведены опытные промышленные испытания, максимально приближенные к условиям эксплуатации. Насосно-компрессорные трубы испытывали на семи действующих скважинах, проводя периодический мониторинг состояния труб. Промышленные испытания нефтегазопроводных труб проводили на испытательном полигоне Приобского месторождения, состоящего из действующего нефтепровода, параллельно которому смонтировали байпасную линию, составленную из труб исследуемых сталей.

Для испытаний использовали месторождения и скважины, в которых нефтепромысловые среды имеют высокое содержание CO₂ и проявляется интенсивная углекислотная коррозия. В большинстве случаев это месторождения, в которых углекислая среда дополнительно насыщена коррозионно-агрессивными компонентами H₂S и Cl.

Исследуемые стали разделили на две группы: стали с высоким содержанием хрома (≈4,6 %), образующие при эксплуатации пассивирующую пленку, и низколегированные трубные стали (Cr≤0,6 %). Показано, что:

– высокохромистая сталь 15X5МФБЧ является стойкой к углекислотной коррозии даже в углекислых средах с высоким содержанием H₂S и Cl;

– в низколегированных трубных сталях высокое содержание хлора в нефтепромысловых средах интенсифицирует коррозионное разрушение и способствует переходу к более агрессивным формам локальной коррозии;

– по мере увеличения стойкости к углекислотной коррозии исследуемые стали располагаются в следующей последовательности: 09Г2С → 13ХФА → 08ХМФА → 15Х5МФБЧ.

ВВЕДЕНИЕ

Многие месторождения нефти, особенно в Российской Федерации (Поволжье, Западная Сибирь, Восточная Сибирь и др.), имеют высокое содержание углекислого газа [1; 2]. Соответственно, работы по повышению стойкости сталей в CO₂-содержащих средах довольно многочисленны [3–5]. Характерно, что большинство авторов сходятся во мнении, что наиболее перспективным способом снижения интенсивности всех форм проявления углекислотной коррозии является обеспечение образования продуктов коррозии, которые обладают высокими когезионными и адгезионными свойствами, затрудняют или прерывают доступ агрессивной среды к металлу [6–8]. Фактически это разработка сталей, способных самопассивироваться при эксплуатации в определенном месторождении.

Процесс формирования защитных свойств продуктов коррозии определяется тремя основными факторами: составом и агрессивностью нефтепромысловых сред; условиями эксплуатации; составом, структурой

и свойствами используемых сталей. В настоящее время отсутствует надежная информация по влиянию каждого из перечисленных факторов на особенности и интенсивность развития коррозионных процессов в промышленных условиях. В первую очередь требуется внести ясность по следующим вопросам:

– вид и необходимый уровень легированности трубных сталей, обеспечивающий снижение скорости углекислотной коррозии ниже 0,20 мм/год;

– влияние высокого содержания коррозионно-активных компонентов H₂S и Cl в углекислотных средах на механизм и кинетику коррозионного разрушения;

– методика апробации труб по результатам промышленных испытаний в месторождениях контролируемого состава и повышенной агрессивности добываемых сред.

Цель работы – получение информации о механизмах влияния легирования хромом и присутствия в составе углекислых нефтепромысловых сред коррозионно-агрессивных компонентов (H₂S и Cl) на кинетику углекислотного разрушения стальных труб.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследований

В соответствии с целью исследований были выбраны трубные стали с высокой (15Х5МФБЧ), повышенной (13ХФА и 08ХМФА) и обычной (09Г2С) стойкостью к углекислотной коррозии (таблица 1), на которых изучали механизм и кинетику развития коррозионно-механического разрушения в углекислых нефтепромысловых средах с высоким содержанием H_2S и Cl . Сталь 15Х5МФБЧ используется для изготовления насосно-компрессорных труб. Высокое содержание хрома (4,6 %) и рациональное легирование (таблица 1) обусловили стойкость этой стали к углекислотной коррозии [9; 10]. Насосно-компрессорные трубы объединяются в лифтовые колонны резьбовыми соединениями, что, по сравнению с нефтегазопроводными трубами, снимает требования по обеспечению высокой свариваемости и позволяет значительно повысить уровень необходимого легирования.

Стали 09Г2С, 13ХФА и 08ХМФА используются для изготовления нефтегазопроводных труб и содержат хрома менее 0,62 %. Традиционная и широко распространенная сталь 09Г2С не обладает стойкостью к углекислотной коррозии, в работе используется для сравнения. Из нее изготовлен базовый трубопровод байпасных испытаний и многие нефтепромысловые трубопроводы. Относительно новые стали 13ХФА и 08ХМФА обладают повышенной стойкостью к водородному охрупчиванию, сульфидному коррозионному растрескиванию под напряжением и углекислотной коррозии [11; 12].

Все трубы из исследуемых сталей подвергли улучшению (закалка + высокий отпуск). Режимы представлены в таблице 1. Для стали 15Х5МФБЧ это нормализация + высокий отпуск [10]. Повышения ударной вязкости и стабильности свойств сталей 13ХФА и 08ХМФА обеспечили двухкратной закалкой (из аустенитной области и затем из межкритического интервала температуры) [13; 14].

Исследуемые стали после используемой термообработки (разные варианты улучшения) имеют один тип структуры, представленной частично рекристаллизованными зернами феррита и зернами ферритно-карбидной смеси (рис. 1). Количественное отношение этих зерен, степень рекристаллизации, вид и количество карбидной фазы для каждой из сталей индивидуальны.

Необходимо отметить, что в работе для испытаний специально выбраны стали и их структурное состояние, которые по существующим представлениям обеспечивают наиболее высокую коррозионную стойкость и работоспособность нефтепромысловых труб.

Методы испытаний и исследований

Для получения более объективной информации о развитии коррозионной повреждаемости и работоспособности труб использовали опытно-промысловые испытания, максимально приближенные к условиям эксплуатации. Насосно-компрессорные трубы (сталь 15Х5МФБЧ) испытывали на действующих скважинах, проводя периодический мониторинг состояния труб. Скважина с лифтовой подвеской из испытуемых труб работает до ближайшей остановки на ремонт (обычно 6 месяцев). В процессе ремонтных работ из эксплуатируемой под-

вески отбирают три трубы (верхняя, средняя и нижняя часть подвески). Отбор труб проводился из ранее работающей подвески, а также при каждом ремонтном цикле эксплуатации опытной подвески, что позволило контролировать состояние труб по мере увеличения срока эксплуатации. Отобранные трубы подвергали дальнейшим лабораторным испытаниям.

Для промышленных испытаний нефтегазопроводных труб на Приобском месторождении был создан испытательный полигон, состоящий из действующего нефтепровода, параллельно которому смонтирована байпасная линия, составленная из последовательно расположенных катушек труб $\varnothing 159 \times 8$ мм исследуемых сталей 13ХФА и 08ХМФА, смонтированных в одну линию с помощью фланцев. Действующий базовый нефтепровод, выполненный на трубах из стали 09Г2С, подвержен интенсивному коррозионному разрушению со скоростью более 1,5 мм/год. Байпасные промышленные испытания проводили в течение 2 лет, после чего патрубки демонтировали, разрезали, очищали от нефтепродуктов и направляли для дальнейших исследований. Используемые методики опытных промышленных испытаний подробно описаны в работах [15; 16].

Для проведения испытаний выбирали месторождения и скважины, в которых добываемые среды имеют высокое содержание CO_2 и проявляется интенсивная углекислотная коррозия. Предпочтительными были месторождения с углекислой средой, в которых дополнительно содержится большое количество агрессивных компонентов H_2S и Cl (таблица 2, таблица 3). Это позволило оценить влияние этих составляющих нефтепромысловых сред на интенсивность и особенности проявления углекислотной коррозии.

Для анализа вида, интенсивности коррозионного повреждения и формирования продуктов коррозии использовали следующие методы исследования:

- осмотр и анализ состояния наружной и внутренней поверхностей труб;
- описание вида коррозионных повреждений трубы и скорости общей и локальной коррозий;
- фазовый рентгеноструктурный анализ продуктов коррозии на внутренней поверхности труб с применением рентгеновского дифрактометра «Дрон-3»;
- анализ морфологии и химического состава продуктов коррозии на металлографических микрошлифах с использованием растрового электронного микроскопа фирмы «Philips» с энергодисперсионным анализатором фирмы «EDAX»;
- анализ коррозионного повреждения приповерхностного слоя методом послойной перешлифовки параллельно внутренней поверхности образцов труб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Насосно-компрессорные трубы из стали 15Х5МФБЧ

Проведенные исследования [10; 17] показали, что при содержании хрома ~5 % наблюдается резкое повышение стойкости низкоуглеродистых сталей к углекислотной коррозии. Это отражают испытания труб из стали 15Х5МФБЧ: снижение скорости коррозии до значения 0,15 мм/год и многократное увеличение срока наработки опытных труб по сравнению с трубами из традиционной стали 35Г2С (таблица 2). Можно

Таблица 1. Химический состав и термическая обработка исследуемых сталей

Марка стали	Массовая концентрация, %											Режимы термической обработки
	C	Si	Mn	Al	Cr	Mo	V	Ni	Cu	P	S	
15Х5МФБЧ	0,14	0,35	0,60	0,05	4,6	0,42	0,08	0,10	0,145	0,007	0,007	Нормализация 900 °С + отпуск 730 °С
09Г2С	0,08	0,59	1,48	0,026	0,09	0,026	0,001	0,11	0,016	0,013	0,004	Закалка 900 °С + отпуск 600 °С
13ХФА	0,14	0,36	0,55	0,043	0,57	0,012	0,052	0,09	0,13	0,013	0,002	Закалка 920 °С + закалка 770 °С + отпуск 600 °С
08ХМФА	0,11	0,31	0,53	0,031	0,62	0,128	0,044	0,14	0,23	0,008	0,006	Закалка 920 °С + закалка 770 °С + отпуск 600 °С

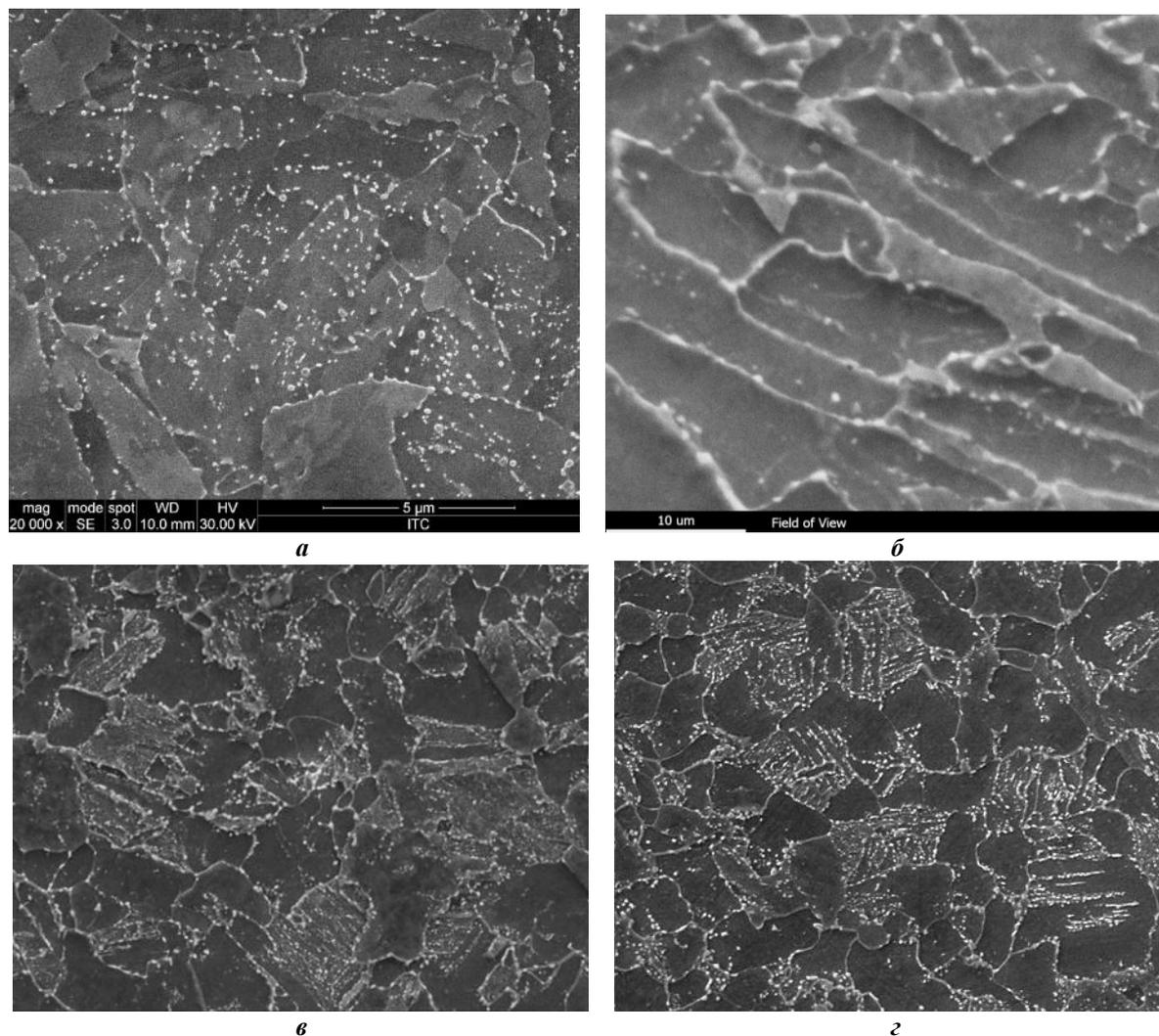


Рис. 1. Микроструктура труб из сталей:
а – 15Х5МФБЧ; *б* – 09Г2С; *в* – 13ХФА; *г* – 08ХМФА (*в*, *г* – $\times 5000$)

Таблица 2. Состав среды и результаты промысловых испытаний насосно-компрессорных труб из стали 15Х5МФБЧ

Месторождение/ № скв.	Обводненность, %	в воде		Cl, г/л	Минерализация, г/л	Наработка труб обычного исполнения, сут*	Наработка опытных труб, сут	Изменение наработки относительно обычных труб	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	Углекислотная коррозия + сульфиды + хлор
Усинское/3035	49	239	220	40,7	66,2	165	952	5,7	Углекислотная коррозия + сульфиды + хлор
Возейское/1177	95	202,4	4,8	34,6	59,5	395	827	2,1	Углекислотная коррозия + хлор
ОАО «Томскнефть» ВНК									
Западно-Полуденное/427	>80	160	0,0	12,9	22,0	122	1107	9,1	Углекислотная коррозия
Северное/254		980	0,3	9,9	16,5	98	1411	14,4	Углекислотная 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	

* Средняя наработка по трем последним подвескам.

Таблица 3. Состав среды и результаты промысловых испытаний нефтегазопроводных труб

Месторождение	Состав среды					Марка стали	Параметры коррозии		
	Обводненность, %	Минеральность, г/л	CO ₂ , мг/л	H ₂ S, мг/л	Cl, г/л		Скорость общей коррозии, мм/год	Скорость локальной коррозии, мм/год	Вид коррозионного повреждения
Приобское ООО «Газпромнефть-Хантос»	93	264,4	378	20	27,0	09Г2С	-	1,5	Канавочная коррозия с язвами «червоточного» типа
						13ХФА	0,26	0,65	Язвенная коррозия «червоточного» типа
						08ХМФА	0,20	0,33	Язвенная коррозия

предположить, что такое скачкообразное увеличение коррозионной стойкости связано с изменением в процессе эксплуатации характера взаимодействия коррозионной среды с поверхностью металла.

После длительной эксплуатации внутренняя поверхность труб не содержит язвенных повреждений и покрыта ровным слоем продуктов коррозии. Четыре скважины месторождений ОАО «Томскнефть» и скважина № 1177 Возейского месторождения имеют высокое содержание CO₂ и незначительное количество H₂S.

В продуктах коррозии присутствуют карбонаты железа (FeCO₃), оксиды железа (Fe₂O₃ и Fe₃O₄), рентгеноморфная фаза (Cr(OH)₃) и не взаимодействующая с агрессивной средой карбидная фаза стали 15Х5МФБЧ. Количество хрома в продуктах коррозии может превышать 30 %. Толщина слоя продуктов коррозии составляет ≈150 мм, скорость общей коррозии ≈0,13 мм/год. На некоторых участках продукты коррозии отслаиваются, и под ними отчетливо видна блестящая поверхность металла (рис. 2).

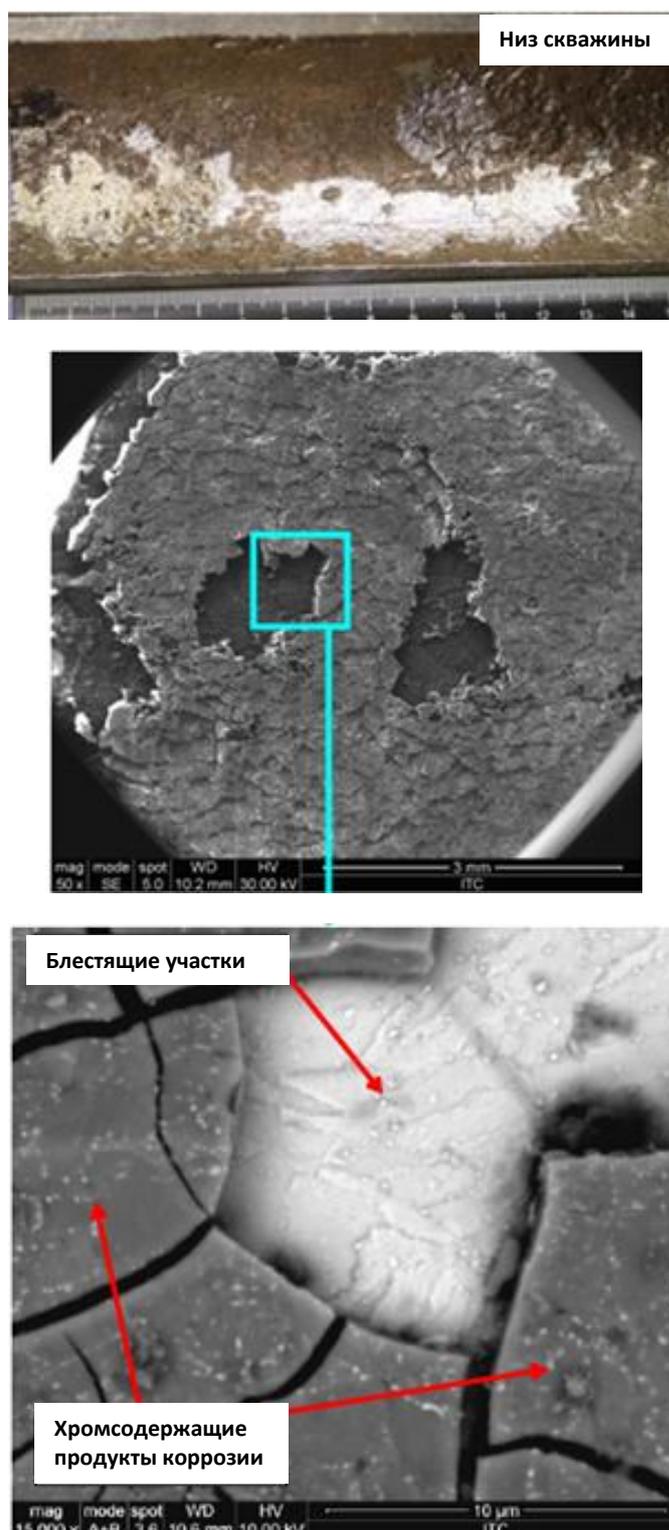


Рис. 2. Типичный вид внутренней поверхности насосно-компрессорных труб из стали 15Х5МФБЧ после эксплуатации (≥ 500 суток) в углекислотных нефтепромысловых средах (таблица 2). Разное увеличение

Впервые образование блестящего слоя между продуктами углекислотной коррозии и корродирующего металла было обнаружено в работе [18], и дальнейшему исследованию этого явления во многом посвящены работы [16; 17]. Показано, что металл покрыт тонкой пленкой (менее 1 мкм), состоящей из оксидов хрома и железа, которая пассивирует корродирующий металл, прекращая контакт агрессивной среды с металлом. Эта

пассивирующая пленка образуется при длительной эксплуатации хромосодержащих сталей ($Cr > 5\%$) в углекислотных нефтепромысловых средах. Среда, насыщенная CO_2 , на начальном этапе эксплуатации вызывают интенсивную углекислотную коррозию и образование продуктов коррозии с высоким содержанием хрома. Для сталей с содержанием хрома от 0,5 до 5 % его концентрация в продуктах коррозии в 5–10 раз

превышает его концентрацию в корродирующей стали [19]. Для стали 15Х5МФБЧ (4,6 % Cr) содержание хрома в продуктах коррозии достигает 30 %. По нашему мнению, основными факторами, обуславливающими образование пассивирующей пленки из оксидов хрома при эксплуатации в углекислых нефтепромысловых средах, являются: высокое содержание хрома в продуктах; наличие кислорода в транспортируемых средах; длительность эксплуатации; повышенная температура и др.

До настоящего времени образование такой пассивирующей пленки в лабораторных испытаниях не наблюдали. Нами предпринята попытка моделировать условия эксплуатации и получить пленку. Для этого были проведены специальные испытания в значительно более жестких условиях по сравнению с используемой методикой [20; 21] лабораторных углекислотных испытаний: длительность выдержки образцов увеличена с обычных 120 до 1500 часов, концентрация CO_2 в испытательной среде составила 600 мг/л, температура +60 °С, парциальное давление CO_2 2,5 атм. Для поддержания интенсивности коррозионных процессов проводили периодическую смену испытательной среды. После таких испытаний на поверхности стали 15Х5МФБЧ под слоем легко удаляемых продуктов коррозии появились области с блестящей поверхностью (рис. 3), идентичные наблюдаемым после промышленных испытаний.

Таким образом, образование защитной оксидной пленки (самопассивация) сталей, содержащих $\geq 5\%$ Cr, в углекислотной среде не является случайным механизмом развития процесса. Это явление имеет фундаментальный характер и может быть применено как перспективное направление в разработке сталей стойких к углекислотной коррозии.

Опытные промышленные испытания насосно-компрессорных труб проводили в нефтепромысловых средах, в которых в зависимости от месторождения содержание Cl находилось в интервале от 10 до 40,7 г/л (таблица 2). Металлографические исследования строения продуктов коррозии, а также характеристики работоспособности не показали существенных отличий. По-видимому, для стали 15Х5МФБЧ в условиях дополни-

тельной защиты пассивирующей пленкой содержание Cl в диапазоне 10–40,7 г/л не вносит существенных изменений в интенсивность происходящих коррозионных процессов.

Для Усинского месторождения добываемая среда по сравнению с другими месторождениями характеризуется крайне высоким содержанием H_2S : скважина № 4266 – 92,9 мг/л, скважина № 3035 – 220 мг/л (таблица 2). Это отражается в составе и строении продуктов коррозии (рис. 4).

Кроме известных фаз в составе продуктов коррозии появилось большое количество сульфидов железа, отвечающих соотношению Fe_9S_8 и расположенных в виде слоистой сетки (рис. 4, светлые прожилки). Образовавшиеся продукты коррозии более пористые, содержат большое количество полостей, расслоений и других нарушений сплошности, что, по-видимому, и обусловило некоторое снижение работоспособности труб из стали 15Х5МФБЧ при эксплуатации в углекислых средах, насыщенных H_2S .

Нефтегазопроводные трубы

Байпасные испытания проводили на Приобском месторождении. Состав нефтепромысловых сред, интенсивность и вид коррозионных повреждений исследуемых сталей приведены в таблице 3. Высокое содержание CO_2 и Cl обусловили коррозионную агрессивность среды и жесткие условия эксплуатации трубных сталей 09Г2С, 13ХФА, 08ХМФА. Хлор по существующим представлениям интенсифицирует процессы углекислотной коррозии и способствует ее переходу к более агрессивным локальным формам.

После двух лет байпасных испытаний внутренняя поверхность труб имеет значительные коррозионные повреждения (рис. 5).

Для труб из стали 09Г2С это «бороздки» и «канавки», более глубокие в области нижней образующей трубы (рис. 5 а). На внутренней поверхности труб из сталей 13ХФА и 08ХМФА имеются многочисленные язвы диаметром 5–7 мм. На трубах из стали 13ХФА язвы более многочисленные (почти сплошная корка). Некоторые язвы объединяются (рис. 5 б). На поверхности

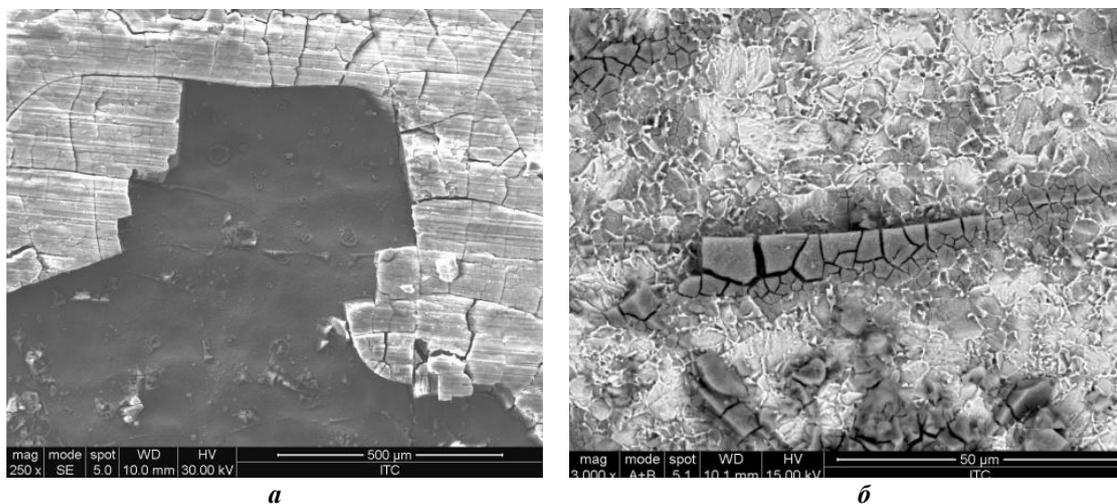


Рис. 3. Поверхность образцов из стали 15Х5МФБЧ после выдержки 1500 часов в CO_2 -содержащей среде: а – общий вид; б – участок с блестящей поверхностью и остатками продуктов коррозии

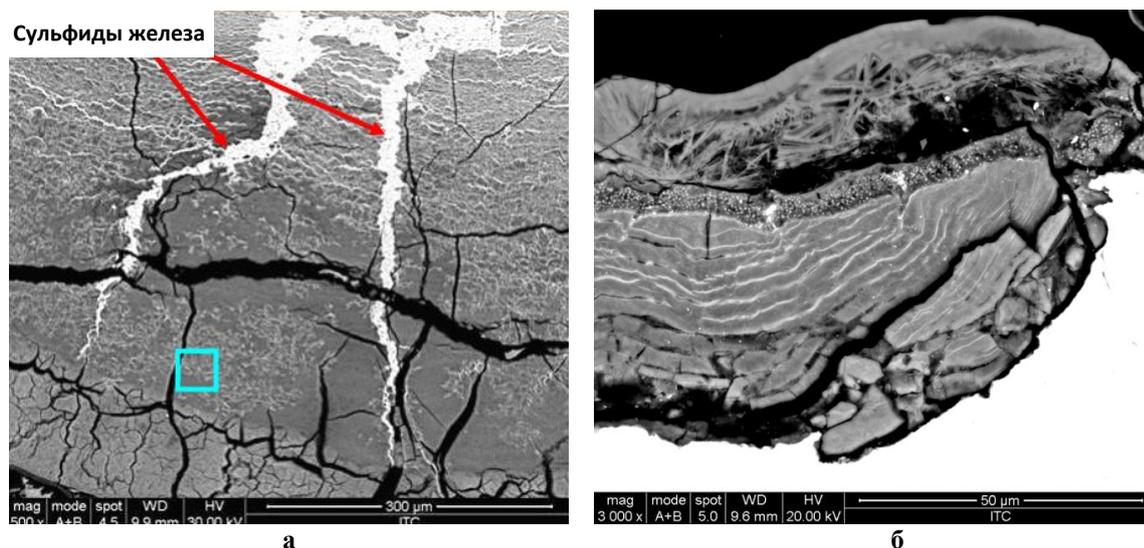


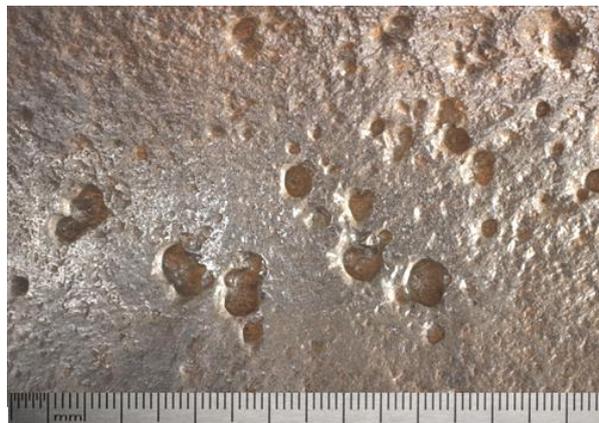
Рис. 4. Сечение продуктов коррозии на стали 15X5MФБЧ:
а – скважина № 4266, наработка 1100 суток; *б* – скважина № 3035, наработка 952 дня



а



б



в

Рис. 5. Внутренняя поверхность труб, очищенных от отложений, после двух лет байпасных испытаний:
а – сталь 09Г2С; *б* – сталь 13ХФА; *в* – сталь 08ХМФА

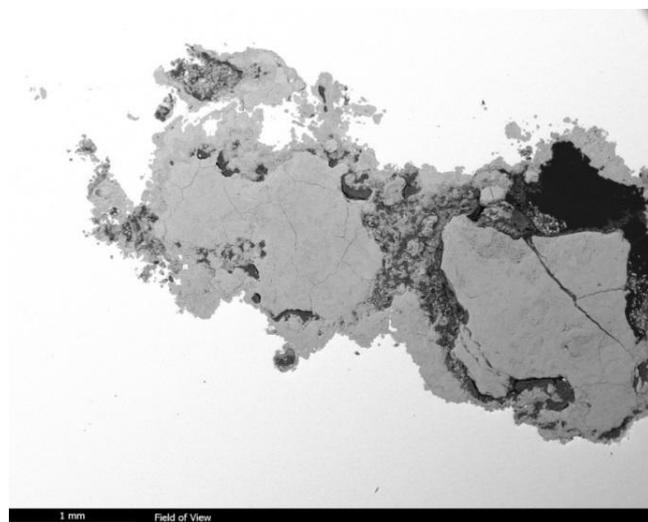
труб из стали 08ХМФА язв значительно меньше (рис. 5 в). Преимущественно они располагаются в виде отдельных полос шириной до 40 мм, направленных по длине трубы.

Исследование особенностей коррозионных повреждений, состава и строения продуктов коррозии показало, что происходит интенсивная углекислотная корро-

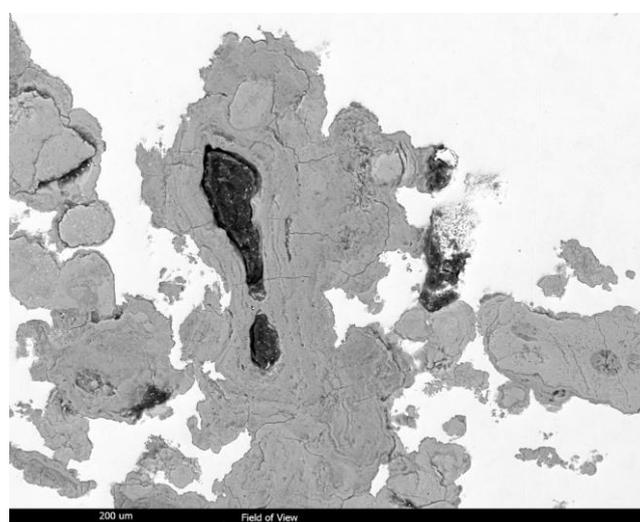
зия. Соответственно, продукты коррозии имеют типичный фазовый состав: карбонаты и оксиды железа, гидроксиды легирующих элементов (Cr, Mo, Si и др.), устойчивых в коррозионной среде, и карбидная фаза корродирующей стали. Кроме общей, происходит ускоренная локальная коррозия, проникающая на глубину до 2 мм (рис. 6–8). Для стали 09Г2С это канавочная



a



б



в

Рис. 6. Коррозионное повреждение труб из стали 09Г2С после двух лет эксплуатации:
a – канавочная коррозия (шлифовка на глубину 0,5 мм от поверхности трубы);
б, в – язвенное повреждение перпендикулярно «канавке» вглубь металла

коррозия с отходящими от «канавок» вглубь металла многочисленными язвенными повреждениями (рис. 6). Сталь 13ХФА имеет отдельные участки со значительной локальной коррозией (рис. 7 а, 7 б). Коррозионные повреждения различных размеров и геометрии произвольно располагаются в виде отдельных фрагментов в объеме приповерхностного слоя. На шлифе (рис. 7 б) не просматривается прямой контакт фрагментов коррозионного разрушения с транспортируемой средой. Для стали 08ХМФА локальная коррозия выражается в виде отдельных язв, опережающих фронт общей коррозии (рис. 8). Форма проявления и интенсивность локальной коррозии зависят от исследуемой стали.

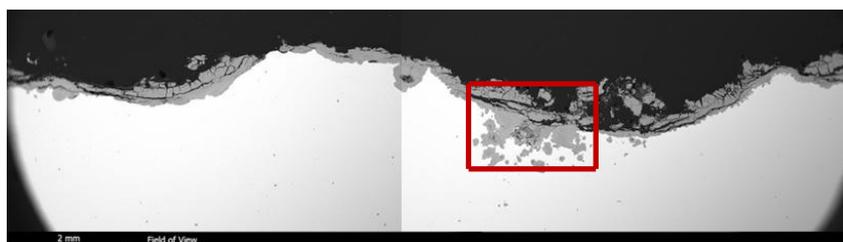
Анализ состава продуктов коррозии показал, что хлор располагается и концентрируется на границе раздела продуктов коррозии и металла. Он присутствует в отдель-

ных фрагментах коррозионного разрушения (рис. 7 в) и самых удаленных областях локальной коррозии (рис. 8 б). По существующим представлениям на поверхности металла образуются хлориды железа, которые легко растворяются и удаляются коррозионной средой.

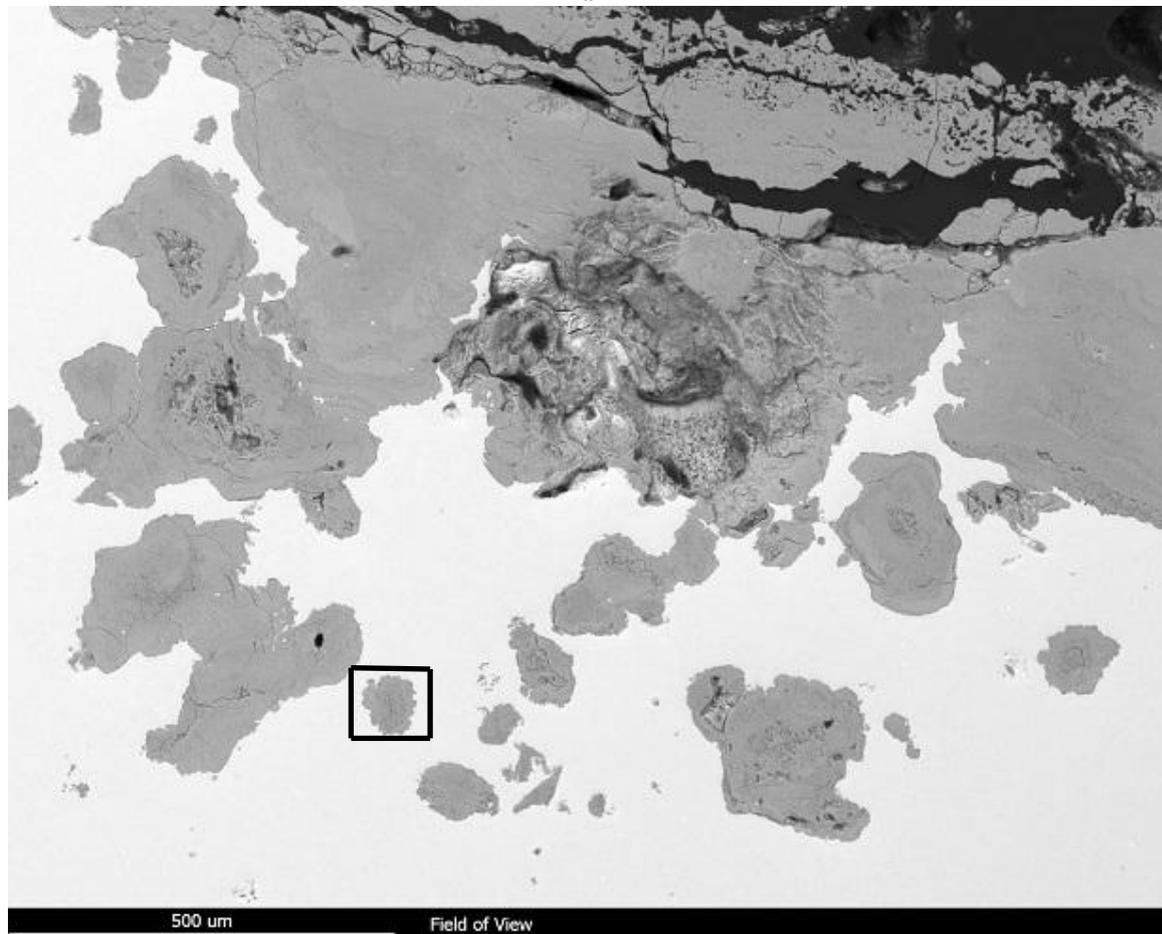
Таким образом, высокое содержание ионов хлора (27,0 г/л) в углекислотных нефтепромысловых средах интенсифицирует процессы углекислотной коррозии и способствует ее переходу в более агрессивную локальную форму.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

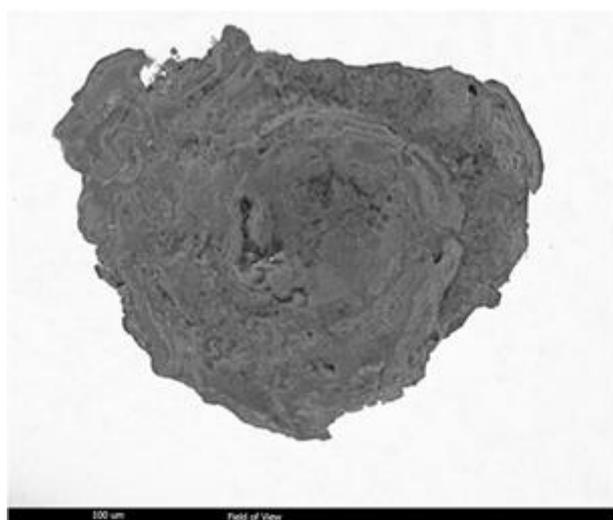
1. В продуктах углекислотной коррозии в средах с высоким содержанием H_2S , кроме обычных составляющих карбонатной коррозии, присутствуют сульфиды железа в виде слоистой сетки.



a



б



в

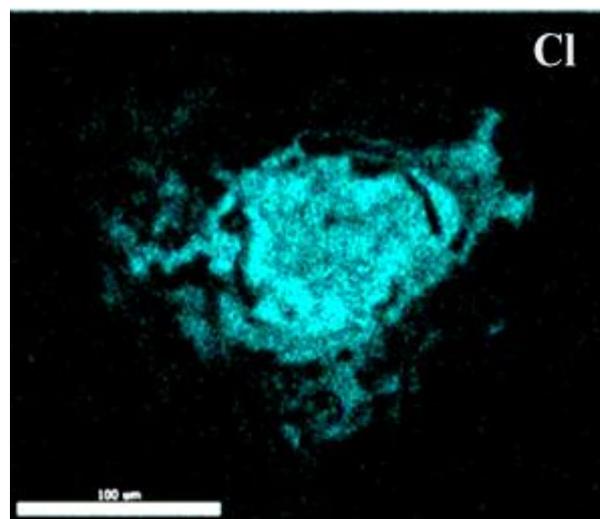


Рис. 7. Коррозионное повреждение труб из стали 13ХФА:
a – общий вид; *б* – участок локальной ускоренной коррозии (выделенная область на рис. *a*);
в – отдельный фрагмент участка локальной коррозии и содержание хлора в продуктах коррозии этого фрагмента (выделенная область на рис. *б*)

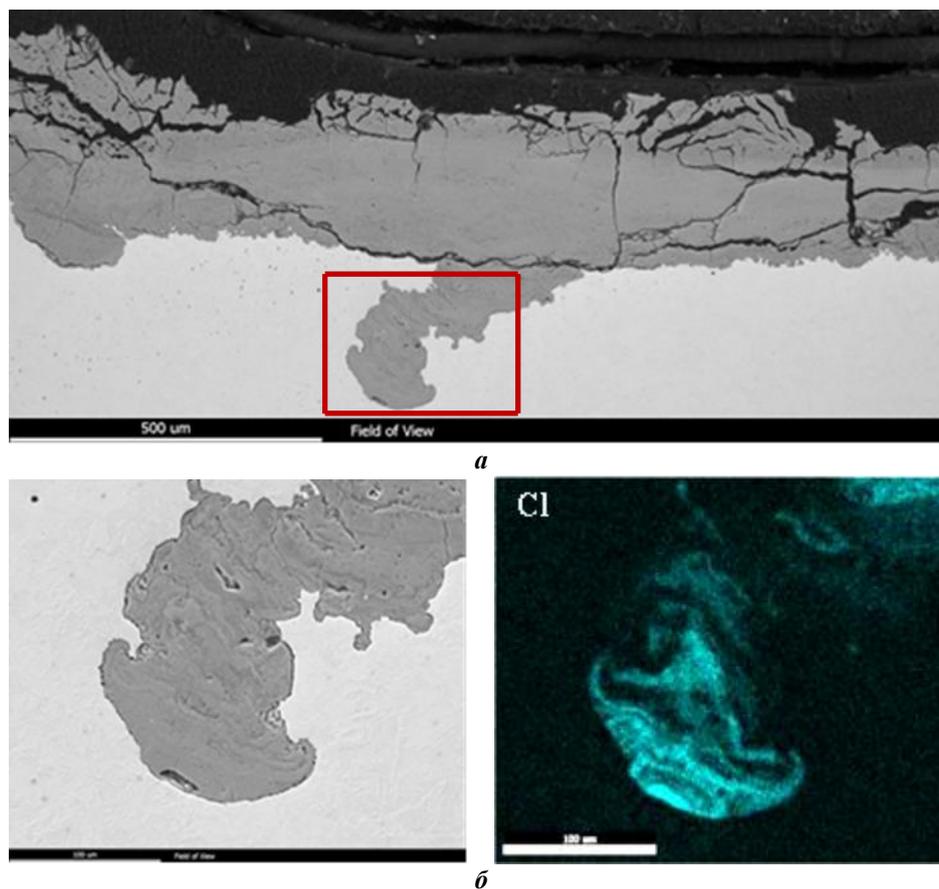


Рис. 8. Коррозионное повреждение труб из стали 08ХМФА: *а* – общий вид; *б* – участок локальной ускоренной коррозии и содержание хлора в продуктах коррозии этого участка (выделенная область на рис. а)

2. Сталь 15Х5МФБЧ с содержанием хрома 4,6 %, благодаря образованию пассивирующей пленки, обладает высокой стойкостью в углекислых средах, насыщенных H_2S и Cl .

3. Для нефтегазопроводных труб ($Cr \leq 0,6$ %) ионы хлора интенсифицируют коррозионное разрушение и вызывают локальные, более агрессивные формы. Скорость локальной коррозии более чем в четыре раза превышает скорость общей коррозии.

4. По стойкости к углекислотной коррозии в средах с высоким содержанием ионов хлора (27,0 г/л) исследуемые стали располагаются в следующей последовательности: 09Г2С \rightarrow 13ХФА \rightarrow 08ХМФА \rightarrow 15Х5МФБЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Маркин А.Н., Низамов Р.Э. CO_2 -коррозия нефтепромыслового оборудования. М.: ВНИИО-ЭНГ, 2003. 188 с.
- Программа повышения надёжности ОАО «НК Роснефть»: материалы по реализации 2012 // Российский союз промышленников и предпринимателей. URL: рспп.рф/.
- Sun J., Sun C., Lin X., Cheng X., Liu H. Effect of Chromium on Corrosion Behavior of P110 Steels in CO_2 - H_2S Environment with High Pressure and High Temperature // *Materials*. 2016. Vol. 9. № 3. P. 200.
- Li D.-P., Zhang L., Yang J.-W., Lu M.-X., Ding J.-H., Liu M.-L. Effect of H_2S concentration on the corrosion behavior of pipeline steel under the coexistence of H_2S and CO_2 // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2014. Vol. 21. № 4. P. 388–394.
- Choy Y.-S., Nesic S., Ling S. Effect of H_2S on the CO_2 corrosion of carbon steel in acidic solution // *Electrochimica Acta*. 2011. Vol. 56. № 4. P. 1752–1760.
- Выбойщик М.А., Иоффе А.В. Разработка стали, стойкой к углекислотной коррозии в нефтедобываемых средах // *Перспективные материалы*. Т. 7. Тольятти: ТГУ, 2017. С. 115–160.
- 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 CO_2 corrosion of pipeline steels // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 80. P. 237–246.
- Guo S., Xu L., Zhang L., Chang W., Lu M. Corrosion of alloy steels containing 2% chromium in CO_2 environments // *Corrosion Science*. 2012. Vol. 63. P. 246–258.
- Тетюева Т.В., Иоффе А.В., Выбойщик М.А., Князькин 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 металлов*. 2012. № 10. С. 15–22.
- Зырянов А.О. Исследование коррозионного разрушения насосно-компрессорных труб из стали 15Х5МФБЧ в высоко агрессивных нефтепромысловых средах

- и усовершенствования технологии термической обработки этих труб : автореф. ... дис. канд. техн. наук. Самара, 2018. 23 с.
11. 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 металлов*. 2012. № 10. С. 22–28.
 12. Денисова Т.В. Разработка стали повышенной прочности и коррозионной стойкости для производства нефтегазопроводных труб : автореф. ... дис. канд. техн. наук. Пенза, 2013. 23 с.
 13. Маковецкий А.Н., Мирзаев Д.А. Влияние термической обработки на хладостойкость стали для нефтяных трубопроводов // *Физика металлов и металлосведение*. 2010. Т. 110. № 4. С. 417–423.
 14. Маковецкий А.Н., Мирзаев Д.А. Влияние исходной структуры трубной стали на механические свойства после закалки из межкритического интервала // *Физика металлов и металлосведение*. 2014. Т. 115. № 6. С. 656–663.
 15. Методика «Проведение промысловых испытаний соединительных деталей нефтегазопроводов в условиях реальных нефтепроводов». Самара: ИТ-Сервис, 2012. 25 с.
 16. Князькин С.А. Выбор состава и структуры стали для изготовления насосно-компрессорных труб с повышенными эксплуатационными характеристиками : автореф. ... дис. канд. техн. наук. Пенза, 2013. 23 с.
 17. Иоффе А.В. Научные основы разработки сталей повышенной прочности и коррозионной стойкости для производства нефтепромысловых труб : автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Пенза, 2018. 43 с.
 18. Трифонова Е.А. Влияние легирования и структуры на коррозионно-механическое разрушение труб из низколегированных сталей H₂S- и CO₂-содержащих средах : автореф. ... дис. канд. техн. наук. Тула, 2010. 20 с.
 19. Иоффе А.В., Выбойщик М.А., Трифонова Е.А., Суворов П.В. Влияние химического состава и структуры на стойкость нефтепроводных труб к углекислотной коррозии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 2. С. 9–14.
 20. Заботин А.Л., Иоффе А.В., Стогова С.В. Способ коррозионных испытаний сталей: патент РФ № 2235309, 2004.
 21. Методика № 004-2009 «Оценка скорости общей коррозии в модельной CO₂-содержащей среде». Самара: ИТ-Сервис, 2013. 32 с.
 4. 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.
 5. Choy Y.-S., Nesic 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.
 6. Vyboishchik M.A., Ioffe A.V. The development of steel resistant to carbon dioxide corrosion in oilfield media. *Perspektivnye materialy*. Togliatti, TGU Publ., 2017. Vol. 7, pp. 115–160.
 7. 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.
 8. Guo S., Xu L., Zhang L., Chang W., Lu M. Corrosion of alloy steels containing 2% chromium in CO₂ environments. *Corrosion Science*, 2012, vol. 63, pp. 246–258.
 9. Tetyueva T.V., Ioffe A.V., Knyaz'kin S.A., Trifonova E.A., Zyryanov A.O., Vyboishchik M.A. 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.
 10. Zyryanov A.O. *Issledovanie korrozionnogo razrusheniya nasosno-kompressornykh trub iz stali 15XMFBCCh v vysoko agressivnykh neftepromyslovykh sredakh i usovershenstvovaniya tekhnologii termicheskoy obrabotki etikh trub*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The study of corrosion failure of oil-well tubing of 15H5MFBCCh steel in highly aggressive oilfield media and the improvement of technology for thermal treatment of these tubes]. Samara, 2018. 23 p.
 11. Ioffe A.V., Tetyueva T.V., Revyakin V.A., Borisenkova E.A., Knyaz'kin S.A., Denisova T.V. Corrosion-mechanical fracture of tube steels in operation. *Metal science and heat treatment*, 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 512–518.
 12. Denisova T.V. *Razrabotka stali povyshennoy prochnosti i korrozionnoy stoykosti dlya proizvodstva neftegazovykh trub*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The development of steel with high strength and corrosion resistance for production of oil-and-gas pipeline tubing]. Penza, 2013. 23 p.
 13. Makovetskii A.N., Mirzaev D.A. Effect of a heat treatment on the cold resistance of steels for oil pipelines. *The Physics of Metals and Metallography*, 2010, vol. 110, no. 4, pp. 398–404.
 14. Makovetskii A.N., Mirzaev D.A. Influence of initial structure of tube steel on its mechanical properties after quenching from intercritical range. *The Physics of Metals and Metallography*, 2014, vol. 115, no. 6, pp. 617–624.
 15. *Metodika "Provedenie promyslovykh ispytaniy soedinitelnykh detaley neftegazoprovodov v usloviyakh realnykh nefteprovodov"* [Methodology "Carrying out of field tests of connecting parts of oil-and-gas pipelines in the conditions of the existing oil-pipelines"]. Samara, IT-Servis Publ., 2012. 25 p.
 16. Knyaz'kin S.A. *Vybor sostava i struktury stali dlya izgotovleniya nasosno-kompressornykh trub*

REFERENCES

1. Markin A.N., Nizamov R.E. *CO₂-korroziya neftepromysloвого oborudovaniya* [CO₂-corrosion of oilfield equipment]. Moscow, VNIIO-ENG Publ., 2003. 188 p.
2. Reliability improvement program of OAO "NK Rosneft": the materials on implementation 2012. *Russian Union of Industrialists and Entrepreneurs*. URL: eng.rspp.ru/.
3. Sun J., Sun C., Lin X., Cheng X., Liu H. Effect of Chromium on Corrosion Behavior of P110 Steels in CO₂-H₂S Environment with High Pressure and High Temperature. *Materials*, 2016, vol. 9, no. 3, p. 200.

- s povyshennymi ekspluatatsionnymi kharakteristikami.* Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The selection of composition and structure of steel for production of oil-well tubing with the improved performance characteristics]. Penza, 2013. 23 p.
17. Ioffe A.V. *Nauchnye osnovy razrabotki staley povyshennoy prochnosti i korroziionnoy stoykosti dlya proizvodstva neftepromyslovykh trub.* Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [The scientific basis for the development of steels with the increased strength and corrosion resistance for production of oilfield tubing]. Penza, 2018. 43 p.
 18. Trifonova E.A. *Vliyaniye legirovaniya i struktury na korroziynno-mekhanicheskoye razrusheniye trub iz nizkolegirovannykh staley H₂S- i CO₂-soderzhashchikh sredakh.* Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [The influence of alloying and structure on the corrosion-mechanical failure of pipes made of low-alloyed steels in H₂S- and CO₂-containing media]. Tula, 2010. 20 p.
 19. Ioffe A.V., Vyboishchik M.A., Trifonova E.A., Suvorov P.V. Effect of chemical composition and structure on the resistance of oil pipelines to carbon dioxide corrosion. *Metal science and heat treatment*, 2010, vol. 52, no. 1-2, pp. 46–51.
 20. Zabolotn A.L., Ioffe A.V., Stogova S.V. *Sposob korroziionnykh ispytaniy staley* [Method for corrosion testing of steels]. Patent RF, no. 2235309, 2004.
 21. *Metodika № 004-2009 "Otsenka skorosti obshchey korrozii v modelnoy CO₂-soderzhashchey srede"* [Methodology No. 004-2009 "The assessment of general corrosion velocity in simulated CO₂-containing medium"]. Samara, IT-Servis Publ., 2013. 32 p.

CARBON DIOXIDE CORROSION OF OILFIELD CASING AND TUBULAR GOODS IN MEDIA SATURATED WITH H₂S AND Cl

© 2019

M.A. Vyboishchik, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, professor of Chair "Nanotechnologies, Materials Science and Mechanics"

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

A.O. Zyryanov, PhD (Engineering), leading engineer

I.V. Gruzkov, leading engineer

A.V. Fedotova, leading engineer

LLC "IT-Service", Samara (Russia)

Keywords: oilfield media; field test; oil-well tubing; oil-and-gas tubing; corrosion resistance; type and kinetics of corrosion failure; carbon dioxide corrosion; corrosion products.

Abstract: Carbon dioxide corrosion is one of the most common reasons for the failure of oil-production equipment. This issue is very urgent for the Russian Federation where the carbon dioxide content is high in the oilfield medium of the most production fields.

The paper deals with the obtaining of information on the basic issues of development of tube steels resistant to the carbon dioxide corrosion: the type and the level of alloying of steels reducing carbon dioxide corrosion lower than 0.2 mm per year; the influence of high content of corrosive H₂S and Cl⁻ components in the carbon dioxide medium on the mechanism and kinetics of corrosion failure. To get this information, the authors carried out pilot tests maximally proximal to operating conditions. Oil-well tubing was tested on seven working wells with intermittent monitoring of pipe condition. The authors carried out field tests of oil-and-gas tubing on testing field of Priobskoye production field consisting of operating oil-pipeline, parallel with which a bypass line made of pipes of experimental steels was mounted.

The production fields and wells where the oilfield media have high CO₂ content and the intensive carbon dioxide corrosion is manifested were used for the tests. In most cases, they are the production fields where the carbon dioxide medium is additionally saturated with the corrosive H₂S and Cl⁻ components.

The authors divided steels under the study in two groups: steels with high chromium content (≈4.6 %) forming the passivating film when in operation and low-alloyed tube steels (Cr≤0.6 %). The tests show that:

- high-chromium 15H5MFBC steel is resistant to carbon dioxide corrosion even in carbon dioxide media with high H₂S and Cl⁻ content;
- the high chlorine content in oilfield media intensifies corrosion failure and promotes the transition to more aggressive forms of local corrosion in low-alloyed tube steels;
- according to the increase of resistance to carbon dioxide corrosion, the steels under the study can be arranged in the following sequence: 09G2S → 13HFA → 08HMFA → 15H5MFBC.

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

© 2019

М.Ю. Захарченко, кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Технология и системы управления в машиностроении»

А.О. Кузнецов, аспирант

А.С. Яковичин, ассистент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении»

В.П. Батищев, магистрант

Б.Н. Костянчук, магистрант

О.В. Захаров, доктор технических наук, доцент, профессор

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов (Россия)

Ключевые слова: акселерометр; калибровка акселерометров; вращение в поле силы тяжести; калибровочный стенд; калибровочный вибростенд; виброметр; АЧХ; ФЧХ.

Аннотация: Существующие на сегодняшний день средства и методы вибрационных испытаний находят свое применение во многих областях науки и техники, особенно в приборостроении, где требуется испытательное или калибровочное воздействие на испытуемый прибор или детали узлов машин. При инженерно-сейсмологических исследованиях для мониторинга технического состояния и изучения характеристик сооружений и конструкций наибольшее применение получили измерительные приборы – сейсмоакселерометры с пределами измеряемых ускорений от 10^{-3} м/с² до нескольких м/с², характеризующиеся диапазоном измеряемых частот от 0,1 до 100 Гц. Изменение вибраций этого диапазона частот предъявляет особые требования к характеристикам средств измерений, а также к методам их испытаний и калибровки. Однако на практике наибольшее распространение получили электродинамические калибровочные вибростенды, работающие в частотном диапазоне от 5 Гц до 20 кГц с амплитудой до нескольких десятков м/с². В статье рассмотрены особенности методики калибровки индукционных и пьезоэлектрических акселерометров путем поворота оси чувствительности испытуемого прибора в гравитационном поле Земли, приведены примеры средств и методов испытаний иными способами на электродинамических, механических и гидравлических вибростендах. Проанализированы достоинства и недостатки рассматриваемой методики испытаний и калибровки по сравнению с аналогичными. Описана конструкция и работа калибровочного стенда, основанная на повороте оси чувствительности испытуемого прибора в гравитационном поле Земли; приведены формулы для расчета входного ускорения, действующего вдоль оси чувствительности прибора. На основании этого предложена кинематическая схема стенда, математическая модель методики калибровки в виде структурной схемы. В статье представлены экспериментальные полученные данные испытуемого прибора: амплитудно-частотная характеристика и фазо-частотная характеристика датчика. Проведено сравнение экспериментальных данных с данными, полученными из математической модели процесса калибровки.

ВВЕДЕНИЕ

Методы и средства для вибрационных испытаний находят свое применение во многих областях техники, например в приборостроении при создании сейсмических датчиков [1; 2]. Для этого требуется испытательное или калибровочное воздействие на испытуемый прибор с пределами измеряемых ускорений от 10^{-3} м/с² до нескольких единиц м/с², характеризующийся диапазоном измеряемых частот 0,1÷100 Гц [3–5]. Изменение вибраций этого диапазона частот предъявляет особые требования к характеристикам средств измерений, а также к методам их калибровки [6–8]. Измерение вибраций актуально и для других областей техники [8; 9].

На практике наибольшее распространение получили электродинамические калибровочные вибростенды [10–12], работающие в частотном диапазоне от 5 до 20 кГц с амплитудой до нескольких десятков м/с². Конструктивно электродинамические вибростенды схожи с динамиком громкоговорителя акустической системы. Поэтому при низкой частоте воспроизводимого ускорения ток, протекающий в обмотке актуатора, изменяется медленно, в результате чего происходит интенсивный нагрев обмотки и изменяется ее внутреннее сопротивление, что приводит к нестабильности заданной амплитуды. Данный недостаток не позволяет использовать электродинамические вибростенды для калибровки

низкочастотных сейсмоакселерометров с точностью задания входного ускорения не хуже 10^{-3} м/с² в области низких частот [13; 14]. Указанного недостатка лишены механические вибростенды, которые обычно обеспечивают нижнюю границу частоты порядка 1–3 Гц при перемещении платформы в пределах нескольких сантиметров [15]. Однако они не позволяют задать амплитуду воздействующего ускорения выше нескольких сотых м/с².

Таким образом, существующие средства испытаний в области низких частот не способны обеспечить величину задаваемой амплитуды порядка 9,8 м/с² и одновременно высокую стабильность амплитуды и частоты. К сожалению, вопросам теории и практики калибровки и испытаний сейсмоакселерометров в области низких частот в литературе уделяется недостаточное внимание [16; 17]. Настоящая работа является попыткой заполнить этот пробел.

Цель исследования – экспериментальное обоснование методики калибровки акселерометров для области низких частот путем поворота оси вращения в поле силы тяжести и разработка стенда для калибровки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известно, что ускорение a , развиваемое подвижной частью калибровочных стендов (электродинамических,

механических и гидравлических), связано с частотой входного воздействия через следующее соотношение [2]:

$$a = \frac{2S\omega}{1000}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, рад/с;

S – перемещение подвижной части калибровочного стенда, м;

f – частота входного воздействия, Гц.

Для поддержания амплитуды испытательного воздействия на постоянном уровне с уменьшением частоты f необходимо увеличивать перемещение S . На рис. 1 приведен график зависимости перемещения S от частоты f при постоянной величине ускорения $a = 9,8 \text{ м/с}^2$. Из рис. 1 видно, что для поддержания заданной величины ускорения $9,8 \text{ м/с}^2$ на частоте 1 Гц перемещение подвижной части калибровочного вибростенда должно составлять примерно 250 мм. Среди известных производителей испытательного оборудования величина свободного перемещения подвижной части калибровочного вибростенда обычно не превышает 25 мм ввиду конструктивных ограничений [16].

Известно, что данного недостатка лишен метод калибровки путем вращения в поле силы тяжести [1; 6]. В этом случае происходит поворот оси чувствительности испытываемого прибора Z_{Π} , а проекция вектора ускорения силы тяжести изменяется по гармоническому закону, создавая переменное гармоническое воздействие (рис. 2). Однако такой способ калибровки подходит для типов низкочастотных акселерометров, нечувствительных к центробежным силам, например электродинамических и пьезоэлектрических.

Амплитудное значение воздействия калибровочного сигнала равно проекции вектора ускорения силы тяжести на ось чувствительности калибруемого прибора:

$$Z_{\Pi} = g \cdot \cos(\varphi), \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести;

φ – угол наклона оси чувствительности прибора.

При равномерном вращении испытываемого прибора с постоянной угловой скоростью ω входное ускорение изменяется по следующему гармоническому закону [1]:

$$a_{\text{вх}}(t) = g \cdot \cos(\varphi) \sin(\theta), \quad (3)$$

где $a_{\text{вх}}$ – входное ускорение, действующее вдоль оси чувствительности прибора.

Таким образом, при вращении оси чувствительности испытываемого прибора в поле силы тяжести амплитуда входного ускорения выдерживается постоянной и не зависит от частоты. Используя выражение (3), составим математическую модель процесса калибровки. Полученная структурная схема математической модели процесса калибровки приведена на рис. 3 и состоит из трех основных элементов. Слева расположены элементы, задающие входное воздействие, которое поступает на вход передаточной функции акселерометра “*Accel*”, выходной сигнал масштабируется в блоке “*K_accel*” в соответствии с коэффициентом преобразования калибруемого датчика $K_p = 10 \text{ мВ/г}$.

В математической модели, приведенной на рис. 3, не учтено влияние, вызванное разбалансировкой. Так как подвижная часть закреплена жестко и не имеет люфта, то влияние несбалансированности составляет не более 1 % от выходного сигнала.

В качестве испытываемого прибора в данной работе используется виброметр KD45. Ускорение, формируемое вращением оси чувствительности испытываемого прибора в поле силы тяжести, является входным воздействием. Зависимость входного воздействия от времени приведена на рис. 4. На рис. 4 видно, что с ростом частоты входного воздействия амплитуда входного ускорения не изменяется и равна ускорению силы тяжести, определенной для местности, в которой проходят испытания. При этом выходной сигнал испытываемого прибора, приведенный на рис. 5, изменяется нелинейно. Нелинейность выходного сигнала испытываемого прибора обусловлена его конструкцией и особенностями построения измерительного канала. Как правило, при разработке новых систем на базе различных виброметров требуется не только теоретический расчет, но и экспериментальное подтверждение получаемых результатов.

На рис. 6 приведены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазо-частотная характеристика испытываемого прибора (ФЧХ) (виброметра KD45), полученные при математическом моделировании в среде MATLAB [18–20]. Из графиков видно, что нижняя граница частоты полученного измерительного канала (частота среза) составляет 2,91 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментальной проверки полученных результатов и отработки методики проверки и получения АЧХ был разработан макетный образец калибровочного стенда, общий вид которого приведен на рис. 7.

Структурная схема калибровочного стенда приведена на рис. 8. Экспериментальный образец калибровочного стенда построен на базе Arduino (микроконтроллер Atmega 328p), он имеет возможность подключения к персональному компьютеру для передачи данных.

Низкочастотный стенд для калибровки и испытаний акселерометров и сейсмоприемников состоит из корпуса 1, выполненного в виде массивной станины, на котором посредством шарикоподшипниковой опоры 2 и двух полуосей закреплена подвижная вращающаяся платформа 3, которая приводится в движение бесконтактным электроприводом 4. На подвижной вращающейся части располагается исследуемый датчик 5, подключенный к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) 7 через сопротивление нагрузки 6; также на подвижной вращающейся платформе 3 расположены балансирующие грузы 12 (m_1) для грубой балансировки и 13 (m_2) для точной балансировки. На подвижной вращающейся платформе для контроля стабильности вращения располагается блок микромеханических гироскопов и акселерометров (MPU6050) 8.

Аналого-цифровой преобразователь 7 и блок микромеханических гироскопов и акселерометров 8 подключены параллельно к цифровой шине данных I^2C и соединены с цифровым входом микроконтроллера 11, электрические сигналы с подвижной платформы 3 проходят через узел скользящих токоподводов 9. Помимо механической части низкочастотный стенд содержит

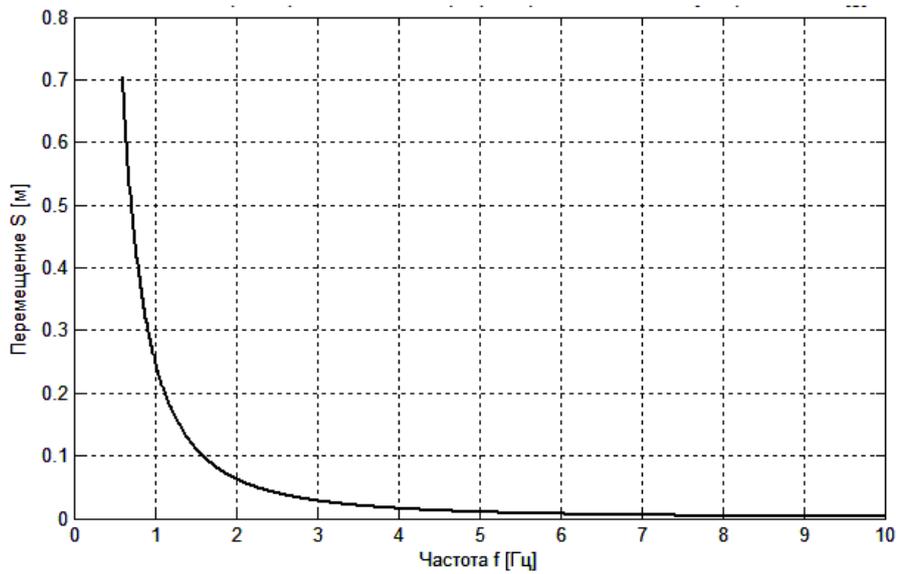


Рис. 1. Зависимость амплитуды перемещения от частоты

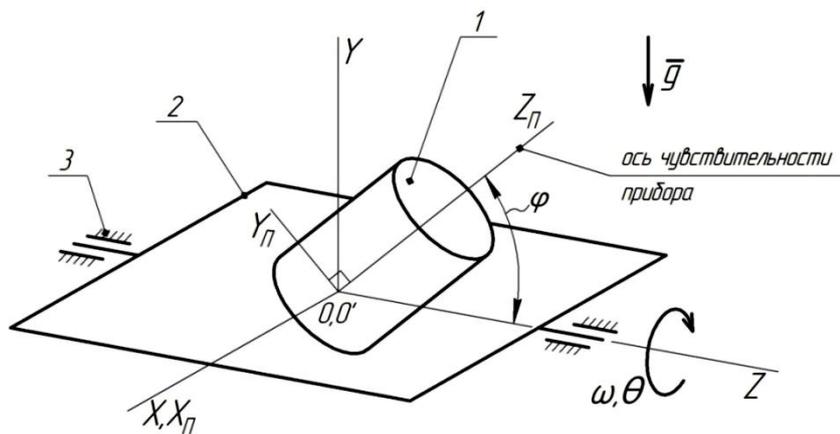


Рис. 2. Кинематическая схема устройства калибровки путем поворота в гравитационном поле

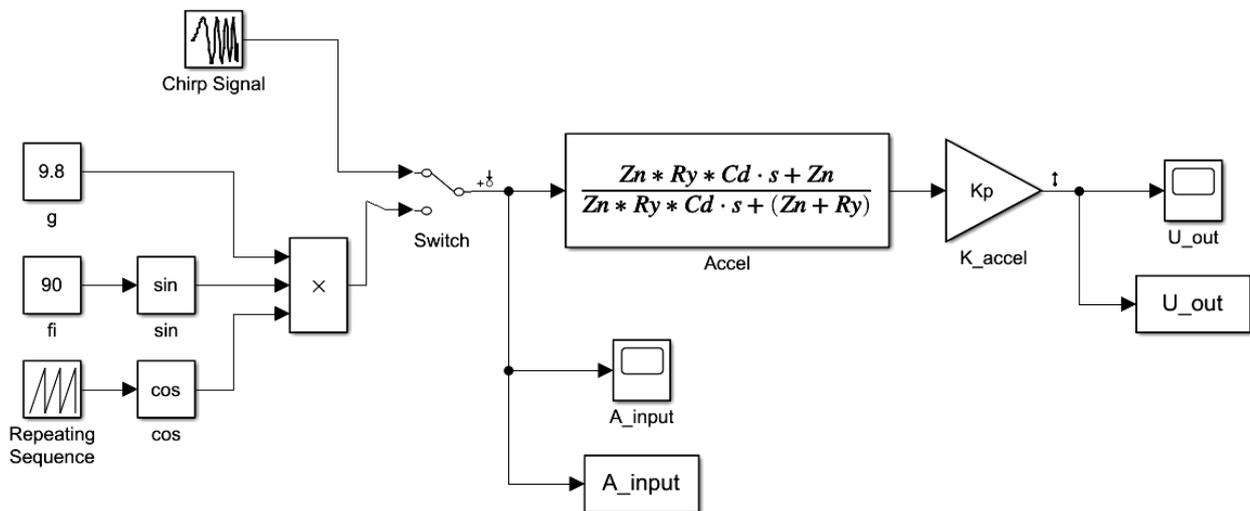


Рис. 3. Структурная схема математической модели, построенная в Matlab

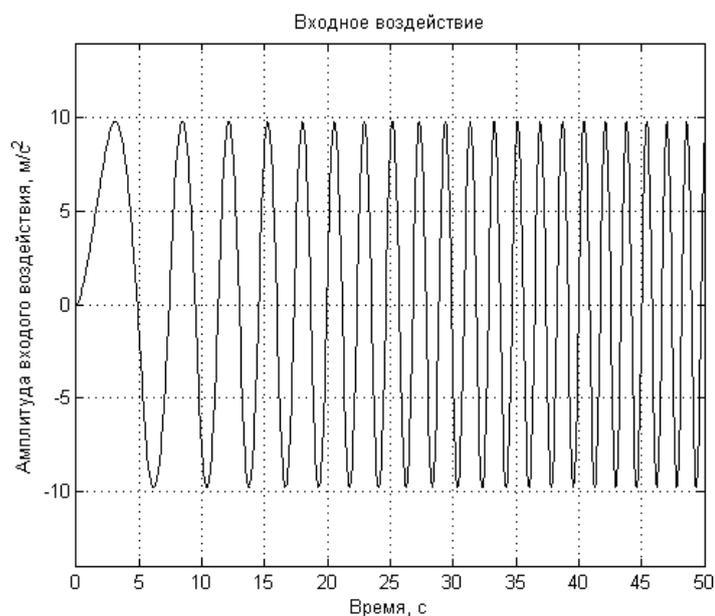


Рис. 4. Входное воздействие

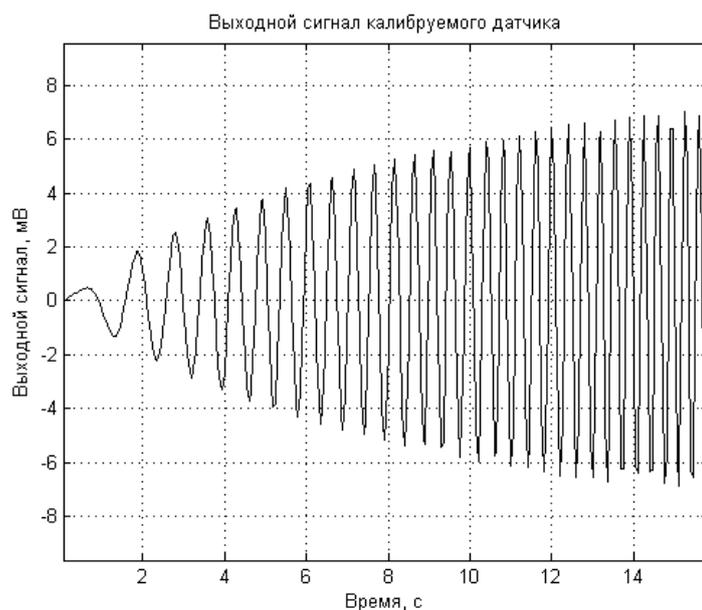


Рис. 5. Выходной сигнал

блок электроники 10, содержащий внутренний источник питания 14, понижающий преобразователь 16, микроконтроллер 11, датчик температуры и влажности 17, информационный дисплей 18 и цифровой вход для подключения к компьютеру 19. Питание осуществляется от сети 220 В переменным напряжением частотой 50 Гц и подводится к входу питания 15 внутреннего источника питания 14. Программное обеспечение, находящееся в памяти микроконтроллера 11, способно выполнять ряд команд, поступающих на цифровой вход 19, позволяющих осуществлять управление калибровочным стендом и производить различные операции калибровки и испытаний датчика.

Работа калибровочного стенда осуществляется следующим образом. После подключения исследуемого

датчика 5 и подачи питания 15 на внутренний источник питания 14 калибровочный стенд готов к работе и ожидает команд управления от компьютера через цифровой вход 19. При получении микроконтроллером 11 на цифровой вход 19 команды, означающей начало работы, производится проверка работы аналого-цифрового преобразователя 7, блока микромеханических гироскопов и акселерометров 8 и датчика температуры и влажности 17. Затем микроконтроллер 11 подает напряжение широтно-импульсной модуляции на вход бесконтактного электропривода 4. При этом скорость вращения вала бесконтактного электропривода 4 пропорциональна длительности управляющих импульсов напряжения широтно-импульсной модуляции. При вращении вала бесконтактного электропривода 4 приводится

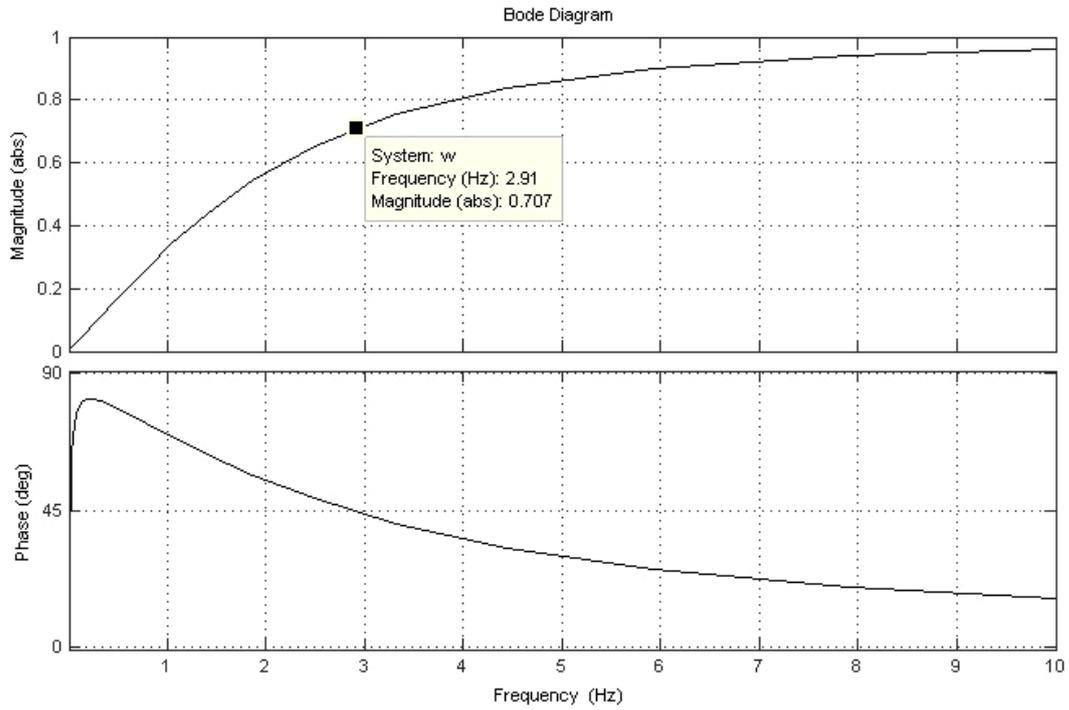


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ виброметра KD45 ($R_H=5,5$ МОм, $C_Z=11,2$ нФ)

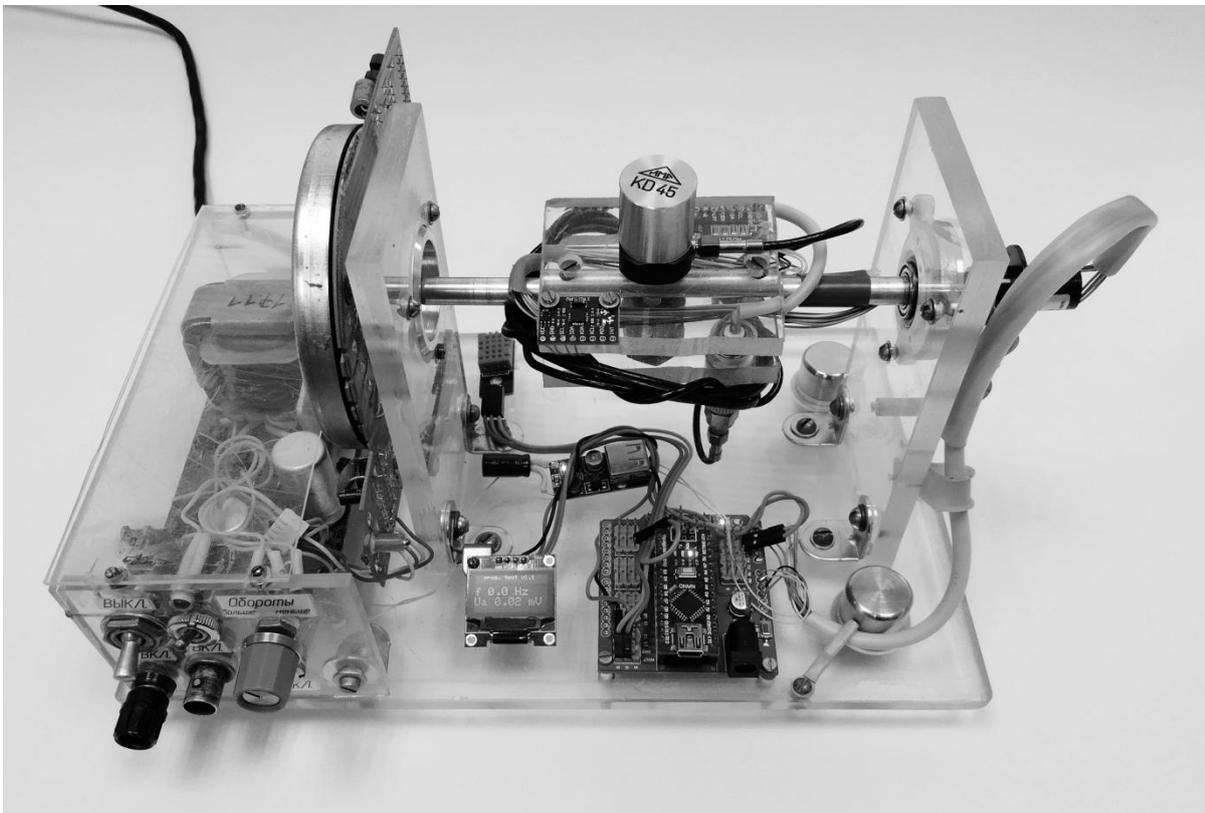


Рис. 7. Экспериментальный образец калибровочного стенда

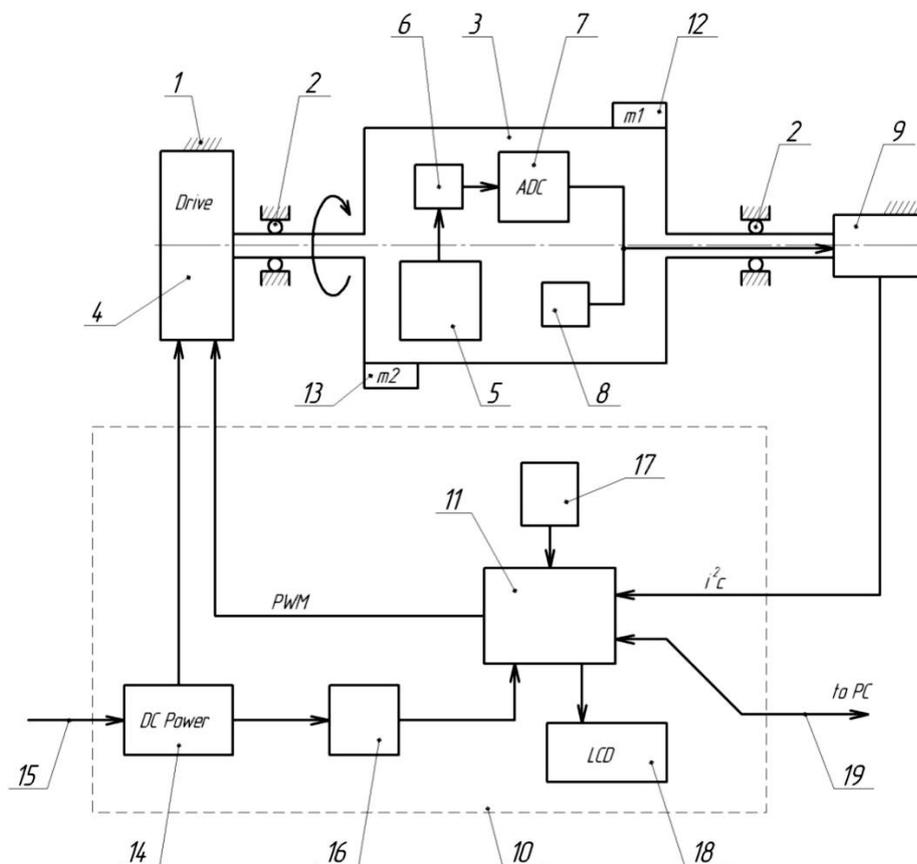


Рис. 8. Кинематическая схема калибровочного стенда:

- 1 – корпус; 2 – шарикоподшипниковая опора; 3 – подвижная вращающаяся платформа; 4 – бесконтактный электропривод; 5 – исследуемый датчик; 6 – сопротивление нагрузки; 7 – АЦП; 8 – блок микромеханических гироскопов и акселерометров; 9 – скользящие токоподводы; 10 – блок электроники; 11 – микроконтроллер; 12 – балансировочный груз для грубой балансировки; 13 – балансировочный груз для точной балансировки; 14 – внутренний источник питания; 15 – вход питания; 16 – понижающий преобразователь; 17 – датчик температуры и влажности; 18 – информационный дисплей; 19 – цифровой вход

в движение подвижная вращающаяся платформа 3, на которой установлен исследуемый датчик 5 и блок микромеханических гироскопов и акселерометров 8; за счет изменения проекции вектора ускорения силы тяжести на ось чувствительности исследуемого датчика 5 на его выходе появляется электрический сигнал, пропорциональный величине действующего ускорения, но при этом зависящий от частоты вращения подвижной вращающейся платформы 3. Электрический сигнал, полученный на выходе исследуемого датчика 5, поступает на сопротивление нагрузки 6 и измеряется аналого-цифровым преобразователем 7, после чего цифровое значение выходного напряжения исследуемого датчика 5 считывается микроконтроллером 11, обрабатывается заложенным в памяти микроконтроллера алгоритмом и выводится на информационный дисплей 18, а также отправляется на компьютер посредством цифрового входа 19. Микроконтроллер 11 выполняет функцию стабилизации вращения подвижной вращающейся платформы 3 в заданном диапазоне. Для этого микроконтроллер 11 получает информацию с блока микромеханических гироскопов и акселерометров 8 о действующей угловой скорости вокруг оси вращения подвижной вращающейся платформы 3, при помощи за-

ложенного в памяти алгоритма производит компенсацию длительности управляющих импульсов напряжения широтно-импульсной модуляции пропорциональной скорости вращения вала бесконтактного электропривода 4.

При разгоне подвижной платформы происходит поворот оси чувствительности испытуемого прибора, проекция ускорения силы тяжести изменяется по гармоническому закону, при этом выходной сигнал изменяется нелинейно. На рис. 9 представлена запись выходного сигнала испытуемого прибора KD45 ($R_H=5,5 \text{ МОм}$, $C_Z=11,2 \text{ нФ}$), полученная в ходе эксперимента.

Из диаграммы на рис. 9 видно, что с ростом скорости вращения подвижной платформы экспериментального образца калибровочного стенда выходной сигнал испытуемого прибора изменяется нелинейно; при низкой скорости вращения подвижной платформы частота входного воздействия низкая, следовательно, и амплитуда выходного сигнала должна быть низкой, а с ростом частоты (скорости вращения) должна возрастать. АЧХ, полученная в ходе математического моделирования (рис. 6), подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 9.

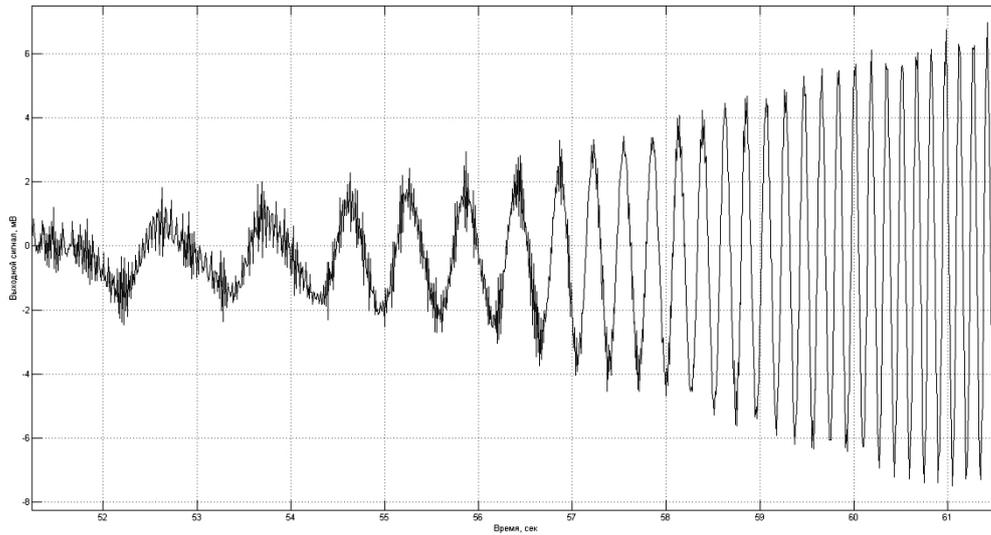


Рис. 9. Выходной сигнал испытуемого прибора при разгоне подвижной платформы

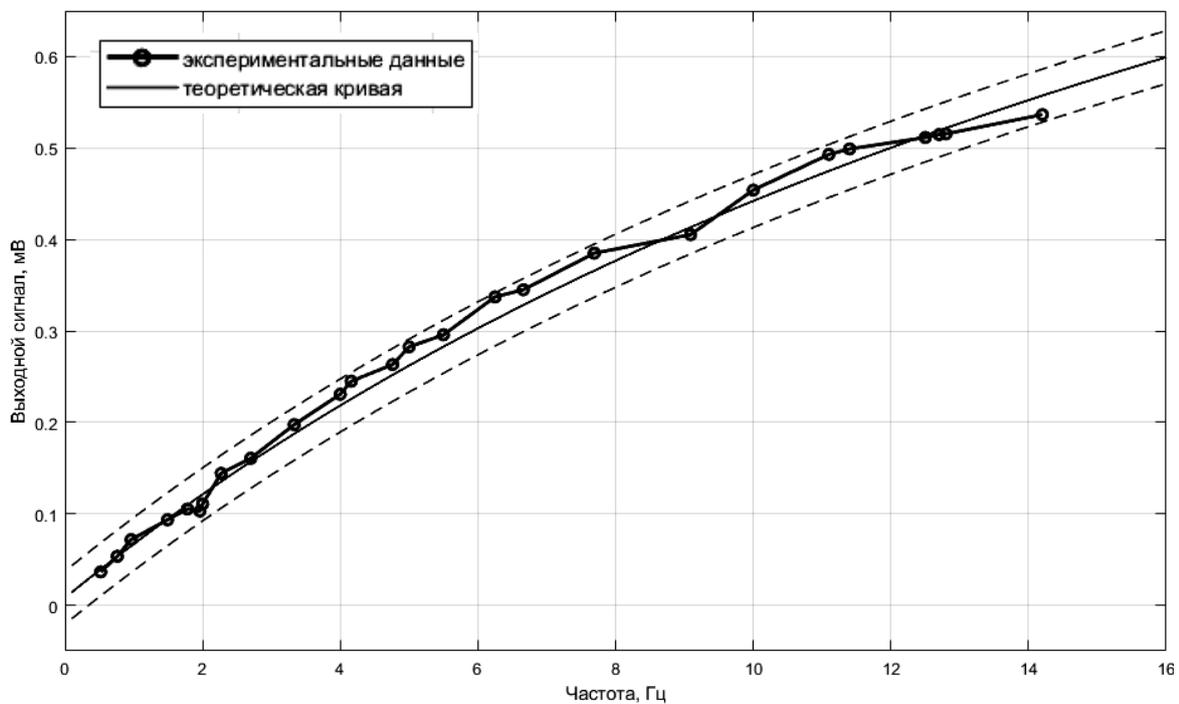


Рис. 10. Экспериментальная и расчетная АЧХ виброметра KD45

Используя данные, полученные в ходе эксперимента, построим экспериментальную АЧХ испытуемого прибора, для этого составим автоматический алгоритм обработки данных. Суть автоматического алгоритма заключается в измерении периода каждого оборота подвижной платформы, вычислении частоты и измерения амплитуды выходного сигнала для каждого оборота. На рис. 10 приведена теоретическая кривая, а также АЧХ, полученная по математической модели (рис. 3, рис. 6). Пунктирной линией показано 5 %-ное поле допуска. Из рис. 10 видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных. Отклонение экспериментальных данных от теоретических составляет не более 5 % от установившегося значения.

ретических составляет не более 5 % от установившегося значения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, в ходе проведенной работы была экспериментально подтверждена теоретическая модель процесса калибровки путем поворота оси вращения в поле силы тяжести, в результате чего доказана эффективность предлагаемого метода калибровки в области низких частот. С использованием разработанного экспериментального образца калибровочного стенда проведены экспериментальные исследования виброметра KD45, подтвердившие правильность теоретических положений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фремд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: Наука, 1978. 176 с.
2. Иориш Ю.И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. М.: Машгиз, 1963. 771 с.
3. Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. Системный анализ и математическое моделирование в механотронике виброзащитных систем. Иркутск: Ир-ГУПС, 2012. 288 с.
4. Смирнов В.В., Симчук А.А., Кирпичев А.А. Способ градуировки пьезоэлектрических акселерометров путем поворотов в гравитационном поле: патент РФ № 2519833, 2014.
5. Гросул А.Б., Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Применение метода динамических наклонов в поле силы тяжести для градуировки вертикальных сейсмоприемников акселерометрического типа // Сейсмические приборы. 1990. № 21. С. 175–177.
6. Абрамов О.К. Устройство для калибровки акселерометров в поле земного тяготения // Вестник РГРТУ. 2008. № 4. С. 35–41.
7. Захаров О.В. Измерение отклонения от круглости с использованием гармонического анализа // Контроль. Диагностика. 2006. № 1. С. 49–51.
8. Иванов О.И., Драчев О.И. Модели динамических явлений процесса механической обработки длинномерных осесимметричных деталей // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 2. С. 140–143.
9. Новичков С.В., Попова Т.И. Технико-экономическая оптимизация площади котла-утилизатора с учетом условий эксплуатации в составе бинарной ПГУ-ТЭЦ // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 11-12. С. 41–48.
10. Иванов В.В., Васин А.Н., Изнаиров Б.М. Методика моделирования параметров турбулентности двухфазной турбулентной струи // Исследование сложных технических и технологических систем: сборник научных трудов. Саратов: СГТУ, 2017. С. 53–57.
11. Балаев А.Ф. Анализ механизма вибромеханической релаксации остаточных напряжений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 14. С. 10–14.
12. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 400 с.
13. Епишкин А.Е. Стабилизация амплитуды колебаний автоматизированных вибрационных установок // ХХІХ Неделя науки СПбГТУ: материалы межвузовской научной конференции. СПб.: СПбГТУ, 2001. С. 141–142.
14. Шестаков В.М., Алексеев Д.В., Епишкин А.Е., Нагибина О.Л. Оптимизация динамических режимов работы взаимосвязанных электромеханических систем испытательных вибростендов // Электротехника. 2003. № 5. С. 25–30.
15. Дмитриев В.Н., Горбунов А.А. Исследование пусковых режимов асинхронного дебалансного вибродвигателя // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 1-2. С. 119–122.
16. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
17. Тараненко П.А., Пронина Ю.О., Березин И.Я., Абызов А.А. Стендовые исследования виброзащитных устройств при случайном внешнем нагружении // Вестник Южно-Уральского университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2018. № 10. С. 58–64.
18. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
19. Дьяконов В.П. Matlab 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. М.: Солон-Пресс, 2004. 592 с.
20. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2006. 751 с.

REFERENCES

1. Fremd V.M. *Instrumentalnye sredstva i metody registratsii silnykh zemletryasenyi* [Tools and methods of registration of large earthquakes]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 176 p.
2. Iorish Yu.I. *Vibrometriya. Izmerenie vibratsii i udarov. Obshchaya teoriya, metody i pribory* [Vibrometry. Vibrations and shocks measurement. General theory, methods and devices]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 771 p.
3. Khomenko A.P., Eliseev S.V., Ermoshenko Yu.V. *Sistemnyy analiz i matematicheskoe modelirovanie v mekhanotronike vibrozashchitnykh sistem* [System analysis and mathematical modeling in mechatronics of vibroprotection systems]. Irkutsk, Ir-GUPS Publ., 2012. 288 p.
4. Smirnov V.V., Simchuk A.A., Kirpichev A.A. *Sposob graduirovki pezoelektricheskikh akselerometrov putem povorotov v gravitatsionnom pole* [Method of calibration of piezoelectric accelerometers by rotating in gravitational field], patent RF no. 2519833, 2014.
5. Grosul A.B., Nekrasov V.N., Sergeev S.V. The application of method of dynamic slopes in gravitational field to calibrate vertical seismic receivers of accelerometer type. *Seysmicheskie pribory*, 1990, no. 21, pp. 175–177.
6. Abramov O.K. The device for calibration of accelerometers in the earth gravity field. *Vestnik RGRU*, 2008, no. 4, pp. 35–41.
7. Zakharov O.V. Circular deviation measurement using Fourier analysis. *Kontrol. Diagnostika*, 2006, no. 1, pp. 49–51.
8. Ivanov O.I., Drachev O.I. Model of dynamic effects of treatment a mechanical long osesimetricnyh parts. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 2, pp. 140–143.
9. Novichkov S.V., Popova T.I. Technical and economic optimization of the area of a heat recovery boiler taking into account operating conditions as a part of binary combined-cycle cogeneration plant. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2012, no. 11-12, pp. 41–48.
10. Ivanov V.V., Vasin A.N., Iznairov B.M. The methodology of modeling turbulence parameters of two-phase turbulent stream. *Issledovanie slozhnykh tekhnicheskikh i tekhnologicheskikh sistem: sbornik nauchnykh trudov*. Saratov, SGTU Publ., 2017, pp. 53–57.
11. Balaev A.F. The analysis of mechanism of vibromechanic relaxation of residual stresses. *Izvestiya*

- Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 14, pp. 10–14.
12. Blekhman I.I. *Vibratsionnaya mekhanika* [Vibration mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 400 p.
 13. Epishkin A.E. Stabilization of vibrational amplitude of automated vibration machines. *XXIX Nedelya nauki SPbGTU: materialy mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii*. Sankt Petersburg, SPbGTU Publ., 2001, pp. 141–142.
 14. Shestakov V.M., Alekseev D.V., Epishkin A.E., Nagibina O.L. Optimization of dynamic modes of work of interconnected electromechanical systems of testing vibro-stands. *Elektrotehnika*, 2003, no. 5, pp. 25–30.
 15. Dmitriev V.N., Gorbunov A.A. The studying of starting modes of asynchronous debalanced vibration motor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2008, no. 1-2, pp. 119–122.
 16. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micro-mechanical devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p.
 17. Taranenko P.A., Pronina Yu.O., Berezin I.Ya., Abyzov A.A. Benchmark trials of anti-vibration devices under random external loading. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika*, 2018, no. 10, pp. 58–64.
 18. Andrievskiy B.R., Fradkov A.L. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke MATLAB* [Selected chapters of automation control theory with examples on MATLAB language]. Sankt Petersburg, Nauka Publ., 1999. 467 p.
 19. Dyakonov V.P. *Matlab 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Obrabotka signalov i izobrazheniy* [Matlab 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Signal and image processing]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004. 592 p.
 20. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Signal digital processing]. Sankt Petersburg, Piter Publ., 2006. 751 p.

TEST STAND FOR LOW-FREQUENCY CALIBRATION OF ACCELEROMETERS

© 2019

M.Yu. Zakharchenko, PhD (Engineering), Associate Professor,
Head of Chair “Technology and Management Systems in Mechanic Engineering”

A.O. Kuznetsov, postgraduate student

A.S. Yakovishin, assistant of Chair “Technology and Management Systems in Mechanic Engineering”

V.P. Batischev, graduate student

B.N. Kostyanchuk, graduate student

O.V. Zakharov, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov (Russia)

Keywords: accelerometer; accelerometer calibration; rotation in gravity field; calibration stand; calibration vibro-stand; vibrometer; amplitude-frequency response characteristic; phase-frequency characteristic.

Abstract: Current tools and techniques of vibration testing are applied in many areas of science and technology, especially in tool engineering where testing or calibrating exposure to the device under test or machine detail components is required. During engineering-seismological study to monitor technical state and analyze characteristics of structures, the authors widely used measuring equipment – seismo-accelerometers with the measured acceleration range from 10^{-3} m/s² to several m/s² and the measured frequency range from 0.1 to 100 Hz. Changes in vibrations of the specified frequency range apply special requirements to the characteristics of measuring tools as well as to the techniques of their testing and calibration. However, in practice, the electrodynamic calibration vibro-stands operating in the frequency range from 5 Hz to 20 kHz with the amplitude up to several tens of m/s² got widespread use. The paper considers special aspects of calibration methodology of inductive and piezoelectric accelerometers by rotating the sensitive axis of the tested device in the earth’s gravitational field, gives the examples of tools and testing techniques by other methods using electrodynamic, mechanical, and hydraulic vibro-stands. The authors analyzed the advantages and disadvantages of the testing and calibration methodology under consideration compared to the analogous ones; described the design and operation of calibration stand based on the rotation of sensitive axis of tested device in the earth’s gravitational field; gave the formulas to calculate incoming acceleration acting along the sensitive axis of the device. For this reason, the authors proposed the stand’s kinematic diagram, the mathematical model of calibration methodology in the form of a structural diagram. The paper presents the experimental data of the tested device: the sensor’s amplitude-frequency response characteristic and phase-frequency characteristic. The authors compared the experimental data with the data obtained from the mathematical model of the calibration process.

КОМПЛЕКСНЫЙ ПАРАМЕТР ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПОРНЫХ ПЛАСТИН РЕЖУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ РЕЗЦОВ

© 2019

А.Н. Кравцов, инженер

Научно-производственный кооператив «ОНИКС», Ирбит (Россия)

Ключевые слова: эксплуатационные характеристики; поверхностный слой; долговечность; комплексный параметр; блочные резцы.

Аннотация: Рассмотрено решение задачи по повышению работоспособности многоэлементных резцов (в виде таких рабочих характеристик, как, например, интенсивность поломок режущего элемента и его опорных пластин и др.) за счет изменения регламентации параметров состояния поверхностного слоя их деталей. Потребность в элементах с заданными свойствами в конструкциях резцов обосновывается их низкой прочностью и надежностью.

На заданные свойства деталей резцов влияет форма опорной поверхности режущего элемента. Форма профиля опорной поверхности режущего элемента рассмотрена в виде двух неровностей, расположенных на расстоянии шага волнистости (в виде масляных карманов). Форма профиля рассматривается как концентратор напряжений.

По снижению предела выносливости концентратора устанавливается, какие параметры влияют на долговечность. Режущий элемент воспринимает нагрузку от сил резания, которая передается остальным деталям резца по узлам его базирования и закрепления.

Рассчитан комплекс состояния поверхности, в который заложено достижение долговечности, с доминирующим влиянием высотных и шаговых параметров шероховатости и волнистости. Расчет ведется по узлам базирования и закрепления режущего элемента. В узлах базирования преобладают нормальные напряжения на поверхности, а в узлах закрепления – касательные. Показано, что нормальные и касательные напряжения равноценны.

Определено значение комплекса, зависящее и не зависящее от условий обработки поверхности (технологическое и расчетно-конструкторское значение, соответственно). Указано, как ведет себя комплекс при нагружении (приработке) контактного соединения, а также как его изменение влияет на работоспособность многоэлементных резцов. Блочные (многоэлементные) резцы отличаются от сборных и цельных не только наличием большого числа элементов (30 и более), но и высокими контактными нагрузками, вытекающими из условий их эксплуатации. К особенностям условий эксплуатации относятся большие усилия резания, вибрации (амплитуда и частота колебаний ТОС), износ элементов, низкая жесткость и высокая податливость его контактных соединений.

ВВЕДЕНИЕ

Основная характеристика многоэлементных (блочных) инструментов – возможность продолжительной эксплуатации их режущих и опорных пластин без появления разрушения, которое может вызываться явлениями усталости, что в практических расчетах выражается снижением предела выносливости. В работах [1; 2] поставлена задача повышения прочности многоэлементных резцов, но решения по достижению параметров их элементов в зависимости от выбранных методов обработки не предложены. Авторы работ [3–5] рассматривают достижение оптимальных параметров поверхностного слоя элементов с заданными свойствами, но без учета особенностей эксплуатации резцов блочной конструкции. При этом регламентация только высотных параметров шероховатости их деталей не решает проблему низкой надежности и прочности конструкций [6–8]. К особенностям эксплуатации резцов относятся, например, частая смена блоков, повышенные контактные нагрузки элементов и т. д. [9–11], что указывает на проблему низкой жесткости многоэлементной конструкции, малой долговечности ее деталей.

Цель работы – определение значений параметров поверхностей элементов с заданными свойствами резцов (прочности, жесткости и долговечности), которые повысят их работоспособность.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КОМПЛЕКСА ДОЛГОВЕЧНОСТИ

Влияние разнообразных факторов на предел выносливости деталей $\sigma_{-1Д}$ зависит от коэффициента снижения предела выносливости K_y [12; 13]:

$$\sigma_{-1Д} = K_y \cdot \sigma_{-1(Rz \leq 1)} \Rightarrow K_y = \sigma_{-1(Rz \leq 1)} / \sigma_{-1Д}, \quad (1)$$

где $\sigma_{-1(Rz < 1)}$ и $\sigma_{-1Д}$ – предел выносливости неупрочненно-го (с малой шероховатостью $Rz \leq 1$, в пределе – гладкого) образца и, соответственно, реальных деталей (где присутствует упрочнение поверхностного слоя, связанное с обработкой поверхности, а также длительной эксплуатацией узла (рис. 1));

K_y – коэффициент влияния различных факторов на сопротивление усталости.

При работе поверхности на сжатие или изгиб [12; 13] этот коэффициент (K_y) равен значению выражения

$$K_y = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v K_A}. \quad (2)$$

В случае присутствия касательных напряжений (изгиб пластины с присутствием центра кручения большого радиуса) коэффициент влияния различных

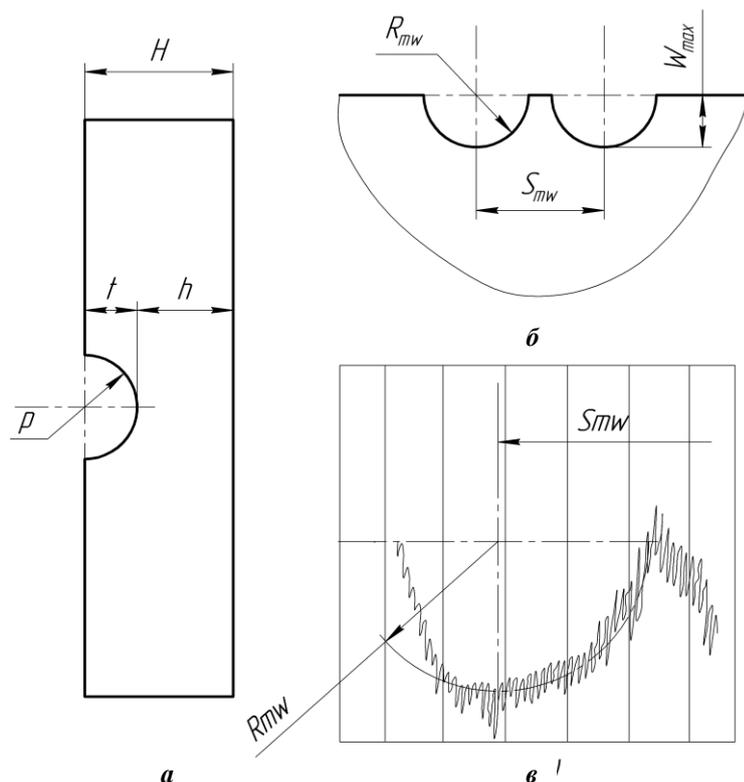


Рис. 1. Определение комплексного параметра долговечности D :
 а – форма опорной пластины режущего элемента, принятой в расчете
 (две неровности расположены на расстоянии S_{mw});
 б – модель концентратора напряжений;

в – профиль реальной поверхности с вписанной в нее окружностью радиусом $R_{mw}=0,02 \cdot S_{mw}^2/W_a$ [14]
 с шагом волнистости S_{mw}

факторов на сопротивление усталости рассчитывается по выражению

$$K_y = \left(\frac{K_\tau}{K_{d\tau}} + \frac{1}{K_{F\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v} = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{0,575 \cdot K_{F\sigma} + 0,425} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v} \quad (3)$$

где $K_{d\tau}=K_{d\sigma}$;
 $K_\sigma=K_\tau$ (при $3\sigma_b=HB$ и при сечении образца $(7,5 \leq d=h \leq 15)$ мм (рис. 1)), $K_{F\tau}=0,575 \cdot K_{F\sigma} + 0,425$; $K_{d\sigma}=0,55$.

Обычно формула (3), применима к деталям реза в узлах базирования и закрепления режущего элемента, где силы резания стремятся создать точку опрокидывания большого радиуса – прижимы, режущие вставки, пластины, винты и т. п., где $K_{d\sigma}$, K_v , K_{Fv} – коэффициенты, учитывающие влияние статического масштабного фактора; отклонения структуры и твердости; качество поверхностного слоя. Коэффициент K_σ – снижение предела выносливости вследствие концентрации напряжений (концентратором напряжений (рис. 1) будет являться неровность при наличии волнистости, рассматриваются две неровности с шагом волнистости S_{mw}); K_A – коэффициент анизотропии.

При изготовлении опорных пластин влияние метода обработки на коэффициенты $K_{d\sigma}$, K_A , K_v при образца

нии поверхности оказывается незначительным. Поэтому значения коэффициентов $K_{d\sigma}$, K_A , K_v можно принять равными единице, а значение коэффициента K_y можно рассчитать по выражению

$$K_y = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v K_A} = K_\sigma + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \quad (4)$$

Для случая присутствия касательных напряжений зависимость (3) принимает вид

$$K_y = \frac{K_\sigma}{0,55} + \frac{1}{0,575 \cdot K_{F\sigma} + 0,425} - 1 \approx 1,82 \cdot \left(K_\sigma + \frac{1}{K_{F\sigma} + 1} - 0,55 \right) = 1,82 \cdot \left(K_\sigma + \frac{1}{(0,75 \div 1,05) + 1} - 0,55 \right) \approx 1,8 \cdot K_\sigma \quad (5)$$

Определение коэффициентов $K_{F\sigma}$, K^l , K_σ произведено в работе [15]. K_σ равен (при $R_{mw}=0,02 \cdot S_{mw}^2/W_a$ и $R_{max}=6/2,6 \cdot (R_p)=2,3 \cdot R_p$):

$$K_{\sigma} = 1 + \left(\gamma \cdot 0,02 \cdot \frac{S_{mw}^2}{W_a} \right)^{0,2} \cdot \left(200 \cdot \frac{1}{t_m S_m} \cdot \sqrt{2R_{\max} (2,3 \cdot R_p - R_p)} \right) = 1 + 196 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m} \quad (6)$$

С целью упрощения вида зависимостей использованы соотношения между параметрами поверхностного слоя [7; 14; 16]. Для режущих пластин при работе на усталость расчет ведется по соотношению $\sigma_T/\sigma_s=0,90$ и для механических методов обработки – $t_m \approx 0,55$; $\rho \approx (2 \div 5)$; $\gamma \approx (0,3 \div 0,5) = 0,35$; $K' \approx (1,1 \div 1,3)$ [12]. Подставив значения $K_{F\sigma} = 1 - 0,75K' = 1 - 0,75 \cdot (1,0 \div 1,4)$ [15], (6) в (4), получим выражение

$$K_y = K_{\sigma} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 = 1 + 196 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m} + \frac{1}{1 - 0,75K'} - 1 \approx 196 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m} = 1142 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \quad (7)$$

В случае присутствия касательных напряжений после подстановки $K_{F\sigma}$ [15] и (6) в (5) выражение для K_y принимает вид

$$K_y = 1,8 \cdot \left[1 + 196 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m} \right] = 1,8 \cdot \left[1 + 1140 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \right] \approx 1 + 0,8 + 2054 \cdot \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \quad (8)$$

Подставив выражение (7) в формулу (1) и решив его так, чтобы в правой части оказались параметры, зависящие от условий обработки пластин, а в левой части – параметры, не влияющие на величины, формируемые при обработке (или влияющие незначительно), определим выражение

$$0,001 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) = \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \quad (9)$$

Аналогично для касательных напряжений ($R_{\max} = 6 \cdot R_a$, $R_p = 2,6 \cdot R_a$) при подстановке (8) в (1) получим формулу (9).

Выражения комплексов (9), в случае присутствия нормальных и касательных напряжений на поверхности пластины имеют близкие значения. Это свидетельствует о том, что принятые в расчете допущения равнозначности (σ и τ) обеспечивают долговечность. Таким образом, обозначим правую часть выражения (9) как комплексный параметр D_T (технологическое значение), характеризующий снижение порога усталости, в зависимости от состояния подготовки поверхностного слоя опорных пластин (механическими методами обработки):

$$D = D_T = \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \quad (10)$$

Левую часть соотношения (9) обозначим D_K (расчетно-конструкторское значение параметра, не участвующее в его формировании при изготовлении):

$$[D] = D_K = 0,001 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) \quad (11)$$

Учитывая (10) и (11), выражение (1) можно переписать в виде $D \leq [D]$:

$$D = \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} \leq [D] = 0,001 \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) \quad (12)$$

При подготовке поверхностного слоя контактных соединений многоэлементных резцов, чтобы повысить их работоспособность (например, безотказность работы), традиционно регламентируется шероховатость по R_a и величина волнистости W_a . Но, в отличие от принятых в технологическом обеспечении свойства усталостной прочности, хоть и в меньшей степени, чем указанные выше, оказывают влияние шаговые (S_{mw}) и высотные параметры (W_a) волнистости. Таким образом, представленные выражения (9) и (12) соответствуют общепринятым положениям [8; 14]: на свойство долговечности оказывают доминирующее влияние параметры шероховатости ($R_{\max} = 6 \cdot R_a$) и шаг неровности (S_m) [13; 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ПРОВЕРКА

Следует проверить, как величина комплекса D изменяется после приработки контактного соединения при приложении нагрузки (250 ÷ 750) кгс [15; 17]. Для этого необходимо рассмотреть изменение шага неровностей вдоль средней линии S_m после нагружения (S_m^I). При этом считаем, что высотные характеристики профиля малы, присутствуют масляные карманы в виде двух неровностей с шагом S_m при обязательном наличии волнистости на поверхности (доминирующее влияние на заданное свойство) (см. рис. 1). После приложения нагрузки шаг неровностей определяется по формуле [17]:

$$S_m^I = 2S_m \frac{t_m}{t_m^I} \left[1 - \frac{t_m}{100} \left(\frac{R_{\max} - Y_{nl} - R_p^I}{R_{\max} - R_p} \right)^{\frac{50R_s - t_m R_a}{50R_a}} \right] \quad (13)$$

Для упрощения выражения (13) подставим в него $Y_{nl}=(0,3\div 0,9)\cdot R_p$, $t_m=t_m^l\approx 0,55$, $R_{max}=6\cdot R_a$, $R_p=2,6\cdot R_a$ [12–14; 16], выразим именно R_{max} (как и S_m), так как этот параметр оказывает доминирующее влияние на долговечность поверхностей (t_m не оказывает никакого влияния [14]). Получаем

$$S_m^l = 2S_m \times \left[1 - 0,0055 \left(\frac{R_{max} - 0,387 \cdot R_{max} - 0,43 \cdot R_{max}}{R_{max} - 0,43 \cdot R_{max}} \right)^{\frac{485}{\sqrt{R_{max}}}} \right] \approx 2S_m \quad (14)$$

Так как $R_{max}^l = R_{max} - Y_{nl}$, а $Y_{nl} = 0,9 \cdot R_p = 0,9 \cdot 2,6 \cdot (1/6) \cdot R_{max}$, то $R_{max}^l = 0,61 \cdot R_{max}$, то, подставляя полученные выражения для R_{max}^l и S_m^l (14) в формулу комплекса долговечности D (10), получаем (считая, что $S_{mw} = S_{mw}^l$ и $W_a = W_a^l$):

$$D^l = \frac{(S_{mw}^l)^{0,4} \cdot R_{max}^l}{3 \cdot 0,61 \cdot (W_a^l)^{0,2} \cdot S_m^l} \approx 0,55 \cdot \frac{(S_{mw}^l)^{0,4} \cdot R_{max}^l}{(W_a^l)^{0,2} \cdot S_m^l} \quad (15)$$

Таким образом, выражения (9), (10) и (12) хорошо согласуются с заключениями по результатам обработки эксперимента [15; 17], где после приложения нагрузки в среднем величина комплекса D отличается от того, который был до нагружения, но не более чем на (40÷50) % (см. выражение (15)). Следовательно, это позволяет говорить о том, что теоретические расчеты по поведению данного комплекса достаточно достоверны. Тогда при замене в регламентации опорных и режущих пластин профильных параметров на комплекс D происходит снижение количества поломок режущего элемента, что представлено на рис. 2 [9; 18].

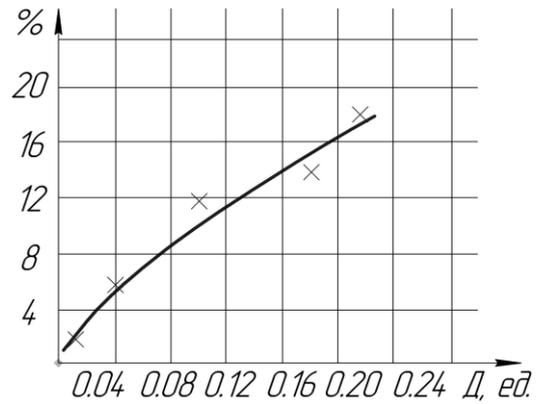


Рис. 2. Зависимость интенсивности поломок пластины режущего инструмента от изменения комплекса долговечности D (Резец сечением 25×40 мм, с пластиной из Т15К6, обрабатываемый материал – Сталь 3, по корке; $D=960$ мм; $t=5$ мм; $S=0,8$ мм/об; $\varphi=45$ градусов; $V=151$ м/мин)

Установлено [18; 19], что метод обработки на финишном этапе, а также последовательность методов обработки поверхности оказывают основное влияние на долговечность (см. рис. 3 и рис. 4).

На рис. 3 и рис. 4 показана зависимость комплекса D от параметров поверхностного слоя, формируемых при изготовлении, входящих в выражения (9), (10) и (12). По результатам анализа этих выражений видно, что технологически обеспечить долговечность позволяет тот метод обработки, область которого на рис. 3 и рис. 4 находится наиболее близко к осям R_a и S_{mw} (регламентируемого параметра профиля продольного сечения) [18–20].

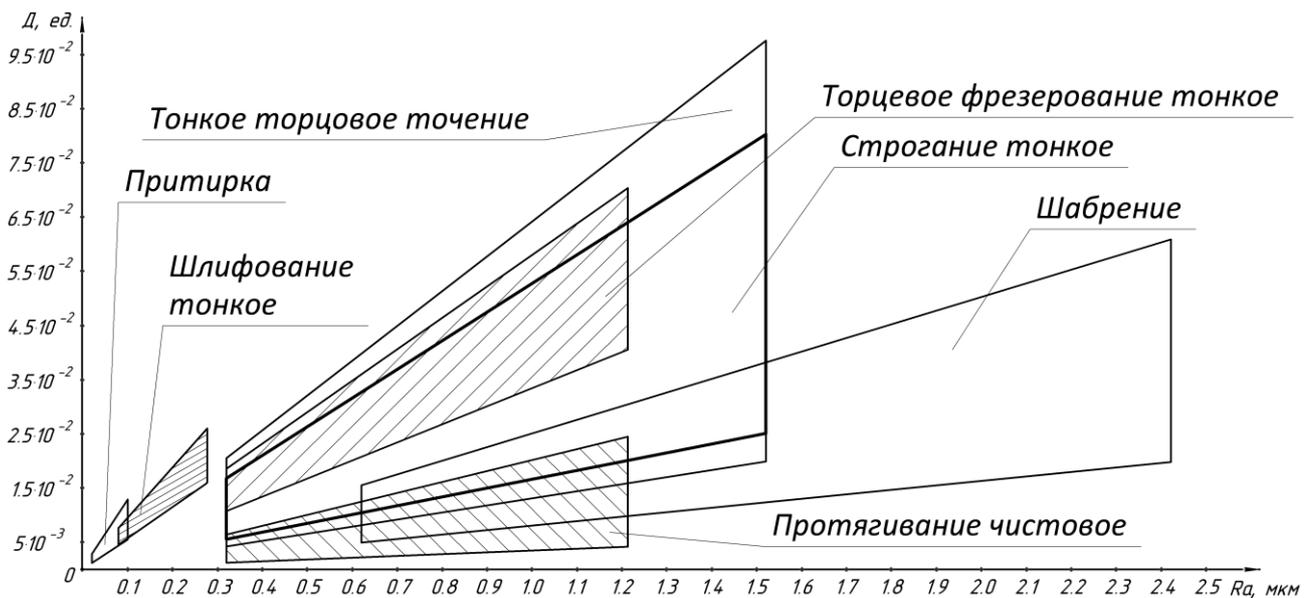


Рис. 3. Схема областей, достижимых методом обработки комплекса D при обработке плоских поверхностей (регламентируемый параметр профиля – R_a)

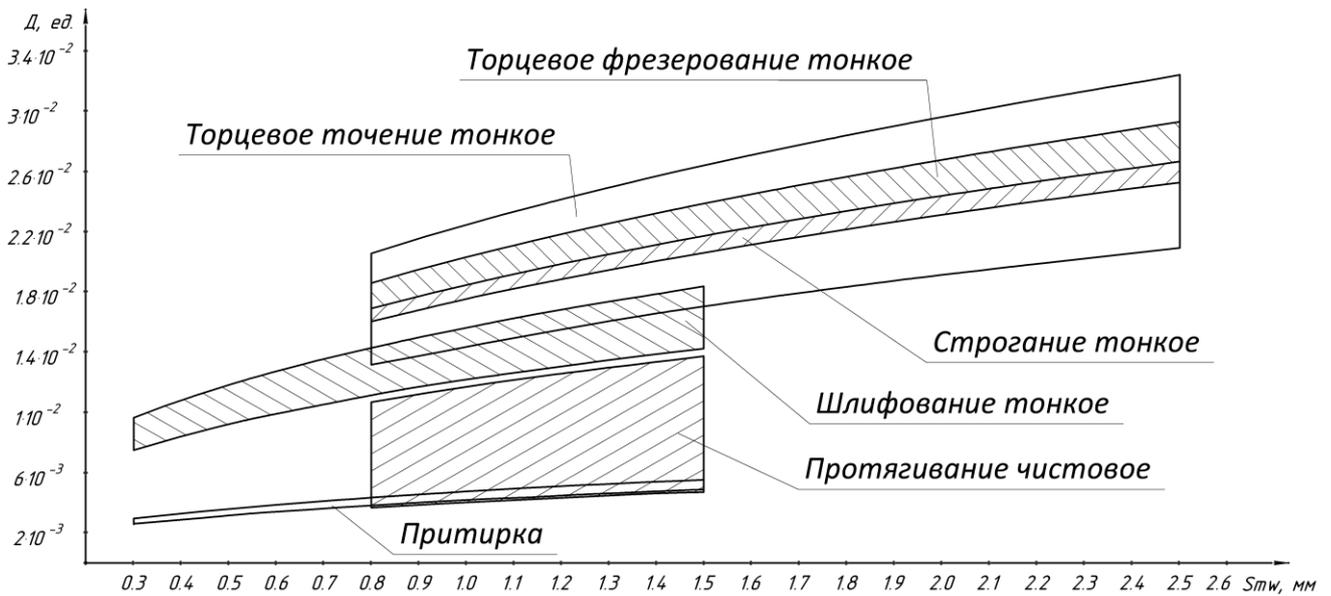


Рис. 4. Схема областей, достижимых методом обработки комплекса D при обработке плоских поверхностей (регламентируемый параметр профиля – S_{mw})

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Комплекс долговечности D решает задачу повышения усталостной прочности таких соединений, где неровности рассматриваются как концентраторы напряжений, расположенные на расстоянии шага волнистости S_{mw} . Закладывание эксплуатационного свойства долговечности со снижением предела выносливости поверхности K_y в контактные соединения блочных резцов позволяет повысить их работоспособность. Это дает возможность увеличить максимальную разрушающую подачу на 60 %, виброустойчивость (снизить среднюю амплитуду колебаний и повысить их частоту) – на 20 %, уменьшить смещение вершины режущей кромки резца на (40÷80) %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovalov V., Vasilchenko Y., Dasic P. Development of the integral complex of optimal control of heavy machine tools adaptive technological system for wind-power engineering parts // International Conference on Interdisciplinarity in Engineering. 2015. Vol. 19. P. 145–152.
2. Kovalov V., Guzenko V., Polupan I. Research of the construction parameters in elements of fastening of tip on the durability of split cup-tip tool // International Quality Conference: Conference manual. Kraguevac: University of Kraguevac, 2015. P. 94–98.
3. Федонин О.Н., Киричек А.В., Петрушин Д.И. Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 4. С. 43–48.
4. Комбалов В.С. Решение некоторых задач оптимизации трения и износа поверхностей деталей машин // Вестник машиностроения. 2002. № 8. С. 18–19.
5. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.
6. Безъязычный В.Ф., Сутягин А.Н., Непомилуев В.В., Семенов А.Н. Повышение износостойкости деталей

машин технологическими методами // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 66–70.

7. Суслов А.Г. Развитие учения о контактной жесткости и инженерии поверхности деталей машин // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 11. С. 12–17.
8. Суслов А.Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 10. С. 3–13.
9. Кравцов Н.В., Овчаренко В.А., Скибин В.В. Изменения положения режущего элемента, вызванные контактными перемещениями при эксплуатации сборных инструментов // Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик режущих инструментов. М.: ВНИИТЭМР, 1988. С. 5–7.
10. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Теория автоматического управления технологическими системами. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 349 с.
11. Зотов А.В., Драчев О.И., Расторгуев Д.А. Относительная износостойкость пар смешанного трения скольжения, плакированных гибким инструментом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 8. С. 12–17.
12. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 447 с.
13. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
14. Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
15. Кравцов Н.В., Кравцов А.Н. Комплексные параметры состояния поверхностей деталей блочно-

- модульных токарных резцов // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. 2012. № 3. С. 162–166.
16. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
 17. Суслов А.Г., Кравцов Н.В., Кельнер А.А. Изменение параметров шероховатости при контактировании гладкой и шероховатой поверхности // Технологическое обеспечение функциональных параметров качества поверхностного слоя деталей машин: сборник научных трудов. Брянск: БИТМа, 1987. С. 42–52.
 18. Кравцов А.Н. Моделирование технологического обеспечения производственно-технических характеристик блочно-модульных инструментов с элементами диагностики и контроля на основе системной оптимизации. Ирбит: ОНИКС, 2015. 300 с.
 19. Кравцов А.Н. Повышение работоспособности блочно-модельных резцов для тяжелых токарных станков // Технология машиностроения и материаловедение: сборник материалов Международной научно-практической конференции. Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. № 3. С. 23–26.
 20. Кравцов А.Н. Комплексный параметр равномерного износа часто сменяемых деталей блочно-модульных резцов // Инновационные технологии в металлообработке: посвящается 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д. т. н., профессора Л.В. Худобина: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической заочной конференции с международным участием. Ульяновск: УЛГТУ, 2019. С. 355–360.
- REFERENCES**
1. Kovalov V., Vasilchenko Y., Dasic P. Development of the integral complex of optimal control of heavy machine tools adaptive technological system for wind-power engineering parts. *International Conference on Interdisciplinarity in Engineering*, 2015, vol. 19, pp. 145–152.
 2. Kovalov V., Guzenko V., Polupan I. Research of the construction parameters in elements of fastening of tip on the durability of split cup-tip tool. *International Quality Conference: Conference manual*. Kraguevac, University of Kraguevac Publ., 2015, pp. 94–98.
 3. Fedonin O.N., Kirichek A.V., Petreshin D.I. Technological increase of machinery operation properties. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 4, pp. 43–48.
 4. Kombalov V.S. The solution of some problems of optimization of friction and wear of surfaces of machine parts. *Vestnik mashinostroeniya*, 2002, no. 8, pp. 18–19.
 5. Kombalov V.S. *Vliyanie sherokhovatosti tverdykh tel na trenie i iznos* [The effect of roughness on friction and wear]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 112 p.
 6. Bezyazychnyy V.F., Sutyagin A.N., Nepomiluev V.V., Semenov A.N. Increase of wear resistance of machine parts by technological methods. *Vestnik mashinostroeniya*, 2017, no. 6, pp. 66–70.
 7. Suslov A.G. Development of doctrine on contact stiffness and engineering of machinery surface. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 11, pp. 12–17.
 8. Suslov A.G., Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Complex approach to experimental investigations of metal-working technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2018, no. 10, pp. 3–13.
 9. Kravtsov N.V., Ovcharenko V.A., Skibin V.V. Changes in the position of the cutting element caused by contact movements during the operation of assembly tools. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik rezhushchikh instrumentov*. Moscow, VNIITEMR Publ., 1988, pp. 5–7.
 10. Petrakov Yu.V., Drachev O.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi sistemami* [Theory of automatic control of technological systems]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2016. 349 p.
 11. Zotov A.V., Drachev O.I., Rastorguev D.A. Relative wear resistance of pairs of mixed sliding friction clad with flexible tools. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 8, pp. 12–17.
 12. Suslov A.G., ed. *Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soedineniy* [Technological support and improving the performance properties of parts and their compounds]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 447 p.
 13. Suslov A.G. *Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley* [Technological support of the state parameters of the surface layer of parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 208 p.
 14. Suslov A.G., ed. *Inzheneriya poverkhnosti detaley* [Part Surface Engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p.
 15. Kravtsov N.V., Kravtsov A.N. Complex parameters of the state of surfaces of parts of block-modular turning tools. *Omskiy nauchnyy vestnik. Seriya: Pribory, mashiny i tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 162–166.
 16. Kragelskiy I.V., Mikhin N.M. *Uzly treniya mashin: spravochnik* [Friction knots machines: a handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 280 p.
 17. Suslov A.G., Kravtsov N.V., Kelner A.A. Change of roughness parameters when contacting a smooth and rough surface. *Tekhnologicheskoe obespechenie funktsionalnykh parametrov kachestva poverkhnostnogo sloya detaley mashin: sbornik nauchnykh trudov*. Bryansk, BITMa Publ., 1987, pp. 42–52.
 18. Kravtsov A.N. *Modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniya proizvodstvenno-tekhnicheskikh kharakteristik blochno-modulnykh instrumentov s elementami diagnostiki i kontrolya na osnove sistemnoy optimizatsii* [Modeling technological support of production and technical characteristics of block-modular tools with elements of diagnostics and control based on system optimization]. Irbit, ONIKS Publ., 2015. 300 p.
 19. Kravtsov A.N. Improving the performance of block-model cutters for heavy lathes. *Tekhnologiya mashinostroeniya i materialovedenie: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Novokuznetsk, NITs MS Publ., 2019, no. 3, pp. 23–26.
 20. Kravtsov A.N. Complex parameter of uniform wear of frequently replaced parts of block-modular cutters.

Innovatsionnye tekhnologii v metalloobrabotke: posvyashchaetsya 90-letiyu Zasluzhennogo deyatelya nauki i tekhniki RSFSR, d. t. n., professora L.V. Khudobina: sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-

prakticheskoy zaachnoy konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2019, pp. 355–360.

COMPLEX PARAMETER OF DURABILITY OF SUPPORT PLATES OF CUTTING ELEMENTS OF BLOCK-MODULAR CUTTERS

© 2019

A.N. Kravtsov, engineer
Research and Production Company "ONIKS", Irbit (Russia)

Keywords: operational characteristics; surface layer; durability; complex parameter; block cutters.

Abstract: The author considered the issues of working capacity improvement of multi-element cutting tools (in terms of such operational characteristics as, for example, the intensity of breakdowns of cutting element and its support plates, etc.) by changing the regulation of status parameters of a surface layer of their parts. The weakness and low reliability of cutters prove the necessity in the elements with the defined properties within the cutting tools structure.

The shape of the cutting element supporting surface influences the specified properties of cutting tool parts. The author considered the shape of a profile of cutting element supporting surface in the form of two irregularities located at a distance of waviness step (in the form of oil pockets). The profile shape is considered as a stress concentrator.

According to the decrease in the concentrator durability period, the study determined which parameters influence the durability. Cutting element reacts to the cutting force load and transmits it to other parts of a cutting tool through its base and fastening nodes.

The author calculated the surface status complex which includes the achievement of life duration with the dominating influence of height and step roughness and waviness parameters. The calculation is carried out in the base and fastening nodes of a cutting element. In the base nodes, normal stresses dominate on the surface; in the fastening nodes, tangential stresses prevail. It is shown that normal and tangential stresses are equal.

The author determined the complex value dependent and independent of the surface treatment conditions (process value and calculated-engineering value respectively). The study indicates how the complex behaves under the loading (breaking-in) of a contact joint as well as how its change influences the working capacity of the multi-element cutter. Block (multi-element) cutters differ from the modular and one-piece cutting tools both by the presence of a large number of elements (30 and more) and by the high contact stresses resulting from their operational conditions. High cutting forces, vibrations (amplitude and vibration frequency of the technological system), wear of elements, low toughness and high suppleness of contact joints are the peculiarities of operational conditions.

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ПРОКОВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

© 2019

Е.А. Кузьмина, аспирант

Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

Е.Ю. Приймак, кандидат технических наук,

заведующий лабораторией металловедения и термической обработки,

доцент кафедры материаловедения и технологии материалов

ОАО «Завод бурового оборудования», Оренбург (Россия)

Оренбургский государственный университет, Оренбург (Россия)

Ключевые слова: ротационная сварка трением (РСТ); сила проковки; зона термомеханического влияния (ЗТМВ); микроструктура; микротвердость; механические свойства; 32Г2; 40ХН.

Аннотация: Возросший интерес к процессу сварки трением связан с широким распространением данной технологии на предприятиях машиностроения ввиду технологических преимуществ данного способа и высокого качества получаемых сварных соединений из одноименных и разноименных металлов и сплавов. Ротационная сварка трением (РСТ) является одной из разновидностей сварки, использующих нагрев трением, и применяется для деталей, имеющих форму цилиндра или труб. Основными технологическими параметрами процесса РСТ являются усилие при разогреве, усилие проковки, частота вращения при разогреве, длина оплавления. Все параметры связаны между собой и оказывают влияние на процесс формирования и свойства сварного соединения.

В работе исследуется влияние усилия проковки на микротвердость, свойства при растяжении и микроструктуру сварных соединений из сталей 32Г2 и 40ХН. Проанализированы фазовые превращения, происходящие в свариваемых материалах в результате термомеханического воздействия. Показано изменение протяженности зоны термомеханического влияния (ЗТМВ) в зависимости от усилия проковки. Получены результаты распределения микротвердости по сварному шву, иллюстрирующие образование упрочненных и разупрочненных участков. Приведены результаты испытаний сварных соединений на растяжение и ударную вязкость. Показаны морфологические особенности разрушения сварного стыка после испытаний на ударный изгиб.

Установлено, что сила проковки влияет на микроструктурные характеристики, протяженность зоны термомеханического влияния привариваемых материалов, механические свойства и фрактографические особенности сварного стыка при испытании на ударный изгиб. Даны рекомендации по определению оптимальных значений силы проковки.

ВВЕДЕНИЕ

Сварка трением является одной из наиболее прогрессивных технологий получения неразъемных соединений металлов и находит все более широкое применение в различных производствах. К настоящему моменту реализовано более 20 технологических решений процесса сварки, использующих нагрев трением. Наиболее распространенными из таких решений являются сварка трением с перемешиванием [1–3], линейная сварка трением [4–6], ротационная сварка трением (РСТ) [7; 8].

В отечественной научной литературе основные исследования процесса РСТ, направленные на внедрение ее в промышленное производство, относятся к 60–70-м гг. XX в. и изложены в работах [8; 9]. В них представлен накопленный эмпирический опыт по промышленному применению, оборудованию и режимам сварки, которые преимущественно подбирались, исходя из результатов определения механических свойств сварных соединений или средств неразрушающего контроля. К сожалению, более современных отечественных исследований получаемых подобным образом сварных соединений в научных публикациях не представлено. Однако применение данной технологии на передовых отечественных машиностроительных предприятиях, в том числе для производства геологоразведочных и нефтяных буровых труб из среднеуглеродистых сталей [10], указывает на потребность в более глубоком понимании процесса ротационной сварки.

В зарубежной научной литературе опубликованы данные по исследованию сварных соединений, выполненных способом ротационной сварки трением, из различных материалов. В работах [12–14] исследованы механические свойства и структура фрикционных сварных швов из быстрорежущих, среднеуглеродистых и нержавеющей сталей. В работе [15] изучали влияние скорости вращения и давления проковки на механические свойства и структуру поверхности раздела сварного шва нержавеющей стали AISI 304L со среднеуглеродистой легированной сталью AISI 4340. Авторы [16] сосредоточили свое внимание на анализе влияния параметров процесса на твердость сварных соединений из высокоуглеродистой стали. В работах [17; 18] предпринята попытка построить статистическую модель влияния содержания углерода в стали, скорости вращения и давления проковки на механические свойства получаемых сварных соединений. Несмотря на это, публикаций, отражающих влияние технологических режимов ротационной сварки на структуру и свойства сварных соединений из среднеуглеродистых сталей, в научной литературе не представлено.

Процесс сварки трением осуществляется в несколько стадий. Свариваемые заготовки устанавливаются в стационарный зажим (рис. 1 а), одной из них сообщается вращательное движение, заготовки сближаются, и осуществляется притирка приконтактных поверхностей (рис. 1 б). Далее прикладывается усилие трения, при котором заготовки нагреваются до температуры,

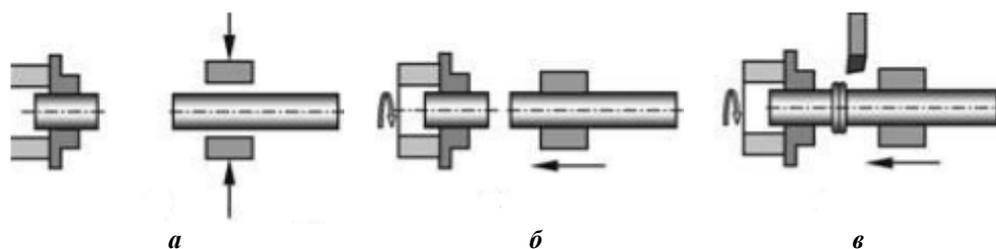


Рис. 1. Стадии процесса PCT

a – установка заготовок в стационарный зажим;
б – притирка приконтактных поверхностей заготовок; *в* – нагрев заготовок

необходимой для образования сварного соединения (рис. 1 в). После этого вращение быстро прекращают, и к заготовкам прикладывают осевую силу проковки. Затем осуществляется точение сварочного грата, который представляет собой избыточный металл, выдвинутый при сварке. Прочность образующегося соединения определяется свойствами металла соединяемых заготовок, степенью пластического деформирования их концов при нагреве и режимом проковки.

Цель исследования – установление влияния усилия проковки на особенности формирования структуры и свойств сварных соединений среднеуглеродистых сталей 32Г2 и 40ХН.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав привариваемых материалов представлен в таблице 1. Обе стали предварительно были

подвергнуты объемной термической обработке по режиму закалки и высокого отпуска с получением уровня механических свойств, указанных в таблице 2.

Сварка трением трубных заготовок диаметром 63,5 мм и толщиной стенки 4,5 мм из исследуемых сталей с целью изготовления экспериментальных образцов осуществлялась на автоматизированной машине для сварки трением “Thompson-60” по режимам, представленным в таблице 3.

Из сварных соединений изготавливались продольные образцы для металлографического анализа. Исследование структуры проводили с использованием оптического микроскопа Nikon ECLEPSEMA 10. Твердость измеряли на приборе HVS-1000 при нагрузке 2 Н [18]. Испытания на ударный изгиб осуществляли на маятниковом копре “WANCE PIT 452 C2” на образцах 4×10×55 с V-образным надрезом согласно ГОСТ 9454-78, надрез

Таблица 1. Химический состав исследуемых сталей (в % по масс.)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	S	P	Mo	Ni	Cu
32Г2	0,32	0,17	1,48	0,07	0,003	0,007	0,02	0,11	0,13
40ХН	0,35	0,25	0,56	0,53	0,006	0,005	0,01	1,05	0,19

Таблица 2. Механические свойства исследуемых сталей в состоянии перед сваркой

Марка стали	HRC	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
32Г2	25,3–27,1	769–814	829–954	13,4–15,8
40ХН	27,1–30,2	788–816	948–962	13,1–14,5

Таблица 3. Режимы сварки

№ режима	Сила разогрева F_1 , кН	Время разогрева* τ , с	Осадка нагрева l_n , мм	Сила проковки F_2 , кН	Суммарная величина осадки l , мм	Частота вращения при разогреве n , об/мин.
1	50	5–6	8 мм	70	8,9	800
2				100	9,9	
3				130	11,4	
4				160	13,8	

*время разогрева фиксировалось автоматически и считывалось с компьютерного интерфейса машины

наносился непосредственно в стыке сварного соединения в радиальном направлении [19]. Испытания на статическое растяжение осуществляли на разрывной машине Р-50 в соответствии с ГОСТ 6996-66 на образцах с шириной рабочей части 20 мм и начальной расчетной длиной 50 мм [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена типичная макро- и микроструктура поперечного сечения сварного соединения исследуемых сталей.

В зоне термомеханического влияния (ЗТМВ) можно выделить три характерных участка:

– участок воздействия деформаций и температур, превышающих критическую точку A_{C3} (зона 1);

– участок воздействия деформаций и температур в интервале от A_{C1} до A_{C3} (зона 2);

– участок рекристаллизации, где температура была близка к A_{C1} (зона 3).

На рис. 3 и рис. 4 представлены фотографии микроструктур, позволяющие детально рассмотреть структурные составляющие каждой из зон. В областях, примыкающих к сварному стыку зоны 1, можно наблюдать образование преимущественно бейнитной структуры со стороны стали 32Г2 (рис. 3 а) и игольчатой мартенситной структуры с участками нижнего бейнита со стороны стали 40ХН (рис. 4 а). Образование закалочных структур в ЗТМВ обеих сталей связано с их локальным разогревом до температур выше температуры их полиморфного превращения и дальнейшим ускоренным охлаждением за счет реализации

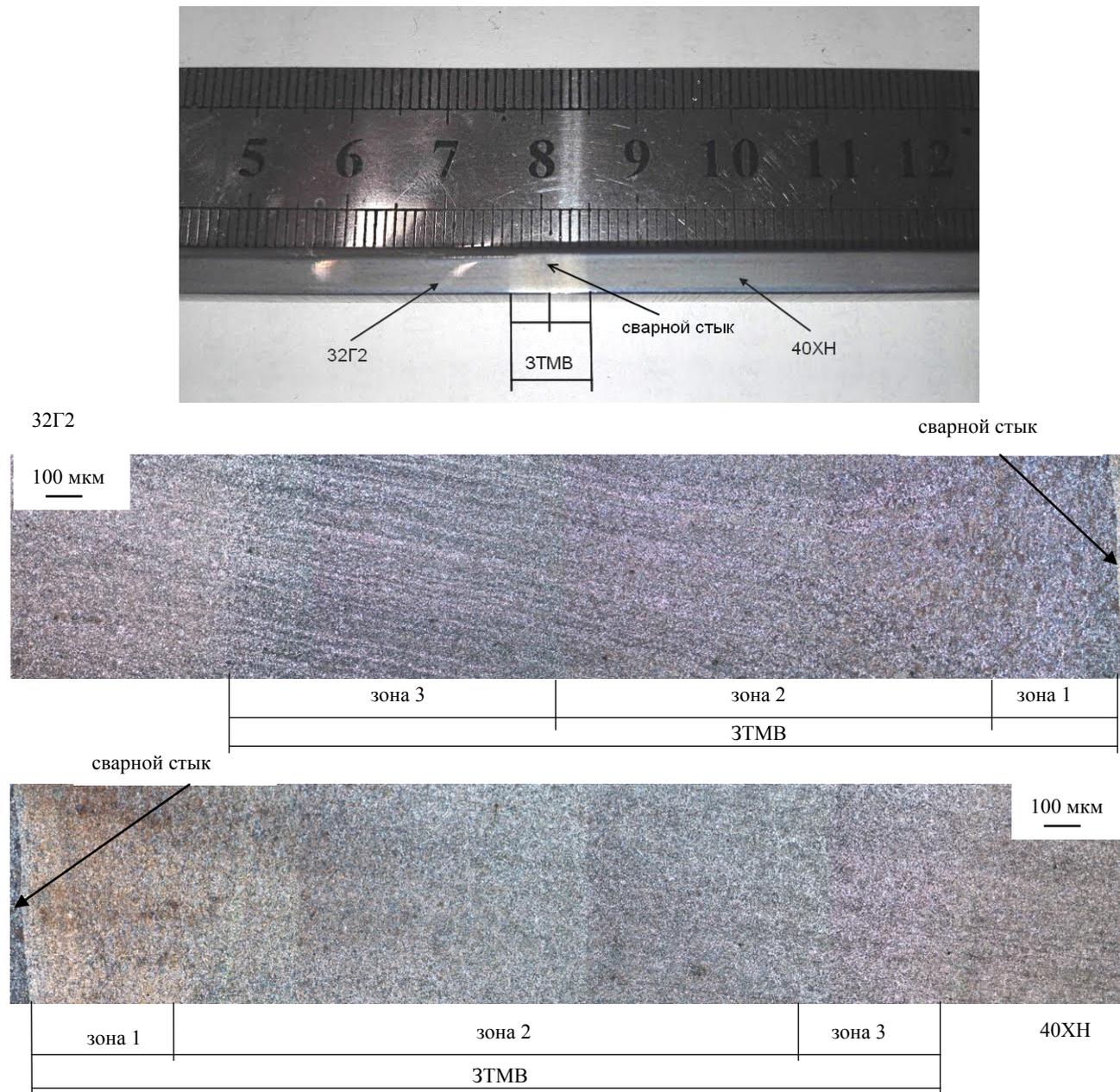


Рис. 2. Типичная макро- и микроструктура сварного соединения, полученного ротационной сваркой трением ($F_1=50кН$, $F_2=160 кН$)

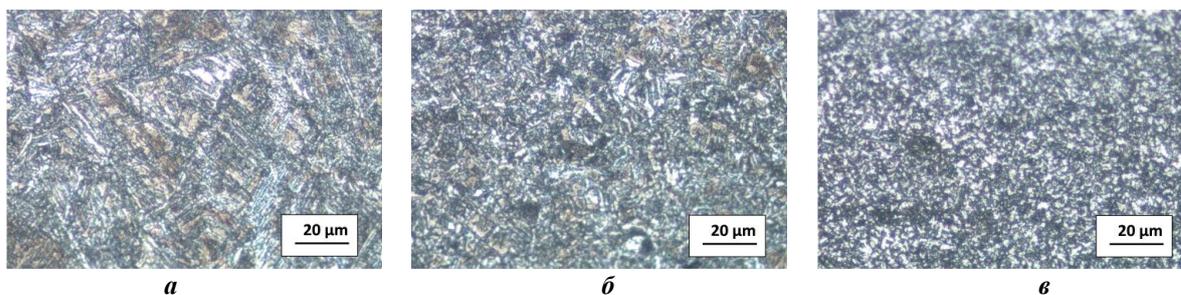


Рис. 3. Типичная микроструктура ЗТМВ стали 32Г2 ($F_1=50$ кН, $F_2=100$ кН):
а – зона 1; б – зона 2; в – зона 3

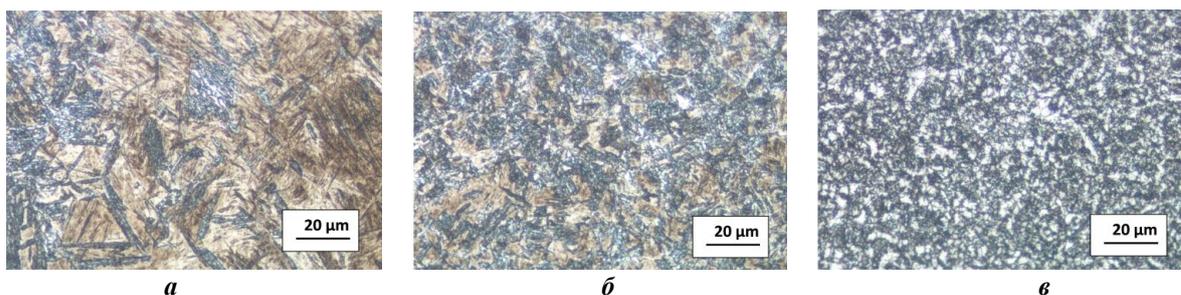


Рис. 4. Типичная микроструктура ЗТМВ стали 40ХН ($F_1=50$ кН, $F_2=100$ кН):
а – зона 1; б – зона 2; в – зона 3

быстрого теплообмена между узкой, нагретой в процессе трения зоной и прилегающими областями металла с комнатной температурой. Таким образом, фазовые превращения в данной зоне происходили в твердом состоянии. Следует отметить, что в ЗТМВ распределение зерна по размеру и геометрии имеет сложный характер: наряду с крупными зернами образуются и более мелкие. Деформация материала ориентирована параллельно сварному стыку.

При удалении от сварного стыка микроструктура претерпевает изменения. В зоне 2 обеих сталей она представляет собой слоистое строение и состоит из чередующихся полос закалочной структуры и мелкодисперсной феррито-цементитной смеси, плавно меняющих направление от параллельного сварному стыку к перпендикулярному ему (рис. 3 б, рис. 4 б). Также можно отметить, что размер зерен здесь значительно меньше, чем в зоне 1.

Зона 3 (рис. 3 в, рис. 4 в) характеризуется образованием равноосных мелких зерен феррита и перлита, что свидетельствует об интенсивном развитии рекристаллизационных процессов. Микроструктура мелкая, равномерная.

Исследования показали, что сила проковки оказывает влияние на протяженность зоны термомеханического влияния со стороны привариваемых материалов (таблица 4).

Из таблицы 3 видно, что изменение силы проковки в диапазоне от 70 до 160 кН приводит к сокращению ЗТМВ от 4,5 до 2,5 мм в стали 32Г2 и от 4,5 до 2,7 мм в стали 40ХН, т. е. при увеличении силы проковки в грат выдавливается большая часть разогретого материала, что и приводит к сокращению протяженности ЗТМВ. Рассмотрим, как при этом изменяется структура в областях, примыкающих к линии контакта (рис. 5).

Данные металлографических исследований показывают, что зона соединения представляет собой ориентированную в плоскости контакта границу. В некоторых участках линии контакта видно образование общих зерен. Это позволяет считать, что при ротационной сварке взаимодействие в зоне соединения на некоторых участках не ограничивается образованием межатомных связей, а происходит взаимная объемная рекристаллизация.

При наименьшем значении силы проковки $F_2=70$ кН вблизи линии контакта характерно образование грубоигольчатой структуры в обеих сталях (рис. 5 а). В стали 40ХН образовалась микроструктура мартенсита с локализованными участками нижнего бейнита. Размер образующихся игл мартенсита находится в диапазоне от 10 до 60 мкм. Со стороны стали 32Г2 структура соответствует верхнему бейниту и представляет собой

Таблица 4. Протяженность зоны термомеханического влияния при изменении параметра давления проковки при сварке сталей 32Г2 и 40ХН

F_2 , кН	70		100		130		160	
	32Г2	40ХН	32Г2	40ХН	32Г2	40ХН	32Г2	40ХН
Общая протяженность ЗТМВ, мм	4,5	4,5	3,9	4,15	3,2	3,3	2,5	2,7

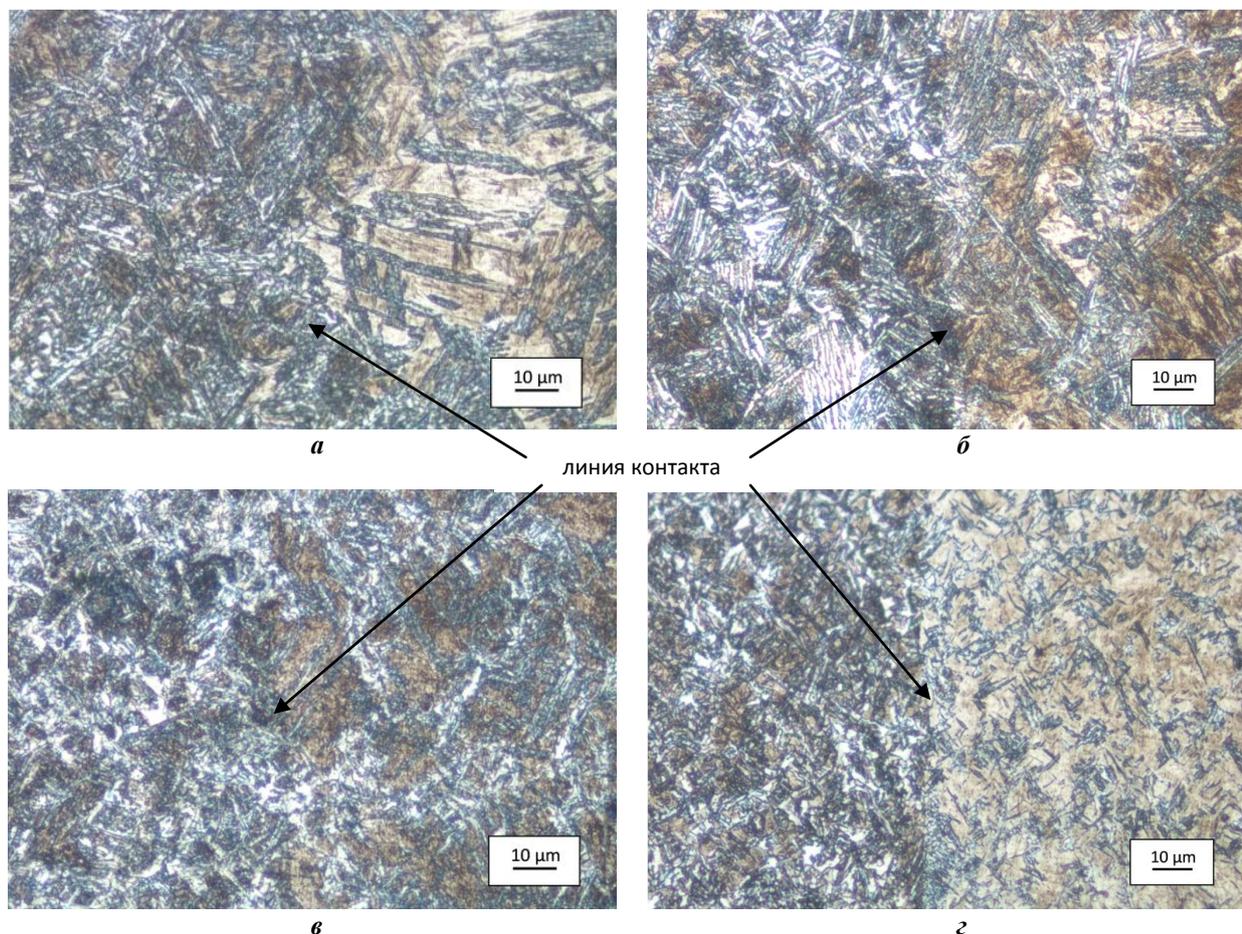


Рис. 5. Микроструктура сварного стыка сталей 32Г2-40ХН при различных значениях усилия проковки:
а – $F_2=70$ кН; **б** – $F_2=100$ кН; **в** – $F_2=130$ кН; **г** – $F_2=160$ кН

иглообразные пластины феррита размером от 10 до 35 мкм с цементитными выделениями удлиненной формы.

Увеличение силы проковки приводит к уменьшению размеров зерен в приконтактной поверхности привариваемых материалов, так как в этом случае в контакт вступают слои металла, разогретые в процессе трения до меньших температур (рис. 5 б, 5 в, 5 г). В связи с этим в зоне схватывания оказываются слои металла с меньшим размером зерна. Так, при усилнии проковки $F_2=160$ кН размер зерна в стали 40ХН находится в диапазоне от 7 до 15 мкм, а в стали 32Г2 – от 5 до 10 мкм (рис. 5 г).

Рассмотрим характер изменения микротвердости по протяженности ЗТМВ (рис. 6) с изменением силы проковки.

Полученные результаты свидетельствуют, что характер изменения микротвердости по протяженности ЗТМВ соответствует структурным изменениям, вызванным термодформационным влиянием сварочного процесса. Видно, что в процессе сварки в ЗТМВ произошло образование как упрочненных, так и разупрочненных участков по отношению к основному металлу привариваемых материалов. Наличие мартенситной фазы со стороны стали 40ХН объясняет высокую твердость в зоне 1, близлежащей к линии контакта. При удалении от линии контакта значения микротвердости плавно

снижаются, достигая минимума в зоне развития рекристаллизации. Характер изменения твердости со стороны стали 32Г2 аналогичен, однако уровень значений во всех зонах несколько ниже, чем у стали 40ХН.

Образование физического контакта и прочности связей между свариваемыми материалами проследим на основе исследования поверхности разрушения сварных соединений после испытаний на ударный изгиб при нанесении концентратора напряжений непосредственно в стыке (рис. 7), а также механических испытаний сварных соединений на разрыв с фиксированием нагрузки и места разрушения образцов относительно линии контакта (таблица 5).

Анализ полученных фрактограмм показывает, что в тех участках, где произошло схватывание приконтактных поверхностей с образованием металлических связей, поверхность разрушения образована фасетками транскристаллитного скола и квазискола и микротрещинами, распространяющимися вглубь. Размер фасеток зависит от размера зерна закалочных структур, образованных в приконтактной зоне. Помимо этого, при более низких значениях усилия проковки от 70 до 100 кН в изломе отмечается наличие участков «несхватывания», имеющих микрорельеф относительно крупных ямок, на дне которых в ряде случаев залегают частицы окислов, образовавшихся при окислении разогретого металла на воздухе и не удалившихся в грат на этапе проковки (рис. 7 а, 7 б).

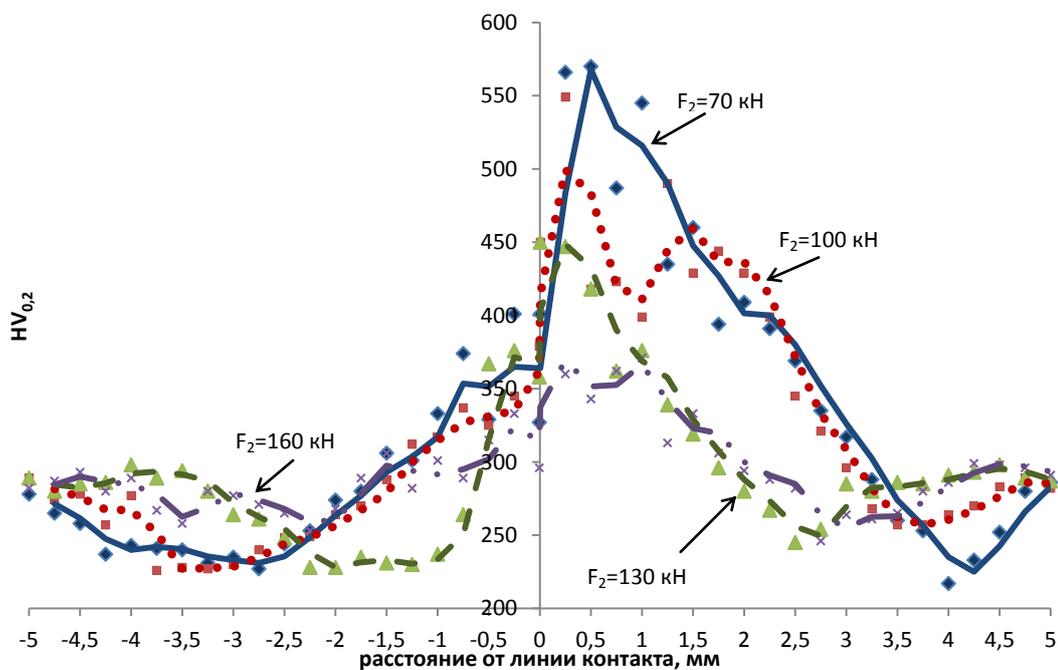


Рис. 6. Изменение микротвердости по протяженности ЗТМВ сварного соединения сталей 32Г2-40ХН при различных значениях силы проковки

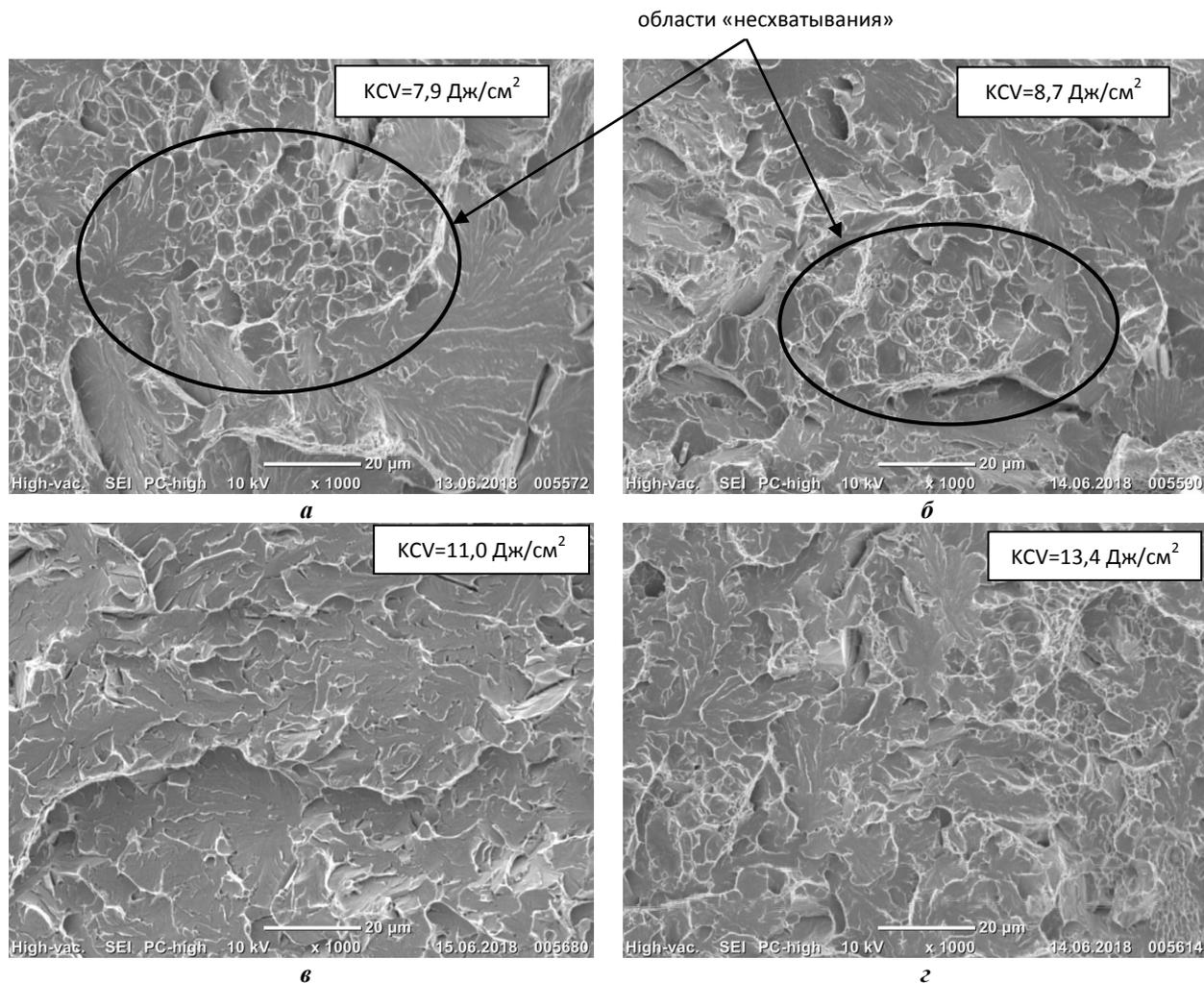


Рис. 7 Фрактограммы сварных соединений после испытаний на ударный изгиб при нанесении концентратора напряжений в стыке:

а – $F_2=70$ кН; б – $F_2=100$ кН; в – $F_2=130$ кН; г – $F_2=160$ кН

Таблица 5. Механические свойства сварного соединения сталей 32Г2-40ХН, полученные при испытании на разрыв

Режим сварки		Условный предел текучести σ_{02} , МПа	Временное сопротивление σ_B , МПа	Относительное сужение Ψ , %	Место разрушения при разрыве
№	F_2 , кН				
1	70	742	817	53	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 9 мм от линии контакта
2	100	786	834	48	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 7 мм от линии контакта
3	130	807	854	32	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 5 мм от линии контакта
4	160	808	867	23	обрыв со стороны стали 32Г2 на расстоянии 2 мм от линии контакта

При приложении силы проковки в размере 130 кН доля микропластической деформации при разрушении несколько возрастает ввиду того, что поверхность разрушения инициирована преимущественно фасетками квазискола с гребнями отрыва (рис. 7 в). Участков, в которых не произошло образования межатомных связей, т. е. «несхватывания», практически нет.

При дальнейшем повышении силы проковки до 160 кН на фоне квазихрупкого разрушения можно отметить формирование вязких участков с мелкоямочным микро-рельефом, в которых превращение при охлаждении произошло преимущественно по диффузионному механизму (рис. 7 г). Структурные элементы излома отличаются наименьшими размерами и наибольшими значениями ударной вязкости.

При анализе результатов механических испытаний на разрыв можно отметить, что разрушение образцов во всех случаях зафиксировалось по материалу 32Г2, при этом значения прочностных свойств находятся на уровне не ниже основного металла. Локализация деформации и разрушения происходили в разупрочненном участке зоны рекристаллизации. При $F_2=160$ кН разрыв образца произошел наиболее близко к линии контакта сварного соединения, так как и расположение зоны рекристаллизации в этом случае наиболее близко к сварному стыку. Таким образом, во всех случаях прочность сварного стыка оказалась выше прочности участка разупрочненной зоны, в которой произошло разрушение.

Примечательно также, что с увеличением давления проковки происходит рост прочности сварного соединения, однако пластичность, характеризующая площадь образованной шейки, снижается.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние силы проковки на формирование структуры и механических свойств сварных соединений из сталей 32Г2 и 40ХН в процессе ротационной сварки трением, в результате чего установлено ее влияние на микроструктурные характеристики, прочность и площадь атомного взаимодействия привариваемых материалов.

2. С увеличением силы проковки возрастает объем разогретого металла, выдавливаемого в грат, что приводит к сокращению протяженности ЗТМВ. При этом микроструктура вдоль линии контакта изменяется от крупнозернистой к мелкозернистой, что сказывается на росте ударной вязкости.

3. С увеличением силы проковки наблюдается рост прочности сварного соединения и снижение пластичности в зоне разрушения. При этом прочность сварного соединения определяется прочностью участков рекристаллизации стали 32Г2, в которых произошло разрушение при испытании на разрыв, и полученные прочностные характеристики не уступают материалу тела трубы после закалки и отпуска.

4. При сваривании трубных заготовок $\varnothing 63,5$ мм и толщиной стенки 4,5 мм из сталей 32Г2 и 40ХН оптимальным диапазоном значения ковочного усилия является от 130 до 160 кН при заданных значениях остальных параметров сварки (сила разогрева 50 кН, частота вращения при разогреве 800 об/мин, длина оплавления при нагреве 8 мм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты вышеприведенных исследований позволяют заключить, что при определении оптимальных значений силы проковки среднеуглеродистых сталей при ротационной сварке трением следует руководствоваться результатами испытаний на разрыв (разрушение на некотором расстоянии от сварного стыка с механическими свойствами не ниже основного материала) и результатами микрофрактографического анализа сварного стыка (отсутствие участков «несхватывания», мелкозернистая структура).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friction Stir Welding and Processing / ed. R.S. Misha, M.W. Mahoney. San Francisco: ASM International, 2005. 298 p.
2. Красильников В.В., Шагабудинов Э.Р., Кузнецов М.Е., Бородулин И.В., Каратыш В.В. Точечная сварка трением с перемешиванием с разделением цикла сварки

- для нахлесточных соединений // *Master's Journal*. 2015. № 1. С. 48–53.
3. Рзаев Р.А., Чуларис А.А., Досимов А.С., Наумов А.А., Зотов О.Г. Использование технологических приемов для повышения прочности разнородных сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2018. № 1. С. 67–76.
 4. Зяхор И.В., Завертаный М.С., Чернобай С.В. Линейная сварка трением металлических материалов // *Автоматическая сварка*. 2014. № 12. С. 29–36.
 5. Хуснуллин А.М., Кашаев Р.М. Управление линейной сваркой трением // *Письма о материалах*. 2016. Т. 6. № 3. С. 227–230.
 6. Kelly M.R., Schmid S.R., Adams D.S., Fletcher J. Induction Pre-Heated Linear Friction Welding // *Key Engineering Materials*. 2018. Vol. 767. P. 331–340.
 7. Shete N., Deokar S.U. A Review Paper on Rotary Friction Welding // *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 5. № 6. P. 1557–1560.
 8. Li W., Vairis A., Preuss M., Ma T. Linear and rotary friction welding review // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. № 2. P. 71–100.
 9. Виль В.И. Сварка металлов трением. М.: Машиностроение, 1970. 176 с.
 10. Сварка трением: справочник / под ред. В.К. Лебедева. Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.
 11. ГОСТ Р 50278–92. Трубы бурильные с приваренными замками. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 16 с.
 12. Sahin M. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 168. № 2. P. 202–210.
 13. Sahin M. Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30. № 1. P. 135–144.
 14. Sahin M. Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding // *Materials and Design*. 2007. Vol. 28. № 7. P. 2244–2250.
 15. Ozdemir N., Sarsilmaz F., Hascalik A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel // *Materials and Design*. 2007. Vol. 28. № 1. P. 301–307.
 16. Selvamani S.T., Umanath K., Palanikumar K., Vigneswar K. The microhardness analysis of friction welded AISI 52100 grade carbon steel joints // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 984-985. P. 613–617.
 17. Satyanarayana V.V., Reddy G.M., Mohandas T. Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 160. № 2. P. 128–137.
 18. Kalsi N.S., Sharma V.S. A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 57. № 9-12. P. 957–967.
 19. ГОСТ СССР 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Издательство стандартов, 1977. 33 с.
 20. ГОСТ СССР 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2007. 66 с.
 21. ГОСТ СССР 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 10 с.

REFERENCES

1. Misha R.S., Mahoney M.W., eds. Friction Stir Welding and Processing. San Francisco, ASM International Publ., 2005. 298 p.
2. Krasilnikov V.V., Shagabutdinov E.R., Kuznetsov M.E., Borodulin I.V., Karatysh V.V. The friction stir spot welding by lap joint with separation of the weld cycle. *Master's Journal*, 2015, no. 1, pp. 48–53.
3. Rzaev R.A., Chularis A.A., Dosimov A.S., Naumov A.A., Zotov O.G. The application of technological methods for enhancing the strength of dissimilar joints produced by friction stir welding. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 1, pp. 67–76.
4. Zyakhor I.V., Zavertanny M.S., Chernobay S.V. Linear friction welding of metallic materials. *Avtomaticheskaya svarka*, 2014, no. 12, pp. 29–36.
5. Khusnullin A.M., Kashaev R.M. Control of linear friction welding. *Pisma o materialakh*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 227–230.
6. Kelly M.R., Schmid S.R., Adams D.S., Fletcher J. Induction Pre-Heated Linear Friction Welding. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 767, pp. 331–340.
7. Shete N., Deokar S.U. A Review Paper on Rotary Friction Welding. *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 5, no. 6, pp. 1557–1560.
8. Li W., Vairis A., Preuss M., Ma T. Linear and rotary friction welding review. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 2, pp. 71–100.
9. Vil V.I. *Svarka metallov treniem* [Welding metals by friction]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 176 p.
10. Lebedev V.K., ed. *Svarka treniem: spravochnik* [Friction welding: A Handbook]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1987. 236 p.
11. *GOST R 50278–92. Truby burilnye s privarennyimi zamkami. Tekhnicheskie usloviya* [GOST R 50278–92. Drill pipes with weld-on tool joints. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 16 p.
12. Sahin M. Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 168, no. 2, pp. 202–210.
13. Sahin M. Characterization of properties in plastically deformed austenitic-stainless steels joined by friction welding. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 135–144.
14. Sahin M. Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, no. 7, pp. 2244–2250.
15. Ozdemir N., Sarsilmaz F., Hascalik A. Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel. *Materials and Design*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 301–307.

16. Selvamani S.T., Umanath K., Palanikumar K., Vigneswar K. The microhardness analysis of friction welded AISI 52100 grade carbon steel joints. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 984-985, pp. 613–617.
17. Satyanarayana V.V., Reddy G.M., Mohandas T. Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160, no. 2, pp. 128–137.
18. Kalsi N.S., Sharma V.S. A statistical analysis of rotary friction welding of steel with varying carbon in workpieces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 57, no. 9-12, pp. 957–967.
19. GOST SSSR 9450-76. *Izmerenie mikrotverdosti vdavlivaniem almaznykh nakonechnikov* [GOST SSSR 9450-76. Measurements microhardness by diamond instruments indentation]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1977. 33 p.
20. GOST SSSR 6996-66. *Svarnye soedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv* [GOST SSSR 6996-66. Welded joints. Methods of mechanical properties determination]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 66 p.
21. GOST SSSR 9454-78. *Metally. Metod ispytaniya na udarnyy izgib pri ponizhennykh, komnatnoy i povyshennykh temperaturakh* [GOST SSSR 9454-78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2003. 10 p.

INFLUENCE OF FORGING FORCE ON THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF MEDIUM-CARBON STEELS WELDED JOINTS IN ROTARY FRICTION WELDING

© 2019

E.A. Kuzmina, postgraduate student

Orenburg State University, Orenburg (Russia)

E.Yu. Priymak, PhD (Engineering),

Head of Laboratory of metallurgy and heat treatment,
assistant professor of Chair “Material Science and Materials Technology”

ZBO Drill Industries, Inc., Orenburg (Russia)

Orenburg State University, Orenburg (Russia)

Keywords: rotary friction welding (RFW), forging force, microstructure, thermomechanical affected zone (TMAZ), microstructure, microhardness, tensile strength, impact strength; 32-2-Mn; 40-Cr-Ni.

Abstract: The increasing interest in the process of friction welding is associated with the wide spreading of this technology at the enterprises of mechanical engineering due to the technological advantages of this method and the high quality of welded joints of the similar and dissimilar metals and alloys. Rotary friction welding (RFW) is one of the types of welding using friction heating and is used for parts having the shape of a cylinder or a pipe. The main technological parameters of the RFW process are the force during heating, forging force, the rotation frequency during heating, and the burning-off length. All parameters are interconnected and influence the process of formation and the properties of a welded joint.

The paper studies the influence of forging pressure on microhardness, tensile properties, and microstructure of welded joints from 32-2-Mn and 40-Cr-Ni steels. The authors analyzed the phase transformations occurring in the materials to be welded as a result of high temperature and deformation effects. The study showed the change in the length of the thermomechanically affected zone (TMAZ) depending on forging pressure. The results of microhardness distribution along the weld seam illustrate the formation of hardened and weakened zones. The paper presents the results of the breakdown and impact-viscosity tests of welded joints. The study showed the morphological features of fracture in the welded joint after the impact-bending tests.

The study identified that the forging force affects the microstructural characteristics, the length of thermomechanically affected zone of the materials being welded, the mechanical properties, and the fractographic features of a welded joint during the impact-bending test. The authors give recommendations for determining the optimal forging force values.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ СУПЕРФИНИШИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ3-1 И ВТ22

© 2019

Р.В. Ладягин, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»
Л.П. Ситкина, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»
И.Н. Разумова, ассистент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»
Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)

Ключевые слова: шероховатость; ультразвуковое суперфиниширование; титановые сплавы; методы абразивного резания; выносливость; интенсивность износа.

Аннотация: Для обеспечения эксплуатационных характеристик в процессе изготовления деталей авиационной техники, ракетостроения требуется выдержать жесткие технологические требования. Получение поверхности с минимальной шероховатостью – одно из таких требований, которое заслуживает особого внимания, поскольку этот фактор непосредственно оказывает влияние на усталостную прочность и ресурс.

Объектом исследования являются титановые сплавы, чьи конструкционные и эксплуатационные качества зарекомендовали себя с хорошей стороны, они характеризуются низкой обрабатываемостью резанием.

В статье раскрыт механизм формирования неровностей деталей изделия в зависимости от свойств обрабатываемого материала, вида обработки, параметров оборудования, инструмента, режимов обработки и других конструктивных и технологических факторов.

Представлены результаты исследований влияния режимов технологического процесса ультразвукового суперфиниширования на величину шероховатости обработанной поверхности деталей из титановых сплавов.

Исследования проводились при финишировании титановых сплавов использованием брусков из зеленого карбида кремния на керамической основе и ультразвуковой головки.

В процессе исследования рассчитывалась площадь опорной поверхности для определения формы выступов верхней части неровностей при различных значениях опорной площади. Для этого определялся радиус закругления вершины R и угол β , который образуется сторонами профиля. Для получения соотношения между относительной опорной площадью и относительным сближением кривых опорных поверхностей применялся метод наименьших квадратов.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что введение в зону обработки ультразвуковых колебаний с одновременным сообщением брускам механизма осцилляции в процессе суперфиниширования способствовало снижению шероховатости на 15–25 % по сравнению с обычным суперфинишированием.

ВВЕДЕНИЕ

Микрогеометрия поверхности является важной характеристикой качества поверхностного слоя [1]. Эксплуатационные свойства деталей и узлов машин существенно зависят от технологических параметров качества поверхностного слоя, которое определяется геометрическими и химико-механическими характеристиками: шероховатостью, остаточными напряжениями, которые зависят от вида обработки [2–4]. Выявление физической природы, механизма формирования и свойств поверхностного слоя при абразивной обработке – одна из задач технологии машиностроения [5].

Одним из методов финишной обработки поверхности, влияющих на качество поверхностного слоя, является суперфиниширование. Как и любой другой способ обработки, он имеет свои достоинства и недостатки [6]. Одним из недостатков является сравнительно малая производительность процесса суперфиниширования, увеличить производительность процесса можно путем сообщения дополнительного вида энергии в виде ультразвуковых колебаний [7]. Вопросы оптимизации процесса суперфиниширования по статическому критерию, по термодинамическому критерию (КПД) рассматривались в работах [8; 9]. Но для такой оптимизации требуется предварительно построить адекватную модель процесса суперфиниширования, построение такой модели выполнялось в работе [10]. В отдельных работах обращалось внимание на изготовление инструмента для

суперфиниширования [11; 12]. Зарубежные исследователи изучали процесс суперфиниширования с целью улучшения качества поверхностного слоя [13–15].

Исследования Э.Э. Ягьяева, Б.Л. Шрона, А.В. Королёва, В.И. Павлова направлены на повышение надежности соединений путем придания процессу суперфиниширования движения осцилляции, которое сформирует микрогеометрию поверхности в виде наклонных рисок для удержания масла в трущихся соединениях, что будет способствовать увеличению ресурса деталей и уменьшению числа возможных поломок [16; 17]. Вопросами надежности занимались и Л.М. Акулович и др., предпочитая методу суперфиниширования дорожек качения шарикоподшипников метод магнито-абразивной обработки, который позволяет уменьшить по сравнению с процессом суперфиниширования шероховатость поверхности и придать большие благоприятные сжимающие остаточные напряжения [18].

Цель работы – исследование влияния режимов технологического процесса ультразвукового суперфиниширования на величину шероховатости обработанной поверхности деталей из титановых сплавов.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Параметры шероховатости поверхности (ГОСТ 2789-73) при различных условиях ультразвукового суперфиниширования определялись по профилограммам, полученным на профилометре-профилографе модели 252.

При доверительной вероятности 0,95 ошибка измерения относительной опорной длины профиля t_p составляла 5–7 %, а погрешность высоты неровностей – 3–4 %.

В опытах использовались бруски из зеленого карбида кремния на керамической связке с зернистостью от М10 до 5П. Исследования проводились при суперфинишировании титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ22 с исходной шероховатостью $R_z=20\text{ мкм}$ ($R_a=4\text{--}5\text{ мкм}$) после операции проточки.

Частота колебаний ультразвуковой головки составляла $f=20,0\text{ кГц}$; амплитуда колебаний ультразвуковой головки – $A=4\text{ мкм}$; число колебаний механизма осцилляции – $\omega=970\text{ дв. ход/мин}$; амплитуда колебаний суперфинишной головки $A_{в.п}=4\text{ мм}$ и скорость возвратно-поступательного перемещения инструментов вдоль обрабатываемой поверхности $V_{в.п}=0,047\text{ м/с}$ в процессе проведения экспериментов оставались постоянными величинами.

Следует отметить, что на эксплуатационные свойства деталей большое влияние оказывает величина опорной площади поверхности [19; 20]. С целью определения опорной площади при различных способах обработки по методике, предложенной Э.В. Рыжовым, строились кривые опорной поверхности [20]. Часть кривой опорной поверхности, находящейся на расстоянии 50–60 % от уровня наибольшего выступа, представляет наибольший практический интерес. Этот начальный участок кривой и определяет в значительной степени фактическую площадь контакта. Согласно [20], эта часть кривой описывается уравнением

$$\eta = b\varepsilon^v,$$

где η – относительная площадь;

ε – относительное сближение;

b, v – параметры, зависящие от вида обработки.

Для получения одинаковой величины опорной поверхности необходимы различные величины сближения у поверхностей, обработанных различными методами. Опорная поверхность, равная 50 % каждой поверхности, достигается при сближении 0,6 высоты неровностей при шлифовании, на 0,42 при ультразвуковом суперфинишировании, на 0,4 при обычном суперфинишировании. Форма выступов верхней части неровностей определяется разными значениями опорной площади, характеризуемыми радиусом закругления вершины R и углом β , который образуется сторонами профиля неровностей с общим направлением неровностей.

Величина R определяется по формуле

$$R = \left(\frac{d^2}{8h} \right) \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right),$$

где d – длина основания неровности;

h – высота неровности;

γ_1 – горизонтальное увеличение;

γ_2 – вертикальное увеличение.

Угол β определяется из зависимости

$$\text{tg}\beta = \left(\frac{2h}{d} \right) \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right).$$

На 20 типичных неровностях каждой поверхности были измерены величины R и β и статически определены их средние значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что для материала ВТ3-1 наименьшее значение $R_z=1,15\text{ мкм}$ ($R_a=0,23\text{ мкм}$) получено при суперфинишировании брусками 63СМ10СТ17К8 на режимах обработки $V_H=2,7\text{ м/с}$; $P=0,3/0,15\text{ МПа}$; максимальное значение $R_z=3,9\text{ мкм}$ ($R_a=0,78\text{ мкм}$) – при суперфинишировании брусками 63С4ПСМ17К8 на режимах $V_H=2,2\text{ м/с}$; $P=0,30/0,15\text{ МПа}$ (рис. 1).

Анализ данных, полученных в процессе опытов с титановым сплавом ВТ-22, показывает, что минимальная шероховатость $R_z=1,25\text{ мкм}$ ($R_a=0,25\text{ мкм}$) получена при суперфинишировании бруском 63СМ20СТ17К8 на следующих режимах обработки: $V_H=1,5\text{ м/с}$; $P=0,30/0,15\text{ МПа}$. Максимальное значение шероховатости поверхности $R_z=4,1\text{ мкм}$ ($R_a=0,82\text{ мкм}$) получено при обработке бруском 63С5ПСТ17К8 при режимах: $V_H=1,5\text{ м/с}$; $P=0,20/0,10\text{ МПа}$ (рис. 2).

При обработке титанового сплава ВТ3-1 с увеличением скорости вращения детали с $V_H=1,3\text{ м/с}$ до $V_H=2,7\text{ м/с}$ и увеличением давления до $P=0,30/0,15\text{ МПа}$ шероховатость снижается с $R_z=3,0\text{ мкм}$ ($R_a=0,6\text{ мкм}$) до $R_z=1,15\text{ мкм}$ ($R_a=0,23\text{ мкм}$), в то время как при обработке материала ВТ22 шероховатость в промежутке скоростей от $V_H=1,4\text{ м/с}$ до $V_H=1,8\text{ м/с}$ снижается, а затем, если увеличить скорость до $V_H=2,3\text{ м/с}$, растёт.

Если увеличить удельное давление на бруски до $P=0,30/0,15\text{ МПа}$, то значение шероховатости возрастает, так как снижается амплитуда колебания бруска и поверхность режущего инструмента активно засаливается.

Из полученных кривых опорных поверхностей следует, что при одинаковой высоте неровностей $R_z=1,15\text{--}1,25\text{ мкм}$ ($R_a=0,23\text{--}0,25\text{ мкм}$) поверхности имеют различную опорную способность. Так, при сближении, равном 0,2 высоты неровностей, величина опорной поверхности для шлифовального кольца равна 8 %, для обычного суперфиниширования – 15 %, ультразвукового суперфиниширования – 13 %.

Для исследованных поверхностей величина R колеблется в пределах 130–140 мкм после ультразвукового суперфиниширования и в пределах 150–180 мкм после обычного суперфиниширования. Угол при обычном суперфинишировании составляет 18–20°, а после ультразвукового суперфиниширования – 24°. Наихудшие результаты получены после шлифования $R_a=70\text{--}80\text{ мкм}$, $\beta=3^\circ: 3^\circ 30'$.

Для того чтобы достичь достаточной величины опорной поверхности, при суперфинишировании достаточна сравнительно небольшая величина сближения, в то же время после шлифования для достижения достаточной величины опорной поверхности необходимо значительное сближение, так как шлифованная поверхность характеризуется неровностями в виде острых пиков.

Применив к экспериментальным данным статистической обработки метод наименьших квадратов, получили следующие соотношения между относительной опорной площадью и относительным сближением на начальных участках кривых опорных поверхностей:

– шлифование: $\eta=2,43\varepsilon^{1,25}$;

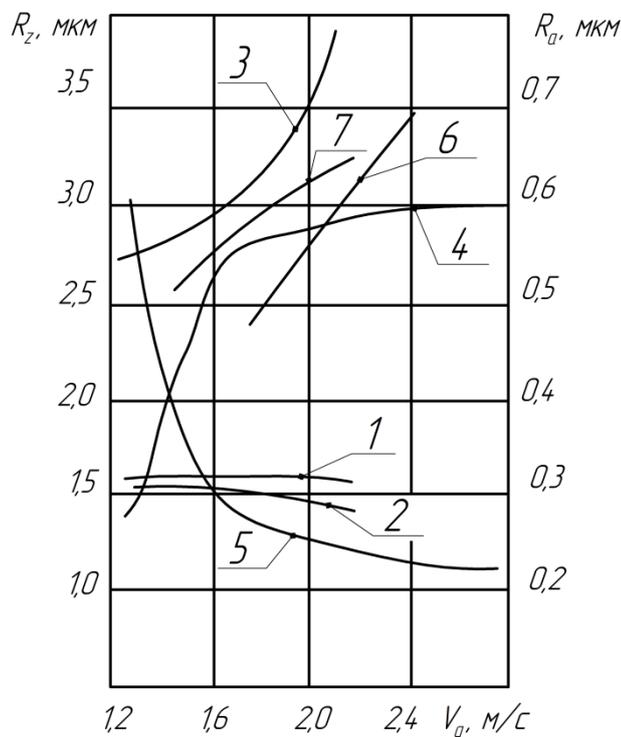


Рис. 1. Шероховатость обработанной поверхности при УЗС в зависимости от изменения V_H , P и материала инструмента (Сплав ВТ3-1):
 1 – $P=0,2/0,1$ МПа; брусок 63СМ20СТ17К8; 2 – $P=0,3/0,15$ МПа; брусок 63СМ20СТ17К8;
 3 – $P=0,3/0,13$ МПа; брусок 63С4ПСМ17К8; 4 – $P=0,2/0,1$ МПа; брусок 63СМ10СТ17К8;
 5 – $P=0,3/0,15$ МПа; брусок 63СМ10СТ17К8; 6 – $P=0,2/0,1$ МПа; брусок 63С5ПСТ17К8;
 7 – $P=0,3/0,15$ МПа; брусок 63С5ПСТ17К8

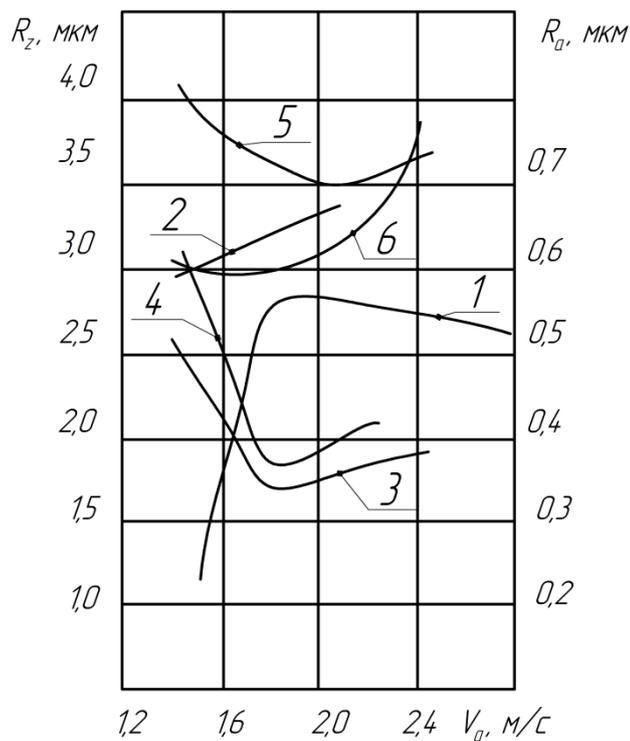


Рис. 2. Шероховатость обработанной поверхности при УЗС в зависимости от изменения V_H , P и материала инструмента (Сплав ВТ22):
 1 – $P=0,3/0,15$ МПа; брусок 63СМ20СТ17К8; 2 – $P=0,3/0,15$ МПа; брусок 63С4ПСМ17К8;
 3 – $P=0,2/0,1$ МПа; брусок 63СМ10СТ17К8; 4 – $P=0,3/0,15$ МПа; брусок 63СМ10СТ17К8;
 5 – $P=0,2/0,1$ МПа; брусок 63С5ПСТ17К8; 6 – $P=0$

- обычное суперфиниширование: $\eta=7,4\varepsilon^{1,43}$;
- ультразвуковое суперфиниширование: $\eta=5,5\varepsilon^{1,51}$.

Полученные значения b и ν позволяют подсчитать относительную опорную площадь при заданном сближении для различных методов суперфиниширования. Однако по этим значениям трудно быстро оценить изменения площади контактирующих поверхностей. Более удобным критерием является опорная жесткость, характеризующая сближение, соответствующее приращению на единицу относительной площади [20]:

$$j_{оп} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\eta}.$$

Исследованиями установлены следующие средне-статистические значения опорной жесткости:

- шлифование: $j_{оп}=1,2$;
- обычное суперфиниширование: $j_{оп}=0,75$;
- ультразвуковое суперфиниширование: $j_{оп}=0,83$.

Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии ультразвуковых колебаний при суперфинишировании на микрогеометрию обработанной поверхности.

При введении в зону ультразвуковых колебаний величина R_a возрастает, поэтому с целью снижения шероховатости процесс происходит как бы в два этапа, но в то же время одновременно: первоначально поверхность обрабатывается инструментом с наложением ультразвуковых колебаний для снятия необходимого припуска, и одновременно происходит суперфиниширование обрабатываемой поверхности брусками механизма осцилляции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследований установлено, что обработка с наложением ультразвуковых колебаний и одновременным движением брусков позволяет снизить шероховатость R_a на 15...25 % по сравнению с обычным суперфинишированием. В то же время вследствие увеличения съема металла на поверхности отсутствуют единичные риски.

Предлагаемый метод обработки позволит улучшить качество поверхности деталей, работающих в условиях многократного циклического нагружения, таких как лопасти турбин компрессоров, что увеличит их ресурс и повысит безопасность эксплуатируемой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 256 с.
2. Штриков Б.Л., Филин А.Н., Рахчеев В.Г. Основы технологии абразивной обработки фасонных поверхностей прецизионных деталей. М.: Машиностроение-1, 2004. 370 с.
3. Макаров В.Ф. Выбор высокоэффективных абразивных инструментов и режимов резания для различных видов шлифования заготовок. Старый Оскол: ТНТ, 2012. 275 с.
4. Самарин Ю.П., Филин А.Н., Рахчеев В.Г. Технологическое обеспечение точности сложнопрофильных

поверхностей прецизионных деталей при абразивной обработке. М.: Машиностроение, 1999. 299 с.

5. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
6. Ляхов В.Р., Молоканов Р.О., Бурлаков Н.И., Королев А.А. Обзор процесса суперфиниширования, его достоинств и недостатков // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей IV Международ. науч.-практ. конф. В 2 ч. М., 2018. С. 56–59.
7. Балтаев Т.А., Салимов Б.Н., Королев А.А., Королев А.В. Технология безабразивного ультразвукового суперфиниширования колец упорных подшипников // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 129. С. 96–102.
8. Братан С.М., Новоселов Ю.К., Дымченко И.А., Баталин А.С. Выявление статического критерия для анализа процессов съема материала инструментом при суперфинишировании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 254–260.
9. Коршунов В.Я. Выбор оптимальных характеристик абразивных брусков для процесса суперфиниширования деталей из термообработанных сталей // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 6. С. 52–56.
10. Братан С.М., Рошупкин С.И., Мерзлов А.В. Стохастический подход к моделированию процесса стружкообразования при суперфинишировании // Вестник современных технологий. 2016. № 3. С. 4–9.
11. Коробов В.А., Осинкин Д.А., Ткач М.А., Васильева Э.В. О технологических принципах изготовления инструмента для суперфиниширования // XXIII Межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. Волгоград, 2017. С. 17–20.
12. Маркисова С.А. Основные принципы изготовления инструмента для суперфиниширования // 24-я межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых и студентов г. Волжского. Волгоград, 2018. С. 178.
13. Blake G., Reynolds J. Case Study Involving Surface Durability and Improved Surface Finish // GEARTECHNOLOGY. 2012. August. P. 66–75.
14. Grama L., Gabor M., Dattoma V., Beno J. Study of Different Process Parameters on the Surface Roughness at Superfinishing // Scientific Bulletin of the “Petru Maior” University of Târgu Mureş. 2010. Vol. 7. № 1. P. 27–31.
15. Manesh A., Niskanen P. Engineered and Super-finished Surfaces for Precision Aerospace Applications // ITT Research Institute, Chicago. 2003. PTSM 02–001.
16. Ягьяев Э.Э., Шрон Б.Л. Повышение надежности работы соединения «вал-манжета» при суперфинишировании с осцилляцией на поверхности вала // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2017. № 1. С. 48–53.
17. Королёв А.В., Павлов В.И. Научно-технологические аспекты повышения безопасности транспортных систем на основе использования новых технологий изготовления подшипниковых узлов качения // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНС-ЭНЕРГОКОМ-2018). Саратов, 2018. С. 80–82.

18. Акулович Л.М., Сергеев Л.Е., Ворошуха О.Н. Магнитно-абразивная обработка цилиндрических канавок с радиусным профилем // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. 2018. № 6. С. 20–32.
 19. Рыжов Э.В. Опорная площадь поверхностей, подвергнутых механической обработке // Вестник машиностроения. 1964. № 7. С. 14–16.
 20. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 170 с.
- REFERENCES**
1. Sulima A.M., Evstigneev M.I. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya i ustalostnaya prochnost detaley iz zharoprochnykh i titanovykh splavov* [The quality of the surface layer and the fatigue strength of parts made of heat-resistant and titanium alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 256 p.
 2. Shtrikov B.L., Filin A.N., Rakhcheev V.G. *Osnovy tekhnologii abrazivnoy obrabotki fazonnykh poverkhnostey pretsizionnykh detaley* [Fundamentals of technology for abrasive machining of shaped surfaces of precision parts]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004. 370 p.
 3. Makarov V.F. *Vybor vysokoeffektivnykh abrazivnykh instrumentov i rezhimov rezaniya dlya razlichnykh vidov shlifovaniya zagotovok* [Selection of highly efficient abrasive tools and cutting conditions for various types of workpiece grinding]. Stariy Oskol, TNT Publ., 2012. 275 p.
 4. Samarin Yu.P., Filin A.N., Rakhcheev V.G. *Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti slozhnoprofilnykh poverkhnostey pretsizionnykh detaley pri abrazivnoy obrabotke* [Technological support for the accuracy of complex profile surfaces of precision parts for abrasive machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 299 p.
 5. Kragelskiy I.V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 480 p.
 6. Lyakhov V.R., Molokanov R.O., Burlakov N.I., Korolev A.A. Overview of the process of superfinishing, its advantages and disadvantages. *Sbornik statey IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Sovremennaya nauka: aktualnye voprosy, dostizheniy i innovatsii"*. Moscow, 2018, pp. 56–59.
 7. Baltaev T.A., Salimov B.N., Korolev A.A., Korolev A.V. Non-abrasive ultrasonic superfinishing of thrust bearing rings technology. *Trudy GOSNITI*, 2017, vol. 129, pp. 96–102.
 8. Bratan S.M., Novoselov Yu.K., Dymchenko I.A., Batalin A.S. Definition of static criteria for the analysis of the material removal process at superfinishing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 8-1, pp. 254–260.
 9. Korshunov V.Ya. The selection of the optimal characteristics of abrasive bricks for super-finishing of the parts made of heat-treated steels. *Vestnik Bryanskoys gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*, 2017, no. 6, pp. 52–56.
 10. Bratan S.M., Roshchupkin S.I., Merzlov A.V. The stochastic approach for modeling of chip formation process in superfinishing. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy*, 2016, no. 3, pp. 4–9.
 11. Korobov V.A., Osinkin D.A., Tkach M.A., Vasilyeva E.V. On the technological principles of manufacturing tools for superfinishing. *XXIII Mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov g. Volzhskogo*. Volgograd, 2017, pp. 17–20.
 12. Markisova S.A. The basic principles of making tools for superfinishing. *XXIII Mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh i studentov g. Volzhskogo*. Volgograd, 2018, p. 178.
 13. Blake G., Reynolds J. Case Study Involving Surface Durability and Improved Surface Finish. *GEARTECHNOLOGY*, 2012, August, pp. 66–75.
 14. Grama L., Gabor M., Dattoma V., Beno J. Study of Different Process Parameters on the Surface Roughness at Superfinishing. *Scientific Bulletin of the "Petru Maior" University of Târgu Mureş*, 2010, vol. 7, no. 1, pp. 27–31.
 15. Manesh A., Niskanen P. Engineered and Super-finished Surfaces for Precision Aerospace Applications. *ITT Research Institute, Chicago*, 2003, PTSM 02–001.
 16. Yagyaev E.E., Shron B.L. Improvement reliability of work of the "shaft-cuff" "Val-mange" connection for superfinishing from oscillations on the shaft surface. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2017, no. 1, pp. 48–53.
 17. Korolev A.V., Pavlov V.I. Scientific and technological aspects of improving the safety of transport systems based on the use of new technologies for the manufacture of rolling bearing units. *Rol' opornogo vuza v razvitii transportno-energeticheskogo kompleksa Saratovskoy oblasti (TRANSENERGOKOM-2018)*. Saratov, 2018, pp. 80–82.
 18. Akulovich L.M., Sergeev L.E., Voroshukho O.N. Magnetic-abrasive processing of cylindrical radius profile rollers. *Vestnik Baranovichskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 6, pp. 20–32.
 19. Ryzhov E.V. Bearing surface area machined. *Vestnik mashinostroeniya*, 1964, no. 7, pp. 14–16.
 20. Ryzhov E.V. *Kontaktnaya zhestkost' detaley mashin* [Contact stiffness of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 170 p.

THE ROUGHNESS OF TREATED SURFACE UNDER THE ULTRASONIC SUPERFINISHING OF DETAILS FROM VT3-1 AND VT 22 TITANIUM ALLOYS

© 2019

R.V. Ladyagin, Senior Lecturer of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”

L.P. Sitkina, Senior Lecturer of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”

I.N. Razumova, assistant of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”

Samara State Technical University, Samara (Russia)

Keywords: roughness; ultrasonic superfinishing; titanium alloys; methods of abrasive cutting; endurance; wear intensity.

Abstract: To guarantee operational characteristics in the process of manufacturing parts for aeronautical equipment and rocket production, it is necessary to satisfy strict technological requirements. The production of a surface with minimum roughness is one of such requirement which is worthy of separate attention as this factor directly influences the fatigue strength and the resource.

The objects of the study are the titanium alloys which are characterized by low cutting performance and proved to have valuable structural properties.

The paper describes the mechanism for the formation of irregularities of parts depending on the properties of treated material, types of processing, equipment parameters, tools, processing modes, and other design and technology factors.

The paper presents the results of the study of the influence of ultrasonic superfinishing technological process modes on the value of roughness of a treated surface of titanium alloy parts.

The authors carried out the research when finishing titanium alloys using the ceramic-based bars of green silicon carbide and the ultrasonic head.

In the research process, the authors calculated the bearing surface area to define the forms of the lobes of irregularity top sides at various bearing area values. For this purpose, the authors determined the corner radius R and the angle β which is formed by the profile sides. To obtain the relation between the relative bearing area and relative approach of bearing area curves, the least square method was used.

The research allowed concluding that the applying of ultrasonic oscillations to the processing area with the simultaneous oscillation mechanism transmission to the hones in the process of superfinishing caused the decrease in roughness by 15–25 % in comparison with usual superfinishing.

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ГИДРОПРИВОДАМИ

© 2019

А.В. Месропян, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной гидромеханики*Р.Р. Шарипов*, аспирант кафедры прикладной гидромеханики*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)*

Ключевые слова: рулевая машина; системы управления; нечеткий логический регулятор; математическое моделирование; электрогидравлический привод; нечеткая логика; ПИД-регулятор.

Аннотация: В работе рассматривается возможность применения интеллектуальных регуляторов в качестве корректирующих и задающих устройств исполнительных гидроприводов различного назначения. Предложен способ позиционного управления рулевым гидравлическим приводом с нечетким логическим регулятором (НЛР). Корректирующее воздействие НЛР реализовано на основе трех входных параметров, аналогично классическому пропорционально-интегрально-дифференцирующему регулятору. Для оценки эффективности применения НЛР в системе позиционирования гидропривода разработана математическая модель, описывающая работу сложной электрогидромеханической системы, включающей электромеханический преобразователь, струйный гидроусилитель, исполнительный гидроцилиндр. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода реализована в MatLab Simulink, средствами Fuzzy Logic Toolbox был сформирован НЛР пропорционально-интегрально-дифференцирующего типа. Параметры НЛР задавались экспертной базой лингвистических правил и изменением формы функций принадлежности, варьируя которые можно получить линейные и нелинейные выходные характеристики. Полученная кусочно-линейная гиперплоскость управляющей характеристики НЛР, определяющая нелинейный характер коррекции, теоретически позволяет получить улучшенное качество переходных процессов. Оценена эффективность алгоритмов управления с классическими регуляторами и аналогичными нечеткими регуляторами в условиях известной математической модели объекта управления (электрогидравлический следящий привод) методом численного эксперимента. При синтезе НЛР пропорционального типа сформирован нелинейный закон регулирования, который позволил компенсировать нелинейность гидравлической исполнительной системы привода. При реализации линейной зависимости НЛР пропорционально-интегрального типа система показывает поведение, соответствующее традиционному регулятору. Синтезированный НЛР с нелинейной характеристикой не показал значительного улучшения качества переходного процесса по сравнению с классическим регулятором. На основе полученных результатов сделаны выводы о целесообразности применения НЛР в системах управления с гидравлическими исполнительными элементами.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы управления (СУ) летательными аппаратами (ЛА) являются сложными многоконтурными, многокомпонентными и высоконагруженными динамическими системами с высоким уровнем обеспечения надежности. Основным трендом развития данных систем является использование цифровых систем управления и применение адаптивных алгоритмов в сочетании с энергоемкими исполнительными механизмами на гидравлической элементной базе [1–3]. Широкий диапазон эксплуатационных условий и высокие требования к динамике полета современных летательных аппаратов (в том числе беспилотных) обуславливают необходимость точного воспроизведения команд управления исполнительными механизмами управления (рулевыми плоскостями, агрегатами управления вектором и модулем тяги). Применение интеллектуальных методов управления (управление посредством нечеткой логики и нейросетей) в гидравлических следящих приводах СУ ЛА различного назначения является одним из перспективных вариантов решения задач по обеспечению эффективной работы систем управления с требуемыми показателями на установившихся и неуставившихся режимах работы.

Использование нечеткой логики позволяет обрабатывать неопределенные (недоопределенные) данные и ситуации, используя ассоциативный подход, и получать требуемые законы управления в широком диапазо-

не варьируемых параметров [4; 5]. Свойства нечеткой логики (fuzzy logic) обрабатывать неполную информацию и выдавать обоснованные решения определяют возможность использования ее для мониторинга в реальном времени сложных технологических процессов, а также для решения проблем, связанных с практической реализацией алгоритмов, методов, имитационных моделей в управлении техническими системами. Регуляторы, построенные на базе нечеткой логики, способны обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами. Кроме того, используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнять оптимизацию сложных контуров регулирования без необходимости трудоемких исследований и математического моделирования и формировать законы управления без использования громоздких аналитических вычислений. Все это определяет весомые преимущества применения данного подхода при разработке перспективных интеллектуальных СУ со стохастическим характером изменения параметров системообразующих элементов.

Системы управления, основанные на теории нечетких множеств и нейрокомпьютерного управления, позволяют значительно повысить эксплуатационные характеристики высоконагруженных быстродействующих гидроприводов за счет совершенствования алгоритмов управления и коррекции на всех режимах работы СУ ЛА.

Цель исследования – анализ и оценка эффективности применения нечеткой логики в системах управления исполнительными гидроприводами.

КОРРЕКЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ В ГИДРОПРИВОДЕ

Система коррекции на основе пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора является эффективным инструментом достижения необходимых параметров. Синтез оптимальной системы управления по заданным параметрам осуществляется на основе модели управляемого объекта и информации о дифференциальной и интегральной составляющих сигнала управления. В условиях неопределенной модели объекта управления возможно использование эмпирических методик (Зиглера – Николса и др.) [6–8].

Система с ПИД-регулятором позиционного управления в общем виде описывается следующим образом:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

где $u(t)$ – значение сигнала управления;
 K – коэффициент усиления (пропорциональности);
 $e(t)$ – ошибка регулирования;
 T_i и T_d – постоянные времени интегрирования и дифференцирования.

ПИД-регулятор представляет собой линейный регулятор, позволяющий корректировать управляющее воздействие с учетом накопления и диссипации энергии в процессе функционирования и управления.

При реализации ПИД управления средствами нечеткой логики система приобретает ряд качественных изменений: возможность реализации нелинейной зависимости по входным параметрам, использование экспертной информации в виде лингвистических правил. Разработка нечеткой системы регулирования – нечеткого логического регулятора – сопряжена с решением обширного круга задач: выбор алгоритма фазификации (приведение в «нечеткость»), дефазификации (обратное преобразование), выбор параметров алгоритма и др. Среди алгоритмов нечеткой логики наиболее распространены модели Мамдани, Тсукамото, Сугено [9; 10], для реализации которых необходимо задать множество параметров (в отличие от классических регуляторов) для получения необходимого закона управления, в связи с этим вопрос синтеза параметров для конкретной технической системы весьма актуален. Несмотря на сложность синтеза параметров нечеткого логического регулятора, требуемые характеристики объекта управления достигаются путем использования лингвистического подхода настройки параметров нечеткого логического регулятора (НЛР) за сравнительно малое количество итераций настройки.

В основе функционирования НЛР ПИД типа лежит определяющий алгоритм с тремя входными параметрами одного сигнала: значение отклонения (ошибка), дифференциал от ошибки и интегральная составляющая ошибки управления, для упрощенных пропорционального (П), пропорционально-интегрального (ПИ), пропорционально-дифференциального (ПД) регуляторов количество параметров меньше (рис. 1).

Декомпозицию задачи синтеза для НЛР ПИД типа можно представить как выбор постоянных при пропорциональном, дифференциальном и интегральном звене регулятора (для НЛР постоянные представлены в виде функций). Соответствующие параметры регулятора отвечают за быстродействие (пропорциональное звено), уменьшение перерегулирования (дифференциальная составляющая), уменьшение статической ошибки (интегральная составляющая).

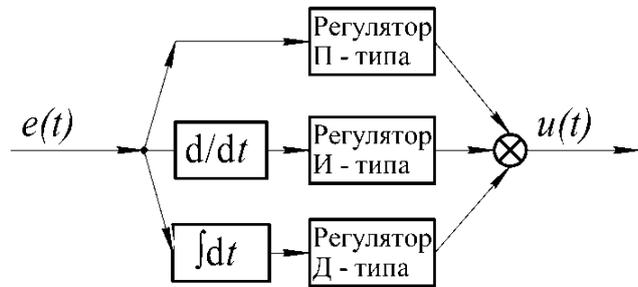


Рис. 1. Декомпозиция закона управления ПИД-регулятора

Управляющая поверхность классического ПИД-регулятора представляет собой многомерную плоскость, определяющую линейную зависимость входных и выходных параметров регулятора. Параметры регулирования во времени определяются формой функций принадлежности, лингвистическими правилами и их весами, возможен синтез параметров, обеспечивающий линейную характеристику НЛР, аналогично классическому ПИД-регулятору.

Система параметров НЛР представляет собой три класса изменяемых параметров: базовый алгоритм нечеткого вывода и методы фазификации и дефазификации, система лингвистических правил (база правил) и их веса, форма функций принадлежности и их характеристика. Совокупность параметров НЛР определяет характеристики и форму управляющей плоскости.

База правил является лингвистической формализацией закона управления и, в зависимости от количества дискретных термов (состояний) и множеств входных и выходных переменных, увеличивается экспоненциально, для 3 входных переменных и одной выходной с 5 термами каждая потенциальное количество правил достигает 125. Для синтеза подобной многомерной структуры применяют подходы традиционного синтеза ПИД-регуляторов – раздельного синтеза параметров составляющих ошибки управления.

На основании информации об ошибке управления НЛР формирует нелинейную коррекцию управляющего воздействия, что позволяет достичь требуемых показателей качества управления системами исполнительных гидроприводов, недоступных при использовании классических регуляторов [11].

Опыт применения нелинейной коррекции говорит о ее большой практической эффективности [12–14], что определяет актуальность разработки математических моделей объектов управления с НЛР и исследование динамических показателей исполнительных гидроприводов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ГИДРОПРИВОДА

Исполнительные устройства на гидравлической элементной базе характеризуются сложным математическим описанием комплекса энергетических преобразований: гидравлических, электрических и механических процессов. Математическая модель основана на математическом описании отдельных функциональных элементов привода: насосной установки с постоянным давлением питания, системы обработки сигнала управления (согласователи сигнала) (рис. 2), системы коррекции электрического сигнала, системы электромеханического преобразования, системы гидравлического усиления сигнала, исполнительного гидромеханического преобразователя.

При моделировании НЛР в системе привода обработка сигналов усложняется, и она не может быть пред-

ставлена в чисто аналоговой форме, дискретизация процесса необходима для расчета значений алгоритма нечеткой логики [15]. Частота дискретизации процесса управления 2000 Гц обеспечивает достаточное процессорное время для расчета значений управляющего воздействия по заданному алгоритму нечеткой логики и бесперебойное управление гидроприводом.

Структурная схема электрогидравлического следящего привода с НЛР представлена на рис. 3.

Ввиду сложности учета всех физических закономерностей, характеризующих работу гидравлического исполнительного элемента, принят ряд следующих допущений:

- коэффициенты расхода, восстановления давления, давления питания и слива – постоянные;
- гистерезис и взаимоиндукция в ЭМП отсутствуют (линейная зависимость по току управления);

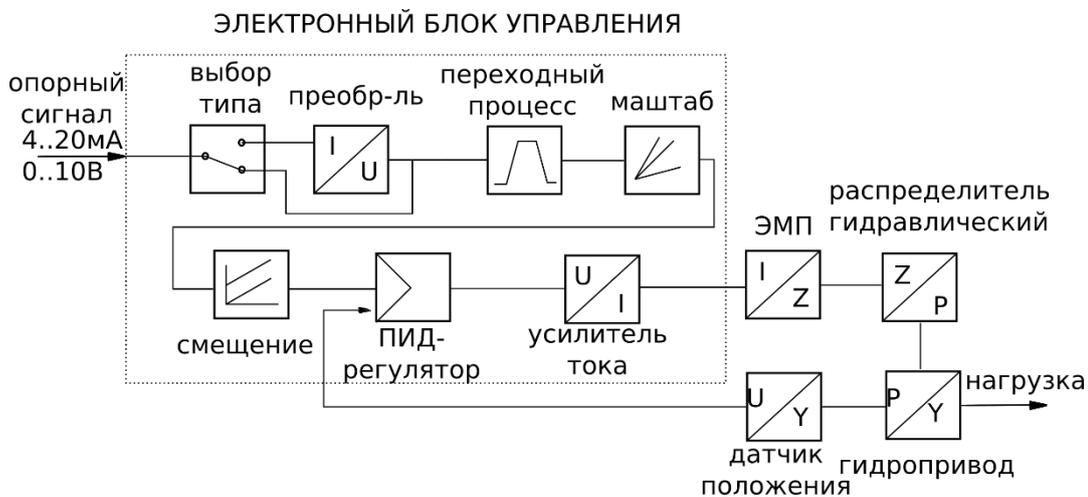


Рис. 2. Электронный блок управления в составе гидропривода

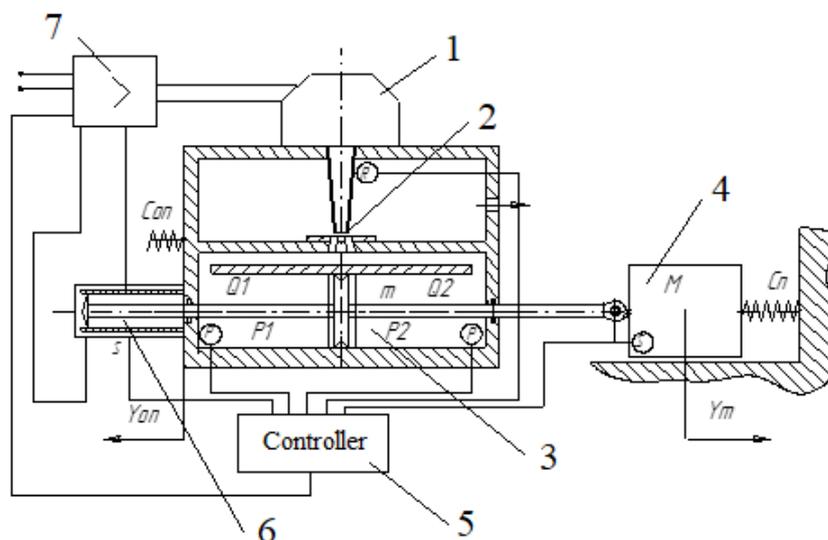


Рис. 3. Электрогидравлический следящий привод:

- 1 – электромеханический преобразователь; 2 – струйная трубка;
- 3 – гидроцилиндр; 4 – инерционная нагрузка; 5 – контроллер;
- 6 – датчик обратной связи; 7 – усилитель сигнала ошибки

– температура рабочей жидкости в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется;
 – объемные потери в подводящих линиях в гидрораспределителе и гидродвигателе малы, и ими пренебрегаем;
 – волновые процессы в гидролиниях из-за их малой длины на рабочие процессы гидропривода не влияют;
 – нерастворенный воздух в системе отсутствует;
 – трение в гидроцилиндре и в нагрузке мало, и им можно пренебречь.

Уравнение электрической цепи ЭМП [16; 17]:

$$U = R \cdot I + L \cdot \frac{dI}{dt} + K_{ne} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (2)$$

где U – напряжение на обмотке электрохимического преобразователя (ЭМП);

I – ток в обмотке управления;

K_{ne} – коэффициент противо-ЭДС;

R – сопротивление обмотки управления;

L – индуктивность обмотки управления.

Уравнение движения струйной трубки:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = K_{mi} \cdot I - K_{ma} \cdot \alpha - b \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

где J – момент инерции якоря ЭМП;

α – угол поворота якоря ЭМП;

K_{mi} – коэффициент моментной характеристики;

K_{ma} – коэффициент, характеризующий жесткость пружины;

b – коэффициент вязкого трения.

Уравнение расхода жидкости через гидроцилиндр [18; 19]:

$$Q = A \frac{dy}{dt} + \frac{W_0 + A \cdot y}{E} \frac{dP_d}{dt}, \quad (4)$$

где A – эффективная площадь гидроцилиндра;

y – положение штока гидроцилиндра;

W_0 – постоянный объем в камерах гидроцилиндра;

P_d – перепад давления в гидроцилиндре.

Расход жидкости регулируется положением струйной трубки, с учетом насыщения описывается уравнением:

$$Q = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta_Q \left[(1+z) \sqrt{1 - \frac{P_d}{\xi_P}} - (1-z) \sqrt{1 - \frac{P_d}{\xi_P}} \right], & z < z_n \\ \eta_Q \sqrt{1 - \frac{P_d}{\xi_P}}, & z > z_n \end{cases}, \quad (5)$$

где μ_Q – коэффициент расхода;

ξ_P – коэффициент восстановления давления;

z – перемещение струйной трубки;

z_n – перемещение струйной трубки, характеризующее переход в зону насыщения.

Уравнение, описывающее динамику перемещения нагрузки:

$$M \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = A \cdot P_d - R - C_y - b \frac{dy}{dt} - F_{tr}, \quad (6)$$

где M – приведенная к оси штока масса нагрузки;

R – усилие на штоке гидроцилиндра;

b – коэффициент вязкого трения;

C_y – величина позиционной нагрузки;

F_{tr} – сила трения покоя.

Моделирование динамических процессов учитывает особенности совместного использования НЛР с аналоговой исполнительной системой.

АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ ЭГСП НЛР П-ТИПА

Нечеткий логический регулятор П-типа реализует в общем случае нелинейный закон управления (возможна реализация линейного закона). Рассмотрим коррекцию управления простейшим регулятором с семью правилами:

1) если $e = \langle \text{ОБ} \rangle$, то $u = \langle \text{ОБ} \rangle$;

2) если $e = \langle \text{ОС} \rangle$, то $u = \langle \text{ОС} \rangle$;

3) если $e = \langle \text{ОМ} \rangle$, то $u = \langle \text{ОМ} \rangle$;

4) если $e = \langle \text{Н} \rangle$, то $u = \langle \text{Н} \rangle$;

5) если $e = \langle \text{ПМ} \rangle$, то $u = \langle \text{ПМ} \rangle$;

6) если $e = \langle \text{ПС} \rangle$, то $u = \langle \text{ПС} \rangle$;

7) если $e = \langle \text{ПБ} \rangle$, то $u = \langle \text{ПБ} \rangle$,

где $\langle \text{ОБ} \rangle$, $\langle \text{ОС} \rangle$, $\langle \text{ОМ} \rangle$, $\langle \text{Н} \rangle$, $\langle \text{ПМ} \rangle$, $\langle \text{ПС} \rangle$, $\langle \text{ПБ} \rangle$ – лингвистические метки [20]: «отрицательное большое», «отрицательное среднее», «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное среднее», «положительно большое»;

e – ошибка позиционирования;

u – управляющее воздействие.

Представленные правила описывают этапы переходного процесса (разгон, торможение, стабилизацию) с возможностью обозначить требуемое управляющее воздействие на объект управления на каждом этапе переходного процесса.

Изменение положения полюсов входных и выходных термов на весовой функции (рис. 4) в процессе управления приводит к изменению развиваемых усилий на выходном звене, что позволяет сформировать требуемый нелинейный закон регулирования, при этом нелинейная управляющая характеристика НЛР (рис. 5) позволяет компенсировать нелинейность гидравлической исполнительной системы привода.

Специфика функционирования гидравлических исполнительных приводов предполагает наличие большой инерционной нагрузки, в связи с чем на определенных режимах работы возникает перерегулирование (рис. 6) [21].

Нелинейная характеристика НЛР способствует уменьшению перерегулирования системы с 13 до 3 %, что свидетельствует о целесообразности применения НЛР в исполнительном гидроприводе систем с высокими требованиями к качеству переходного процесса.

АНАЛИЗ КОРРЕКЦИИ ЭГСП НЛР ПД-ТИПА

Нелинейный регулятор П-типа может обеспечивать удовлетворительные показатели качества без использования дополнительной информации об объекте, однако в условиях изменяющихся внешних нагрузок математически ожидаемое поведение может отличаться от реального. Положительная нагрузка на объект управления оказывает значительное влияние на скорости перемещения, а также на значения перерегулирования. Ограничение нарастания скорости и ускорения является эффективным методом борьбы с перерегулированием и достижением устойчивости механизма.

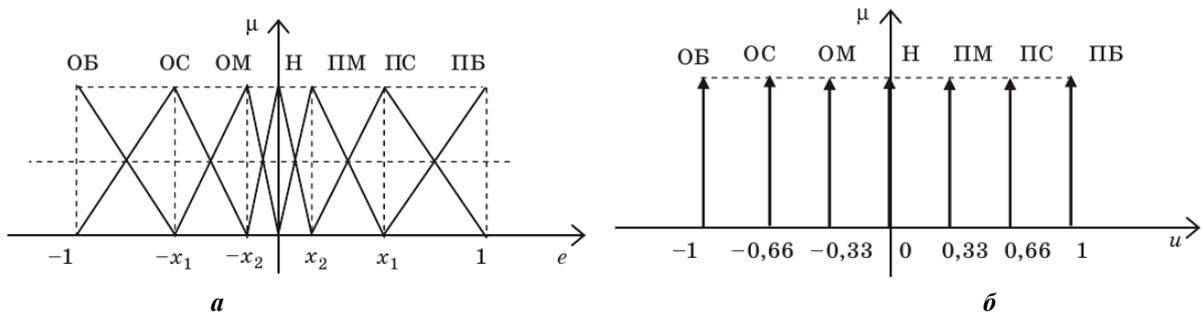


Рис. 4. Входные (а) и выходные термы НЛР (б)

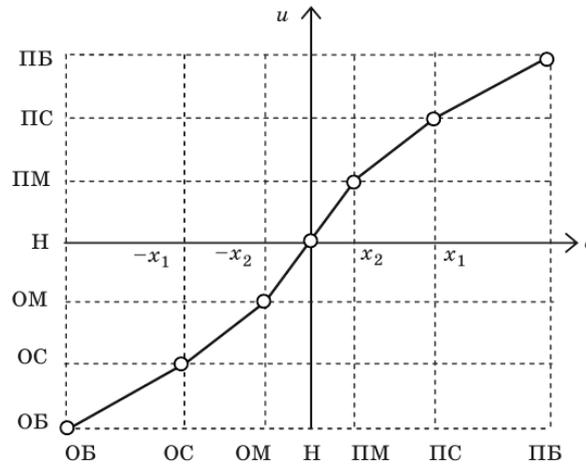


Рис. 5. Управляющая характеристика НЛР П-типа

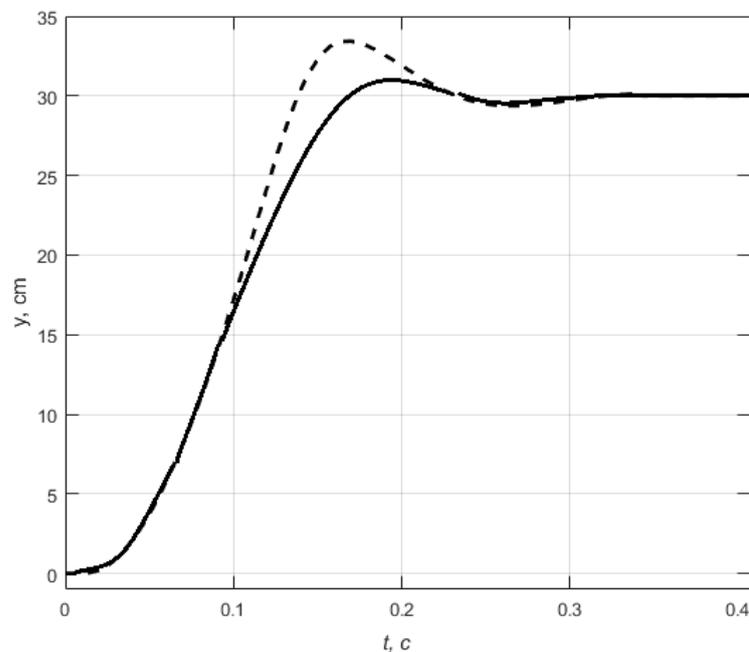


Рис. 6. Переходный процесс системы с НЛР и пропорциональным регулятором

При синтезе НЛР ПД-типа нелинейная зависимость пропорционального коэффициента усиления (П-тип) не играет особой важности, функции демпфирования и усиления берет на себя Д-составляющая НЛР. Для

синтеза НЛР ПД-типа коэффициент усиления увеличивают до достижения границы неустойчивости (периодический переходный процесс) по методике Зиглера – Николса, управляющее воздействие определяется как

Таблица 1. Лингвистические правила закона управления НЛР

(de/dt)*	e*						
	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н
ОС	ОБ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ
ОМ	ОБ	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС
Н	ОБ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ
ПМ	ОС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ
ПС	ОМ	Н	ПМ	ПС	ПБ	ПБ	ПБ
ПБ	Н	ПМ	ПС	РБ	ПБ	ПБ	ПБ

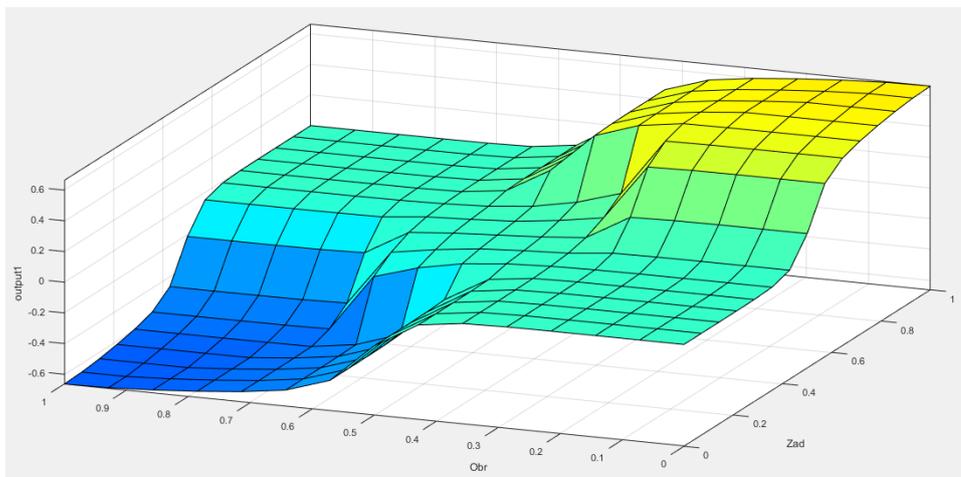


Рис. 7. Управляющая характеристика НЛР ПД-типа

$$u^* = e^* + (de/dt)^*$$

Входные термы и выходной терм определяются 7 функциями принадлежности, что дает 49 управляющих правил, представленных в таблице 1.

Управляющая характеристика НЛР ПД-типа представлена в виде кусочно-линейной гиперплоскости (рис. 7).

При реализации линейной зависимости НЛР ПД-типа система показывает соответствующее поведение традиционного ПД-регулятора. При нелинейной характеристике не удалось достичь значимого улучшения качества переходного процесса по сравнению с ПД-регулятором. По результатам моделирования можно сделать вывод о нецелесообразности применения сложной системы дискретного управления посредством нечеткой логики в случаях управления по нескольким составляющим сигнала управления.

ВЫВОДЫ

По результатам анализа смоделированных переходных процессов исполнительного привода и особенностей функционирования системы управления с НЛР сделаны следующие выводы.

1. Адаптированная методика Зиглера – Николса синтеза НЛР ПИД-типа позволяет синтезировать опти-

мальный регулятор, исключая при этом проведение трудоемких процедур выбора и уточнения параметров регулятора.

2. НЛР П-типа превосходит по параметрам классическое пропорциональное управление и обеспечивает более качественные динамические характеристики исполнительного гидропривода благодаря нелинейной форме управляющей плоскости.

3. При наличии информации об объекте управления эффективность применения НЛР ПД-типа и ПИД-типа в системах позиционирования гидроприводами, по сравнению с классическими регуляторами, не столь очевидна, необходимы дальнейшие исследования.

Обобщая вышеизложенное, можно отметить целесообразность применения НЛР в системе управления исполнительными гидроприводами систем с высокими требованиями к качеству переходного процесса, а при отсутствии информации об условиях эксплуатации НЛР является универсальным и эффективным инструментом достижения требуемых параметров переходных процессов при позиционировании исполнительного гидропривода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ursu I., Tecuceanu G., Toader A., Calinoiu C. Switching neuro-fuzzy control with antisaturating logic // Proceedings

- of the Romanian Academy Series A – Mathematics Physics Technical Sciences information Science. 2011. Vol. 12. № 3. P. 231–238.
2. Lail W.Y., Onn N., Hing Tang C.H. Position Control of Hydraulic Actuators Using Fuzzy Pulse Width Modulation // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 735. P. 294–298.
 3. Li B., Yan J., Guo G., Zeng Y., Luo W. High performance control of hydraulic excavator based on fuzzy-PI soft-switch controller // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*. 2011. Vol. 2. P. 676–679.
 4. Бураков М.В., Кирпичников А.П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.
 5. Карпович Д.С., Шумский А.Н., Сарока В.В. Система управления беспилотным летательным аппаратом с применением теории нечетких множеств // *Труды БГТУ*. № 6. Физико-математические науки и информатика. 2016. № 6. С. 111–116.
 6. Бураков М.В., Коновалов А.С. Синтез нечетких логических регуляторов // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 1. С. 22–37.
 7. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
 8. Голосовский М.С., Богомолов А.В., Теребов Д.С., Евтушенко Е.В. Алгоритм настройки системы нечеткого логического вывода типа Мамдани // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Математика. Механика. Физика. 2018. Т. 10. № 3. С. 19–29.
 9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems Man Cybernet*. 1985. Vol. 15. № 1. P. 116–132.
 10. Матковская М.О. Исследование алгоритмов нечеткого вывода в моделях принятия решений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2009. № 3. С. 240–244.
 11. Шилин Д.В., Грибков А.М. Исследование закона управления позиционированием каретки бесштокового пневматического привода на базе нечеткого регулятора // *Вестник Московского энергетического института*. 2015. № 3. С. 5–10.
 12. Balea S., Halanay A., Ursu I. New results on the problem of the stabilization of equilibria for models of electrohydraulic servactuators // *Discrete and continuous dynamical systems – Series S*. 2013. Vol. 6. № 6. P. 1551–1567.
 13. Kalyoncu M., Haydim M. Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage // *Mechatronics*. 2009. Vol. 19. № 6. P. 847–858.
 14. Sidhom L., Chihi I., Brun X., Bideaux E., Thomasset D. On Nonlinear Robust Adaptive Control: Application on Electro-Hydraulic Valve System // *Studies in Computational intelligence*. 2016. Vol. 635. P. 575–594.
 15. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. 557 с.
 16. Месропян А.В. Особенности коррекции электрогидравлических следящих приводов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2009. № 1. С. 134–144.
 17. Целищев В.А., Целищев Д.В. Гидравлическая машина со струйно-кавитационным регулированием // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2006. Т. 7. № 2. С. 161–165.
 18. Месропян А.В., Галлямов Ш.Р., Целищев В.А. Исследование влияния нелинейностей типа «люфт» и «гистерезис» на гидравлический рулевой привод летательного аппарата // *Проблемы и перспективы авиационного двигателестроения*. Уфа: УГАТУ, 2007. С. 32–37.
 19. Mesropyan A.V., Sharipov R.R. Mathematical modeling of transient processes in the jet pipe servomotor with a dual-mode controller // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 168–172.
 20. Шишкин Д.О., Сумачакова Ч.А., Степанов А.Г. Разработка и реализация модели экспертной системы на основе нечеткой логики // *Актуальные проблемы экономики и управления*. 2018. № 1. С. 75–80.
 21. Прокопьев А.П. Особенности синтеза регулятора электрогидравлической системы управления // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 307–317.

REFERENCES

1. Ursu I., Tecuceanu G., Toader A., Calinoiu C. Switching neuro-fuzzy control with antisaturating logic. *Proceedings of the Romanian Academy Series A – Mathematics Physics Technical Sciences information Science*, 2011, vol. 12, no. 3, pp. 231–238.
2. Lail W.Y., Onn N., Hing Tang C.H. Position Control of Hydraulic Actuators Using Fuzzy Pulse Width Modulation. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 735, pp. 294–298.
3. Li B., Yan J., Guo G., Zeng Y., Luo W. High performance control of hydraulic excavator based on fuzzy-PI soft-switch controller. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 2011, vol. 2, pp. 676–679.
4. Burakov M.V., Kirpichnikov A.P. Fuzzy PID Controller for nonlinear plant. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 242–244.
5. Karpovich D.S., Shumskiy A.N., Saroka V.V. Control system of an unmanned aerial vehicle using the theory of fuzzy sets. *Trudy BGTU. № 6. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika*, 2016, no. 6, pp. 111–116.
6. Burakov M.V., Konovalov A.S. Fuzzy Controllers Design. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2011, no. 1, pp. 22–37.
7. Gostev V.I. *Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Designing fuzzy regulators for automatic control systems]. Sankt Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 416 p.
8. Golosovskiy M.S., Bogomolov A.V., Terebov D.S., Evtushenko E.V. Algorithm to adjust fuzzy inference system of Mamdani type. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Fizika*, 2018, vol. 10, no. 3, pp. 19–29.

9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems Man Cybernet*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 116–132.
10. Matkovskaya M.O. Research of algorithms of the fuzzy conclusion in decision-making models. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2009, no. 3, pp. 240–244.
11. Shilin D.V., Gribkov A.M. Study of the law positioning rodless pneumatic actuators based on fuzzy regulator. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2015, no. 3, pp. 5–10.
12. Balea S., Halanay A., Ursu I. New results on the problem of the stabilization of equilibria for models of electrohydraulic servoactuators. *Discrete and continuous dynamical systems – Series S*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 1551–1567.
13. Kalyoncu M., Haydim M. Mathematical modelling and fuzzy logic based position control of an electrohydraulic servosystem with internal leakage. *Mechatronics*, 2009, vol. 19, no. 6, pp. 847–858.
14. Sidhom L., Chihi I., Brun X., Bideaux E., Thomasset D. On Nonlinear Robust Adaptive Control: Application on Electro-Hydraulic Valve System. *Studies in Computational intelligence*, 2016, vol. 635, pp. 575–594.
15. Olsson G., Piani D. *Tsifrovye sistemy avtomatizatsii i upravleniya* [Digital Automation and Control Systems]. Sankt Petersburg, Nevskiy Dialekt Publ., 2001. 557 p.
16. Mesropyan A.V. Peculiarities of electrohydraulic servo drive correction. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 1, pp. 134–144.
17. Tselishchev V.A., Tselishchev D.V. State and development problems of the jet hydraulic control-surface actuators. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 7, no. 2, pp. 161–165.
18. Mesropyan A.V., Gallyamov Sh.R., Tselishchev V.A. Investigation of the influence of non-linearities of “play” and “hysteresis” on the aircraft’s hydraulic steering gear. *Problemy i perspektivy aviatsionnogo dvigatelestroeniya*. Ufa, UGATU Publ., 2007, pp. 32–37.
19. Mesropyan A.V., Sharipov R.R. Mathematical modeling of transient processes in the jet pipe servoactuator with a dual-mode controller. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 168–172.
20. Shishkin D.O., Sumachakova Ch.A., Stepanov A.G. Development and implementation of model expert system based on fuzzy logic. *Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniya*, 2018, no. 1, pp. 75–80.
21. Prokopev A.P. Peculiarities of the synthesis of controller electro-hydraulic control system. *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014*. Moscow, Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN Publ., 2014, pp. 307–317.

ON THE EFFICIENCY OF FUZZY LOGIC APPLICATIONS IN HYDRAULIC ACTUATOR CONTROL SYSTEMS

© 2019

A.V. Mesropyan, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor,
professor of Chair of Applied Hydromechanics

R.R. Sharipov, postgraduate student of Chair of Applied Hydromechanics
Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

Keywords: steering machine; control systems; fuzzy logic controller; mathematical modeling; electro-hydraulic actuator; fuzzy logic; PID controller.

Abstract: The paper considers the possibility to apply intelligent controllers as setting devices and adjusters of hydraulic actuators of different purpose. The authors proposed a method of positioning control of a hydraulic steering actuator based on a fuzzy logic controller (FLC). FLC corrective action is implemented based on three input parameters similar to the traditional proportional-integral-derivative controller. To evaluate the efficiency of FLC application in the system of hydraulic actuator positioning, the authors developed a mathematical model describing the work of a complex electro-hydraulic system including electromechanical converter, fluidic hydraulic actuator, and hydraulic cylinder actuator. Non-linear mathematical model of an electro-hydraulic servo is implemented in MatLab Simulink software; the proportional-integral-derivative FLC was formed using the Fuzzy Logic Toolbox means. The authors set the FLC parameters using the linguistic rule-based expert system and the change in the membership function form, varying which it is possible to get linear and non-linear output characteristics. The obtained piecewise-linear hyperplane of FLC controlling characteristic determining the non-linear nature of correction theoretically allows getting the improved quality of transient processes. Using the numerical experience method, the authors assessed the efficiency of control algorithms with traditional controllers and the equivalent fuzzy controllers within the known mathematical model of a control object (electro-hydraulic follower actuator). When synthesizing the proportional-type FLC, the authors formed the nonlinear control law which allowed compensating the nonlinearity of the hydraulic actuator system. When implementing the linear dependence of the proportional-integral FLC, the system demonstrates the behavior attributable to the traditional controller. Generated FLC with nonlinear characteristics did not show significant quality improvement of the transient process compared to the traditional controller. Based on the received results, the authors concluded the reasonability of FLC application within the control systems with hydraulic actuating elements.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРАВКИ НА ЭНЕРГО-СИЛОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВРЕЗНОГО КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ

© 2019

С.В. Мурашкин, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика»
А.С. Селиванов, кандидат технических наук, доцент,
заместитель ректора – директор Института машиностроения
В.И. Малышев, кандидат технических наук, профессор
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: ультразвуковая правка; силы шлифования; цикл шлифования; мощность шлифования; правящий инструмент.

Аннотация: Выполнены экспериментальные исследования влияния ультразвуковой правки шлифовальных кругов на энерго-силовые показатели процесса шлифования. Показана степень влияния ультразвуковой правки на показатели врезного круглого шлифования в автоматическом цикле обработки. Установлено, что ультразвуковая правка шлифовальных кругов правящим инструментом, совершающим колебания с частотой порядка 22 кГц и амплитудой 10...15 мкм, позволяет в 4–5 раз снизить опорную поверхность рельефа шлифовального круга за счет увеличения количества абразивных зерен с относительно острыми микроромками и микротрещинами. Показано, что особенности формирования рельефа рабочей поверхности шлифовального круга при ультразвуковой правке обеспечивают снижение нормальной составляющей силы резания почти на 30 % в течение всего периода стойкости шлифовального круга, а также позволяют повысить стойкость круга примерно в 1,5...2 раза. Отмечено, что при ультразвуковой правке за счет периодического ударного нагружения абразивные зерна разрушаются, образуя многочисленные режущие кромки и микротрещины при меньшей, чем после обычной правки (ОП), глубине правки. В результате интерференции синусоидальных траекторий вершин алмазов правящего инструмента на шлифовальном круге формируется определенный рельеф в виде впадин и выступов, что снижает относительную опорную поверхность круга. Наличие двух составляющих рельефа объясняет более высокую режущую способность шлифовального инструмента по сравнению с обычной правкой.

ВВЕДЕНИЕ

Достижимые показатели качества шлифованных поверхностей деталей в условиях крупносерийного и массового производства во многом определяются режущей способностью шлифовальных кругов в течение периода стойкости [1–3]. Ультразвуковая правка (УЗП) шлифовального круга на операциях абразивной обработки является одним из перспективных способов повышения режущей способности шлифовальных кругов [4–6]. Как отмечено в работах [6–8], УЗП формирует на поверхности шлифовального круга особый микрорельеф. Ударная нагрузка правящего инструмента создает на абразивных зернах значительное количество микросколов, позволяющих удалять стружку при шлифовании с меньшими усилиями, чем при обычной правке (ОП) [9–11].

Цель работы – экспериментальное определение влияния ультразвуковой правки на показатели врезного шлифования с автоматическим циклом обработки и выявление динамики их изменения в течение периода стойкости круга.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование влияния УЗП шлифовального круга на энерго-силовые показатели шлифования выполняли на станке ЗТ161 с автоматической врезной подачей по методике, изложенной в работе [9].

Правку круга как с наложением ультразвука, так и без него осуществляли на специальном комплексе для ультразвуковой правки, состоящем из ультразвукового генератора модели УЗГ-0,6/22-М и ультразвукового устройства с ультразвуковой колебательной системой на

базе магнитострикционного преобразователя и волновода. В качестве правящего инструмента использовали алмазную четырехкристальную гребенку (ТУ 8-037-230-78).

Состояние поверхности круга количественно оценивали по значению коэффициента режущей способности шлифовального круга K_Q , вычисляемого по формуле [12]

$$K_Q = \frac{Q_M}{P_{yc}},$$

где Q_M – интенсивность съема металла в цикле (отношение объема металла, срезанного с заготовки за цикл обработки, ко времени цикла), мм³/с;

P_{yc} – средняя за цикл радиальная составляющая силы резания, Н.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важным параметром, характеризующим энергоемкость любого процесса механической обработки, является сила резания [13; 14]. На рис. 1 представлены данные по изменению составляющих сил резания в цикле перемещения шлифовальной бабки после различных способов правки шлифовальных кругов. На рис. 1 видно, что процесс ультразвуковой правки способствует в большей степени снижению нормальной составляющей силы резания P_y . Так, сила P_y при шлифовании кругом после УЗП оказалась в два раза ниже силы P_y при шлифовании кругом после ОП. Снижение нормальной составляющей силы резания при шлифовании способствует уменьшению упругой деформации технологической

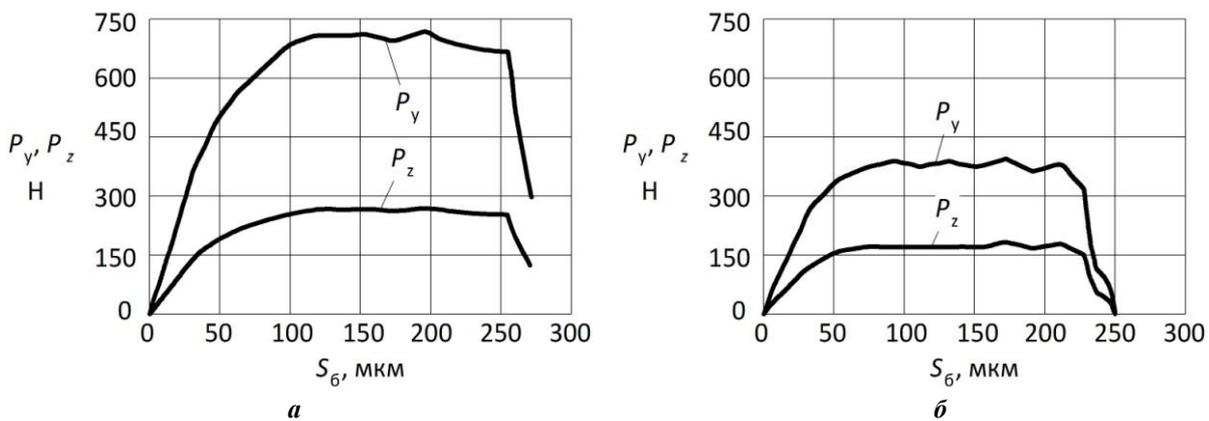


Рис. 1. Зависимости сил резания при шлифовании от перемещения шлифовальной бабки $S_б$: а – ОП; б – УЗП

системы и, следовательно, повышению точности обработки. На рис. 1 видно, что после УЗП шлифовальная бабка с кругом переместилась на 250 мкм для полного снятия припуска на шлифование в 240 мкм, а после ОП шлифовальная бабка переместилась на 270 мкм.

Снижение силы резания при шлифовании кругом, прошедшим УЗП, обусловлено спецификой формирования его рельефа. Правящий инструмент, совершая механические колебания небольшой амплитуды (порядка 10...15 мкм) с частотой 22 кГц, наносит по абразивным зернам микроудары с высокой интенсивностью, обуславливая их хрупкое разрушение и формирование на них множества микросколов [7]. Так, по данным работы [7], ультразвуковая правка снизила относительную опорную поверхность рельефа шлифовального круга в 4...5 раз по сравнению с ОП.

Обеспечение стабильности параметров качества шлифованных поверхностей во многом зависит от состояния рабочей поверхности шлифовального круга. При обработке круг засаливается, а его абразивные зерна истираются и затупляются. Поэтому важно установить, каким образом способ правки круга влияет на энерго-силовые показатели шлифования в течение периода стойкости круга.

На рис. 2 представлены данные об изменении составляющих силы резания P_y и P_z в течение периода

стойкости круга. Как следует из рис. 2, составляющая силы резания P_y при шлифовании кругом после УЗП оказалась меньше, чем при шлифовании кругом после ОП, на протяжении всего периода стойкости шлифовального круга. Это говорит о том, что УЗП позволяет не просто получить на поверхности шлифовального круга разовый рельеф непосредственно после правки, а создать его на протяжении всего периода стойкости круга, т. е. до следующей правки. Здесь можно предположить, что процесс УЗП способствует не только формированию множества режущих микрокромки за счет ударного разрушения абразивных зерен, но и зарождению в них микротрещин, которые в процессе шлифования формируют микросколы на абразивных зернах, повышая тем самым его режущую способность [7; 17]. В таблице 1 представлены данные о мощности шлифования образцов кругом после ОП и УЗП в течение всего периода стойкости шлифовального круга.

Преимущество в виде соотношения мощности шлифования ОП/УЗП при шлифовании кругом, прошедшим УЗП, сохраняется в течение всего периода стойкости круга.

На рис. 3 показана динамика изменения соотношения составляющих силы резания, характеризующих режущую способность шлифовального круга.

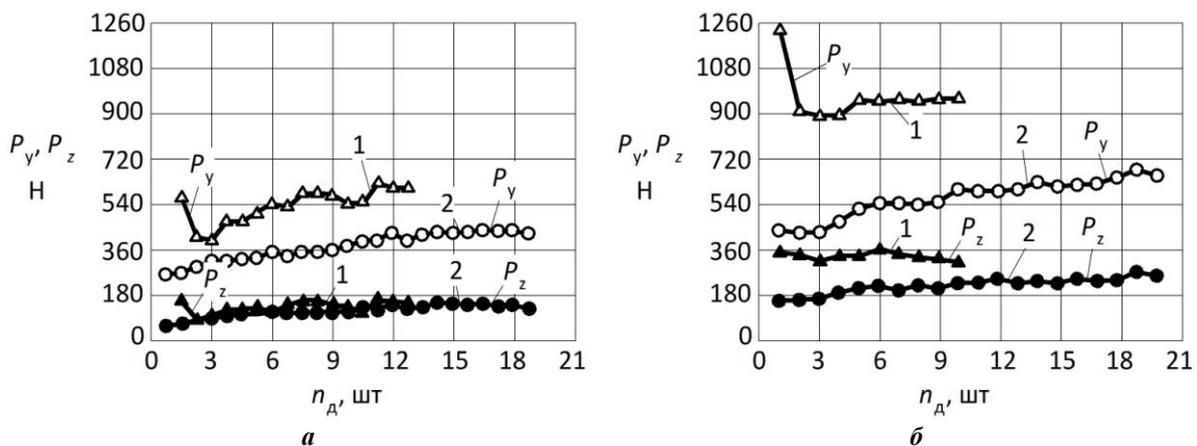


Рис. 2. Зависимости сил резания при шлифовании в течение периода стойкости круга:

а – правка новым ПИ; б – правка изношенным ПИ.

$n_д$ – количество прошлифованных образцов; 1 – силы после ОП; 2 – силы после УЗП

Таблица 1. Значения мощности шлифования при различных способах правки

Порядковый номер шлифуемого образца	Мощность шлифования N , кВт		
	ОП	УЗП	ОП/УЗП, %
1	7,96	5,48	145
8	8,65	6,78	127
12	8,60	6,90	120
17	8,54	7,16	119
25	-	7,13	-

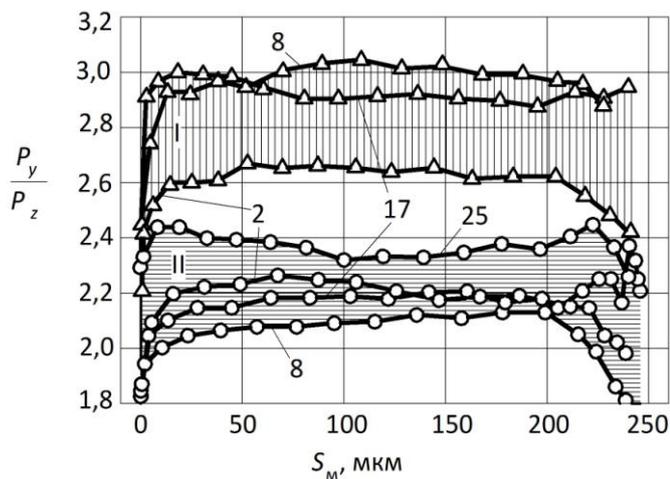


Рис. 3. Зависимости отношения сил резания за период стойкости круга: I – ОП; II – УЗП. S_m – съем припуска; 2, 8, 17, 25 – порядковый номер прошлифованного образца

Согласно рис. 3, величина P_y/P_z имея небольшие колебания ($\pm 0,06$), закономерно возрастает в связи с затуплением круга, независимо от метода правки. Так, при шлифовании 2, 8 и 17-го образцов значения P_y/P_z возрастают в пределах от 2,6 до 3,0 после ОП и от 2,1 до 2,2 после УЗП круга. Как видно, в течение всего периода стойкости круга величина P_y/P_z остается меньшей при шлифовании с УЗП круга. Это позволяет сделать вывод о более высокой режущей способности круга после УЗП.

На рис. 4 отображены изменения режущей способности шлифовального круга, оцениваемые коэффициентом K_Q , вычисленным по формуле (1). Физический смысл коэффициента режущей способности шлифовального круга K_Q заключается в интенсивности снятия кругом определенного объема металла, приходящегося на единицу нормальной составляющей P_y силы шлифования [18–20].

Как следует из рис. 4, величина K_Q после УЗП в течение всего периода стойкости примерно в 1,5 раза выше по сравнению с обычной правкой. Обращает на себя внимание низкое значение K_Q при шлифовании первого после ОП образца. Это характерно и для повышенных значений P_y и P_z (рис. 2) и объясняется наличием на РПК большого числа абразивных зерен с притупленными вершинами и их интенсивным приработочным износом в начальной фазе периода стойкости круга.

В целом анализ результатов, приведенных на рис. 2–4 и в таблице 1, дает основание сделать вывод о более высокой режущей способности круга после УЗП, по сравнению с ОП, и потенциальной возможности увеличения производительности шлифования.

Улучшение основных показателей врезного шлифования за счет УЗП круга объясняется особенностями формирования рельефа РПК при правке. При шлифовании в режиме затупления круга, характерном для автоматизированного массового производства с обычной правкой, на абразивных зернах постепенно формируются площадки износа. Относительно медленное увеличение износа зерен вплоть до некоторой критической величины в течение периода стойкости круга позволяет обеспечивать требуемые уровень и стабильность размеров и качество шлифованных поверхностей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Правка шлифовальных кругов на операциях абразивной обработки с наложением на правящий инструмент ультразвуковых колебаний с частотой порядка 22 кГц и амплитудой 10...15 мкм позволяет в 4–5 раз снизить опорную поверхность шлифовального круга. Специфика формирования рельефа шлифовального круга обеспечивает снижение нормальной составляющей силы резания почти на 30 % в течение всего периода его стойкости. Кроме того, УЗП позволяет повысить

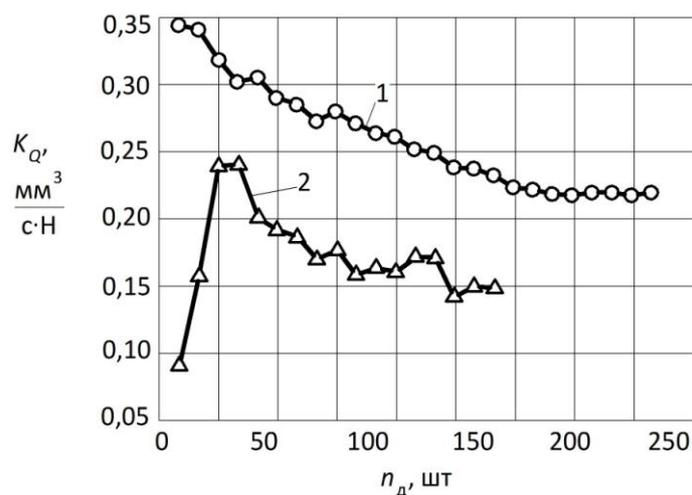


Рис. 4. Коэффициент режущей способности круга K_Q за период его стойкости:
1 – ОП; 2 – УЗП. n_{δ} – число шлифованных образцов после правки круга

стойкость круга примерно в 1,5...2 раза. Как показали результаты исследований, УЗП круга обеспечивает меньшее, по сравнению с ОП, отношение составляющих сил резания на всем периоде стойкости круга.

Таким образом, на основании результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что ультразвуковая правка шлифовальных кругов обеспечивает снижение энергоемкости процесса шлифования за счет управляемого формирования режущей способности шлифовального круга. При этом влияние ультразвуковой правки на энерго-силовые показатели процесса шлифования сохраняется в течение периода стойкости круга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hashimoto F., Gallego I., Oliveira J.F.G., Barrenetxea D., Takahashi M., Sakakibara K., Stalfelt H.D., Stadt G., Ogawa K. Advances in centerless grinding technology // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2012. Vol. 61. № 2. P. 747–770.
- Wegener K., Bleicher F., Krajnik P., Hoffmeister H.W., Brecher C. Recent developments in grinding machines // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2017. Vol. 66. № 2. P. 779–802.
- Zhanga Y.Z., Xu X.P. Influence of surface topography evolution of grinding wheel on the optimal material removal rate in grinding process of cemented carbide // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2019. Vol. 80. P. 130–143.
- Palmer J., Ghadbeigi H., Novovic D., Curtis D. An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing // Journal of Manufacturing Processes. 2018. Vol. 31. P. 348–355.
- Kadivara M., Azarhoushang B., Shamaray S., Krajnik R. The effect of dressing parameters on micro-grinding of titanium alloy // Precision Engineering. 2018. Vol. 51. P. 176–185.
- Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
- Малышев В.И., Мурашкин С.В., Комлев Р.В. Формирование рабочей поверхности шлифовального круга при ультразвуковой правке // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 2. С. 40–43.
- Малышев В.И., Мурашкин С.В., Селиванов А.С. Ультразвуковая правка, как средство повышения эффективности шлифования в условиях массового производства // Сборник научных трудов SWorld. 2012. Т. 7. № 3. С. 52–60.
- Малышев В.И., Попов А.Н., Мурашкин С.В. Влияние ультразвуковой правки круга на качество шлифованных поверхностей в условиях автоматизированного производства // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 101–105.
- Yanga Z., Zhang S., Zhang Z., Zhang Y., Hu J., Li K., Zhao B., Zhang Y. Experimental research on laser-ultrasonic vibration synergic dressing of diamond wheel // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 269. P. 182–189.
- Wegener K., Hoffmeister H.W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W.C., Rabiey M. Conditioning and monitoring of grinding wheels // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2011. Vol. 60. № 2. P. 757–777.
- Лурье Г.Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
- Malkin S., Guo C. Grinding Technology. Theory and application of machining with abrasives. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008. 372 p.
- Fedoseev O.B. The Effect of Noise on Grinding Cycles // Journal of Engineering for Industry. 1991. Vol. 113. № 4. P. 474–476.
- Богачев Ю.Ю., Бабенко М.Г. Исследование стойкости рабочей поверхности шлифовального круга и правящего алмазного инструмента // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2015. Т. 17. № 2. С. 21–29.
- Малышев В.И., Мурашкин С.В. Определение количества объемно-разрушаемых абразивных зёрен шлифовального круга при ультразвуковой правке //

- Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 3. С. 60–65.
17. Schwarz K.E. Zerspanungsvorgauge und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2001. Vol. 123. P. 319–324.
 18. Tawakoli T., Westkaemper E., Rasifard A. Ultrasonic Assisted Dressing of Vitrified CBN Grinding Wheel // 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Liverpool: Liverpool University, 2007. P. 121–125.
 19. Marinescu I.D., Rowe W.R., Dimitrov B., Ohmori H. *Tribology of abrasive machining processes*. New York: William Andrew, 2012. 763 p.
 20. Linke B., Klocke F. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels // *International journal of machine tools and manufacture*. 2010. Vol. 50. № 6. P. 552–558.
- REFERENCES**
1. Hashimoto F., Gallego I., Oliveira J.F.G., Barrenetxea D., Takahashi M., Sakakibara K., Stalfelt H.D., Staadt G., Ogawa K. Advances in centerless grinding technology. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2012, vol. 61, no. 2, pp. 747–770.
 2. Wegener K., Bleicher F., Krajnik P., Hoffmeister H.W., Brecher C. Recent developments in grinding machines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, no. 2, pp. 779–802.
 3. Zhanga Y.Z., Xu X.P. Influence of surface topography evolution of grinding wheel on the optimal material removal rate in grinding process of cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, vol. 80, pp. 130–143.
 4. Palmer J., Ghadbeigi H., Novovic D., Curtis D. An experimental study of the effects of dressing parameters on the topography of grinding wheels during roller dressing. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, vol. 31, pp. 348–355.
 5. Kadivara M., Azarhoushang B., Shamaray S., Krajnik R. The effect of dressing parameters on micro-grinding of titanium alloy. *Precision Engineering*, 2018, vol. 51, pp. 176–185.
 6. Kiselev E.S. *Intensifikatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki ratsionalnym ispolzovaniem energii ultrazvukovogo polya* [Intensification of the processes of mechanical treatment by rational use of the ultrasonic field energy]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2003. 186 p.
 7. Malyshev V.I., Murashkin S.V., Komlev R.V. The formation of the grinding circle working surface at ultrasonic editing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 2, pp. 40–43.
 8. Malyshev V.I., Murashkin S.V., Selivanov A.S. Ultrasonic dressing of the grinding circle, as means of increase of efficiency of grinding in the conditions of mass production. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 52–60.
 9. Malyshev V.I., Popov A.N., Murashkin S.V. Effect of ultrasound on edit the terms of quality polished surfaces under automated production. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 101–105.
 10. Yanga Z., Zhang S., Zhang Z., Zhang Y., Hu J., Li K., Zhao B., Zhang Y. Experimental research on laser-ultrasonic vibration synergic dressing of diamond wheel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, vol. 269, pp. 182–189.
 11. Wegener K., Hoffmeister H.W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W.C., Rabiey M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2011, vol. 60, no. 2, pp. 757–777.
 12. Lure G.B. *Shlifovanie metallov* [Metal grinding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 172 p.
 13. Malkin S., Guo C. *Grinding Technology. Theory and application of machining with abrasives*. 2nd ed. New York, Industrial Press Publ., 2008. 372 p.
 14. Fedoseev O.B. The Effect of Noise on Grinding Cycles. *Journal of Engineering for Industry*, 1991, vol. 113, no. 4, pp. 474–476.
 15. Bogachev Yu. Yu., Babenko M.G. Study of the resistance of the working surface of the grinding wheel and dressing diamond tool. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 21–29.
 16. Malyshev V.I., Murashkin S.V. Definition of quantity volume-destroyed abrasive grains of the grinding circle at to ultrasonic editing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 3, pp. 60–65.
 17. Schwarz K.E. Zerspanungsvorgauge und Schleifergebnis beim Abrichten von Grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2001, vol. 123, pp. 319–324.
 18. Tawakoli T., Westkaemper E., Rasifard A. Ultrasonic Assisted Dressing of Vitrified CBN Grinding Wheel. 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Liverpool, Liverpool University Publ., 2007, pp. 121–125.
 19. Marinescu I.D., Rowe W.R., Dimitrov B., Ohmori H. *Tribology of abrasive machining processes*. New York, William Andrew Publ., 2012. 763 p.
 20. Linke B., Klocke F. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels. *International journal of machine tools and manufacture*, 2010, vol. 50, no. 6, pp. 552–558.

**THE STUDY OF INFLUENCE OF ULTRASONIC DRESSING
ON THE ENERGY-FORCE INDICATORS OF CYLINDRICAL PLUNGE GRINDING**

© 2019

S.V. Murashkin, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair “Nanotechnologies, Material Science and Mechanics”

A.S. Selivanov, PhD (Engineering), Associate Professor,
Deputy Rector – Director of Mechanical Engineering Institute

V.I. Malyshev, PhD (Engineering), Professor
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: ultrasonic dressing; grinding forces; grinding cycle; grinding power; dressing tool.

Abstract: The authors carried out the experimental study of the influence of ultrasonic dressing of grinding wheels on the energy-force indicators of the grinding process. The study showed the degree of ultrasonic dressing influence on the cylindrical plunge grinding indicators in the automatic cycle of processing. The authors identified that ultrasonic dressing of grinding wheels with a dressing tool executing vibrations with the frequency of 22 kHz and the amplitude of 10...15 μm allows decreasing the supporting face of a grinding wheel texture 4–5 times through the increase of the abrasive grains quantity with the relatively sharp micro-edges and microcracks. It is shown, that the distinctive features of formation of the grinding wheel working surface texture during ultrasonic dressing ensure the reduction of cutting perpendicular force about by 30 % during the whole period of grinding wheel life as well as allows increasing the wheel life 1.5...2 times. It is noted that during the ultrasonic dressing, the abrasive grains break due to the repetitive impact loading creating numerous cutting edges and microcracks at the less dressing depth than after traditional dressing. In the result of interference of sinusoidal trajectories of diamond points of a dressing tool, on a grinding wheel, a certain cammed texture forms, what decreases the wheel bearing surface. The existence of two texture components explains the higher cutting power of a grinding tool compared to the traditional dressing.

ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ПОЛИУРЕТАНА ПРИ ПРОТЕКАНИИ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

© 2019

В.С. Язубов, аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»

А.В. Щегольков, кандидат технических наук,

доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов (Россия)

Ключевые слова: полиуретан; удельное объемное сопротивление; композит; наномодифицированный полиуретан; многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ); саморегулирование температуры.

Аннотация: Разработка новых типов функциональных материалов на основе модифицированных полимеров является перспективной научной задачей. Модифицированные полимеры широко применяются в радиоэлектронике и электротехнике. Наиболее эффективным методом, позволяющим изменять не только физико-механические, но и электрофизические свойства полимеров, является введение в их структуру углеродных наноматериалов – наномодификаторов. Углеродные наноструктуры, а также типы полимеров очень многообразны, поэтому необходимо изучить и оценить влияние на свойства полимеров морфологии углеродных наноструктур и концентрации вводимого модификатора.

В связи с этим работа посвящена изучению влияния углеродных наноструктур в составе полиуретана, обладающих различной морфологией, на теплотыделения при протекании постоянного электрического тока.

С этой целью проведены экспериментальные исследования полиуретановых композитов с различным массовым содержанием (масс. %) многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ), синтезированных на разных катализаторах. Проведены исследования электропроводящих свойств наномодифицированных композитов при различной концентрации двух типов МУНТ. В ходе исследования выявлено, что самым низким удельным объемным электрическим сопротивлением ($3,5 \times 10^4 \Omega \times \text{см}$) обладает полиуретан, модифицированный 7 масс. % МУНТ, синтезированными на $\text{Fe-Co}/_{2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$. Бесконтактным методом измерения исследовано распределение температурного поля на поверхности образцов наномодифицированных композитов при подключении их к источнику постоянного тока. Установлено, что самым равномерным распределением температурного поля обладают образцы нагревателей, изготовленные на основе полиуретанов, модифицированных 7 масс. % МУНТ. В ходе исследования обнаружен эффект токовой флуктуации, что можно объяснить хаотичной электропроводящей сетью, образованной МУНТ в полиуретане.

Выявлено, что различное массовое содержание МУНТ в композите оказывает влияние на распределение температурного поля при подаче постоянного электрического напряжения, что следует из особенностей распределения углеродных наноструктур в матрице полимера.

ВВЕДЕНИЕ

Полиуретаны (ПУ) являются перспективными полимерами, которые могут быть использованы для создания конструкционных и функциональных материалов. В 1930-е гг. американский химик У.Х. Карозерс провел исследования по синтезу ПУ, на основании которых в концерне «Фарбениндустри» (Германия) в 1937 г. начались работы по созданию полимерных материалов, подобных ПУ [1]. С тех пор разработана широкая номенклатура ПУ различного технического и промышленного назначения, к которым относятся и двухкомпонентные ПУ – компаунды.

Высокие механические характеристики компаундов позволяют использовать их в качестве основы деталей, получаемых с помощью технологии литья в формы. В работе [2] приведен обзор ПУ компаундов «Пор-А-Молд», с помощью которых изготавливают формы для отливки сувенирной продукции. ПУ композиты широко используются в качестве основы антикоррозионных лакокрасочных покрытий [3]. Это обусловлено тем, что по сравнению с другими покровными материалами ПУ компаунды более безопасны, так как содержат малое количество легко летучих соединений [4].

Применение углеродных наноматериалов в составе ПУ композитов позволяет улучшать механические и электрофизические свойства последних. В работе [5]

исследовали ПУ на водной основе, модифицированный оксидом графена (ОГ). ОГ получали методом Хамерса [6] из интеркалированного графитового соединения, которое представляет собой водный раствор. Водный раствор ОГ смешивали с льняным маслом и перетирали с высоким усилием сдвига, в результате чего получили эмульсию, которую вводили в водный ПУ и перемешивали с помощью магнитной мешалки. Полученную смесь наносили на металлические поверхности и подвергали термической обработке в печи при 110°C в течение 30 мин. После чего поверхности, покрытые ПУ с ОГ, подвергали различным испытаниям. Установлено, что поврежденные участки покрытия способны самовосстанавливаться, и модификация ПУ оксидом графена усиливает антикоррозионные свойства. В [7] исследовано влияние ультразвуковой обработки на структуру нанонаполнителя в ПУ композитах, модифицированных углеродными нанотрубками (УНТ). Доказано, что изменение структуры наполнителя приводит к усилению переноса приложенного механического напряжения от полимерной матрицы к наполнителю, как следствие – к упрочнению полимера в целом. В [8] исследовано влияние структуры УНТ, синтезированных на $\text{Ni}/_{0,16}\text{MgO}$, $\text{Ni}/_{0,3}\text{MgO}$, $\text{Ni}/_{0,5}\text{MgO}$ катализаторах, на радиопоглощающие свойства ПУ «Силагерм», а также приведена иерархическая структура полученных

композитов. В работе [9] изучены полиуретановые композиты, модифицированные фуллереном C60 (0,1–0,5 масс. %). С помощью диэлектрической спектроскопии установлено, что при увеличении массовой концентрации фуллеренов в ПУ увеличивается температура стеклования, что ведет к потере эластичности материала.

Введение в ПУ различных типов наноматериалов приводит к возникновению электропроводящих свойств [10; 11]. Авторами работы [12] были изготовлены электропроводящие и эластичные нити на основе термопластичного ПУ (ТПУ) с помощью технологии последовательного декорирования многостенными (МУНТ) и одностенными углеродными нанотрубками (ОУНТ). Процесс изготовления нитей базировался на электро-спиннинговой технологии с применением ультразвука и намотки. Использование двух типов УНТ для декорирования ТПУ нити привело к повышению электропроводности нитей до $13 \text{ См} \times \text{см}^{-1}$.

Отдельной областью научных исследований является изучение влияния применения углеродных наноструктур в качестве активного компонента для полимерных электронагревателей [13–15]. В качестве основы электронагревательных элементов могут быть использованы различные полимерные матрицы. В [16] описан гибкий электронагреватель, который представляет собой подложку из полиэтилентерефталата толщиной 180 мкм, на поверхность которой наносили пленку из УНТ. На поверхность пленки из УНТ приклеивали медные электроды толщиной 20 мкм, необходимые для подключения нагревателя к постоянному электрическому току. В [17] в качестве основы для нагревателя использовали слой УНТ, на который наносили полидиметилсилоксан (ПДМС). После полимеризации к полученному нагревателю подключение осуществлялось с помощью зажимов типа «крокодил». На зажимы подавали постоянный электрический ток, вследствие чего происходил нагрев модифицированного ПДМС. Установлено, что данные нагреватели способны обеспечивать температуру $210 \text{ }^\circ\text{C}$ при питающем напряжении постоянного тока 100 В.

Применение термопластичных полиуретанов, модифицированных УНТ, позволяет получать гибкие нагревательные элементы, которые способны нагреваться до $140 \text{ }^\circ\text{C}$ при питающем напряжении постоянного тока 10 В [18]. Температура нагрева и значение питающего напряжения таких нагревателей зависит от массового содержания УНТ [19; 20]. Чем больше УНТ в ПУ, тем меньшее питающее напряжение постоянного тока требуется для стабильной работы электронагревателя.

Цель работы – исследование тепловыделений ПУ, модифицированных МУНТ, при их подключении к источнику постоянного электрического тока.

В связи с этим задачами работы являются:

- 1) разработать методику изготовления ПУ композитов, модифицированных различными типами МУНТ;
- 2) исследовать зависимость изменения электропроводящих свойств наномодифицированных ПУ от массовой концентрации модификатора – МУНТ;
- 3) исследовать распределение температурных полей на образцах нагревателей с помощью бесконтактного метода измерения температуры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве полимерной матрицы для формирования композитов использовали полиуретановый компаунд «Силагерм 6030» (ООО «ПО «Технология Пласт» (Москва, Россия)), который состоял из основы и отвердителя. Электропроводящий наполнитель – многостенные углеродные нанотрубки, синтезированные на Fe-Co_{2,1}Al₂O₃ (МУНТ1) и Co-Mo/Al₂O₃-MgO (МУНТ2) катализаторах. Удельную поверхность МУНТ исследовали с помощью анализатора «Сорбтометр-М» (Новосибирск, Россия). Морфологию МУНТ исследовали по снимкам, полученным с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) «Hitachi H-800» (Hitachi, Япония) в вакууме при давлении $6 \cdot 10^{-5}$ Па и напряжении 20 кВ. Микроструктуру среза образца на основе ПУ, модифицированного МУНТ (ПУМУНТ), исследовали с помощью цифрового микроскопа «QX7» (Digital Blue, Уэйн, США). Толщину образцов на основе ПУМУНТ измеряли с помощью микрометра «МК 0-25мм» (СССР).

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНОВ

Для изготовления ПУМУНТ смешивали основу с отвердителем с помощью вертикальной роторной мешалки «HT-120 DX» (DAIHAN Scientific, Южная Корея) в соотношении 1/1 в емкости объемом 200 мл. Время смешивания – 10 мин при частоте вращения перемешивающего устройства 400 об/мин. В зависимости от требуемой концентрации МУНТ в ПУ, к полученной смеси добавляли расчетное количество МУНТ и смешивали в течение 20 мин со скоростью вращения перемешивающего устройства 300 об/мин. После чего 1/5 часть полученного ПУМУНТ формовали между двумя фторопластовыми пленками так, чтобы толщина отвержденного образца составляла 2 мм. Изготовление таких образцов было необходимо для исследований микроструктуры ПУМУНТ, изготовленного без вакуумной обработки. Оставшийся ПУМУНТ помещали в вакуумный термощкаф «ВТШ-К52-250» (Фрязино, Россия) на 10 мин при давлении $-0,1 \text{ МПа}$ и температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$, что было необходимо для удаления из смеси воздуха, образовавшегося после процесса смешения компонентов ПУМУНТ. Далее, формуя 1/3 часть ПУМУНТ по технологии получения образцов для исследования микроструктуры ПУМУНТ, были изготовлены образцы с применением вакуумной обработки для исследования удельного объемного сопротивления и микроструктуры ПУМУНТ. Оставшуюся часть ПУМУНТ формовали между двумя металлическими поверхностями, изготовленными из алюминиевой фольги с толщиной 100 мкм (ООО «Уральская фольга», Михайловск, Россия). Между металлическими поверхностями прокладывали стеклянные подложки толщиной 2 мм. Таким образом, было получено по три комплекта сформованных образцов для каждой концентрации МУНТ в ПУ. После формовки образцы ПУМУНТ оставляли на 14 суток для полной полимеризации при температуре $25\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$. Полимеризованные образцы ПУМУНТ извлекали из форм и нарезами до нужных для исследований размеров.

Всем образцам модифицированных полимеров (ПУ) были присвоены обозначения в соответствии с используемым типом МУНТ и его массовым содержанием в ПУ (таблица 1).

Таблица 1. Обозначение композитов на основе ПУ, модифицированных МУНТ

Тип МУНТ	Массовое содержание МУНТ в ПУ(масс.%)	Обозначение композита
МУНТ1	1	ПУМУНТ1-1
	3	ПУМУНТ1-3
	5	ПУМУНТ1-5
	7	ПУМУНТ1-7
МУНТ2	1	ПУМУНТ2-1
	3	ПУМУНТ2-3
	5	ПУМУНТ2-5
	7	ПУМУНТ2-7

Из образцов ПУМУНТ, сформованных между компланарными фольгами, вырезали пластины с размерами 10×45 мм. С противоположных краев пластин оставляли часть фольги (выступ) (рис. 1 а) для подключения к источнику постоянного напряжения. В качестве изоляции использовали пленку “ORACAL 640” («ООО ПЛАСТ-ТОРГ» (Тамбов, Россия)), которой обклеивали полученные пластины (рис. 1 б).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

На первой стадии исследований измеряли величину сопротивления R_v . Для этого изготавливали измерительную ячейку (рис. 2), которая состояла из двух фторопластовых цилиндров 1 диаметром 25 мм и высотой 50 мм. На один из торцов каждого цилиндра были приклеены измерительные электроды 2, изготовленные из граффлекса толщиной 200 мкм. ПУМУНТ устанавливали между измерительными электродами. Для снижения величины контактных сопротивлений между ПУМУНТ и графлексом сверху на фторопластовый цилиндр устанавливали груз 3 массой 2 кг. Контакт между измерительным прибором и измерительными электродами устанавливали с помощью щупов с зажимами типа «крокодил» “REX10 Rexant” (“Lin'an CF Co.,Ltd”, Жеджанг, Китай). В качестве измерительного прибора использовали RLC-метр “Mastech MS5308”

(“PRECISION MASTECH ENTERPRISES COMPANY”, Гонконг, Китай).

Измеренное сопротивление R_v пересчитывали по формуле [13;21], тем самым получая значение удельного объемного электрического сопротивления ρ_v :

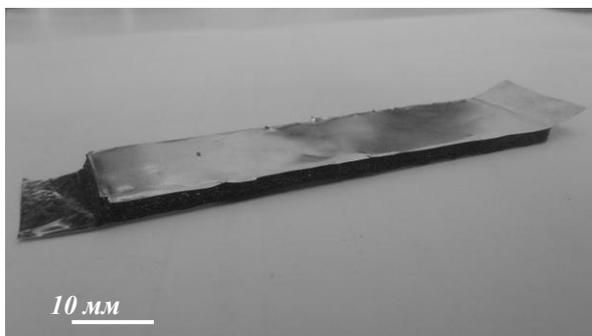
$$\rho_v = R_v \times \frac{S}{\delta},$$

где S – площадь поперечного сечения измерительного электрода, см²;

δ – толщина образца [22; 23].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

На второй стадии исследовали тепловыделения образцов наномодифицированных композитов. В качестве устройства для электропитания образцов нагревателей на основе ПУМУНТ (ОНПУМУНТ) использовали лабораторный автотрансформатор «Ресанта ЛАТР TDGC2-3» (Москва, Россия). Для преобразования переменного тока в постоянный использовали диодный мост “КВРС1010” (Китай) с максимальным обратным током 10 мкА. В качестве измерительных приборов использовали мультиметры “UNI-T UT61E” (Дунгуань, Китай) и “UNI-T UT71E” (Дунгуань, Китай), которые снабжены встроенным



а



б

Рис. 1. Пример образца нагревателя на основе ПУМУНТ для исследований электрофизических и тепловых параметров: а – образец без изоляции; б – образец с изоляцией

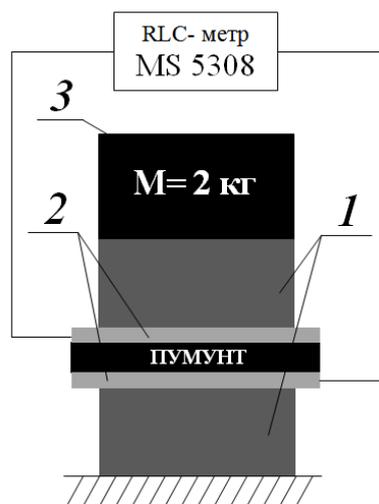


Рис. 2. Схема измерения поверхностного сопротивления:
1 – фторопластовые цилиндры; 2 – измерительные электроды; 3 – груз

блоком АЦП, что позволяет передавать и записывать измеряемые данные на ПК через интерфейс USB. Температуру на поверхности ОНПУМУНТ и равномерность распределения температурного поля фиксировали с помощью бесконтактного метода измерения, реализованного в тепловизоре “Testo 871-1” (Шварцвальд, Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно проведенным измерениям, удельная поверхность МУНТ1 и МУНТ2 составляет 305,2 и 306,2 м²/г соответственно.

На рис. 3 показано ПЭМ-изображение МУНТ1.

Анализ ПЭМ-изображений (рис. 3) позволяет сделать вывод, что представленный наноматериал состоит из пучков МУНТ с наружным диаметром около 20–40 нм. Частицы катализатора в данном материале не просматриваются.

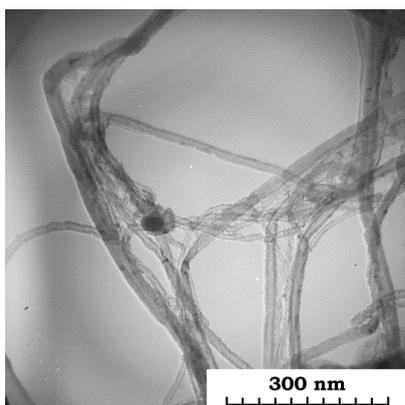


Рис. 3. ПЭМ изображение МУНТ1

В таблице 2 представлены данные по удельному объемному сопротивлению ПУ, модифицированных МУНТ.

Анализ данных, представленных в таблице 2, позволяет сделать вывод, что использование в качестве электропроводящего наполнителя МУНТ1 в ПУ вместо МУНТ2 позволяет получать ПУМУНТ с более низким удельным сопротивлением. У ПУМУНТ1, содержащего 1, 2, 3 и 7 масс. % МУНТ1, удельное сопротивление ниже на 2–3 порядка, чем у ПУМУНТ2. Это связано с тем, что наружный диаметр МУНТ1 в 2 раза больше наружного диаметра МУНТ2, что подтверждено анализом ПЭМ изображений МУНТ (рис. 3, рис. 4). Следовательно, МУНТ1 занимает большее пространство в матрице ПУ, чем МУНТ2, при равном массовом содержании, что приводит к образованию большего количества электропроводящих контактов в ПУ, образованных частицами МУНТ1.

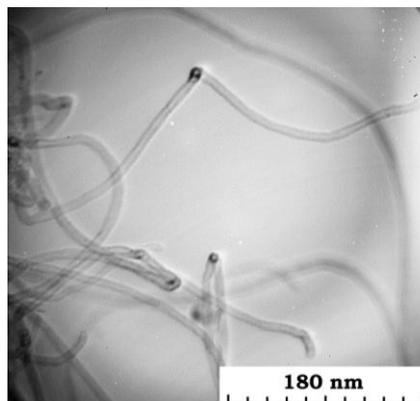


Рис. 4. ПЭМ изображение МУНТ2

На рис. 4 показано ПЭМ-изображение МУНТ2.

ПЭМ-изображения, представленные на рис. 4, демонстрируют МУНТ, наружный диаметр которых составляет 10–15 нм. Катализатор находится в закапсулированном внутри МУНТ состоянии.

На рис. 5 представлено фото среза ПУМУНТ, увеличенного в 60 раз.

Внешний вид срезов ПУМУНТ (рис. 5), позволяет сделать вывод, что вакуумная обработка способствует

Таблица 2. Удельное объемное сопротивление ПУ, модифицированных МУНТ

Название композита	Удельное объемное сопротивление ($\Omega \times \text{см}$)	Название композита	Удельное объемное сопротивление ($\Omega \times \text{см}$)
ПУМУНТ1-1	$1,2 \times 10^7$	ПУМУНТ2-1	$1,65 \times 10^9$
ПУМУНТ1-3	$3,4 \times 10^5$	ПУМУНТ2-3	$3,79 \times 10^8$
ПУМУНТ1-5	$1,5 \times 10^5$	ПУМУНТ2-5	$9,02 \times 10^7$
ПУМУНТ1-7	$3,5 \times 10^4$	ПУМУНТ2-7	$1,4 \times 10^7$

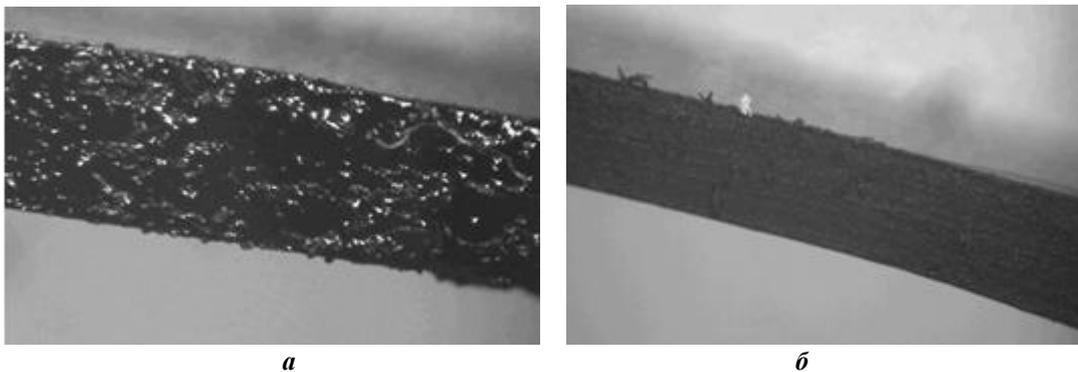


Рис. 5. Фотография среза ПУМУНТ увеличенного в 60 раз
 а – ПУМУНТ 1-3, изготовленный без применения вакуумной обработки,
 б – ПУМУНТ 1-3, изготовленный с применением вакуумной обработки

устранению образовавшихся воздушных включений и получению более плотного композита (рис. 5 б). Фотографии среза с увеличением в 60 раз представлены только для ПУМУНТ1-3, так как остальные композиты практически не отличались друг от друга.

На рис. 6 показаны зависимости электрического тока от времени работы образцов.

Для ОНПУМУНТ величина питающего напряжения находится в зависимости от массового содержания МУНТ в ПУ. Выявлено, что чем больше содержание МУНТ в ПУ, тем меньше номинальное пороговое значение напряжения питания ОНПУМУНТ, изготовленных на их основе для получения эффекта тепловыделения. Таким образом, величины номинального питающего напряжения для ОНПУМУНТ 1-1, ОНПУМУНТ 1-3, ОНПУМУНТ 1-5, ОНПУМУНТ 1-7, ОНПУМУНТ 2-3, ОНПУМУНТ 2-5, ОНПУМУНТ 2-7 составляли 100, 40, 12, 7, 12, 9 и 7 В соответственно. Превышение порога номинального напряжения приводило к выходу ОНПУМУНТ из строя, что сопровождалось интенсивным дымлением.

В ходе проведения испытаний выявлено, что для ОНПУМУНТ 1-1 характерно явление токовой флуктуации (рис. 6 а). Токовая флуктуация проявляется в хаотичных скачках и падениях электрического тока при неизменном питающем напряжении на протяжении цикла испытаний. ОНПУМУНТ 1-5, ОНПУМУНТ 1-7, ОНПУМУНТ 2-5 и ОНПУМУНТ 2-7 отличаются от остальных ОНПУМУНТ присутствием пусковых токов (рис. 6 б, рис. 6 в) в начальный момент времени подключения ОНПУМУНТ к источнику постоянного напряжения. Для ОНПУМУНТ 1-3 и ОНПУМУНТ

2-3 значения показателей электрического тока неизменны на протяжении всего цикла работы (рис. 6 а, б в).

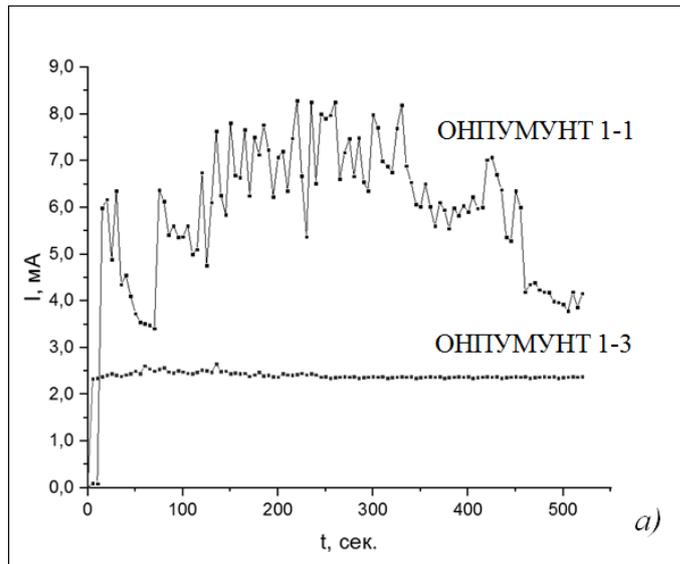
На рис. 7 представлены термограммы образцов нагревателей.

Из результатов тепловизионной съемки ОНПУМУНТ (рис. 7), подключенных к напряжению постоянного тока, можно сделать вывод о неравномерности распределения температурных полей на поверхности следующих образцов: ОНПУМУНТ 1-1, ОНПУМУНТ 1-3, ОНПУМУНТ 1-5, ОНПУМУНТ 2-3 и ОНПУМУНТ 1-7.

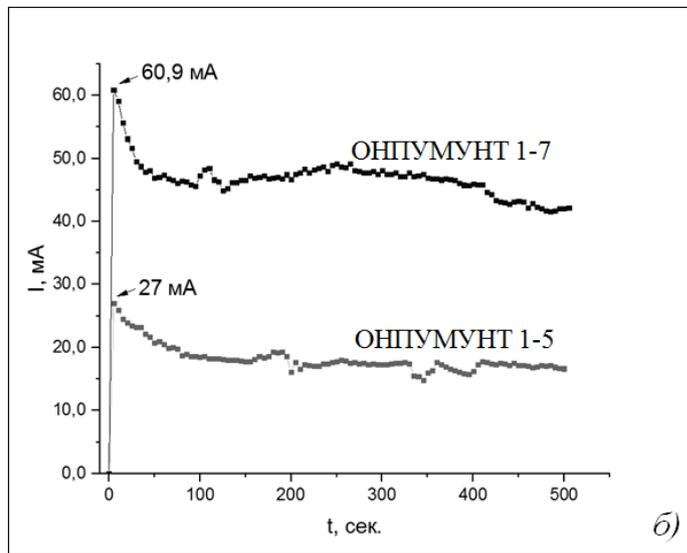
Максимальная температура нагрева отмечена на краях образцов нагревателей (ОНПУМУНТ 1-1, ОНПУМУНТ 1-3, ОНПУМУНТ 1-5, ОНПУМУНТ 2-3 и ОНПУМУНТ 2-5). Образцы с большей концентрацией МУНТ – ОНПУМУНТ 1-7 и ОНПУМУНТ 2-7 – демонстрируют значительно более равномерное распределение температурного поля по всей греющей поверхности. ОНПУМУНТ 2-1 не нагревался при питающем напряжении постоянного тока, значение которого постепенно изменяли от 0 до 250 В, что обусловлено низкими электропроводящими свойствами ПУМУНТ 2-1.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

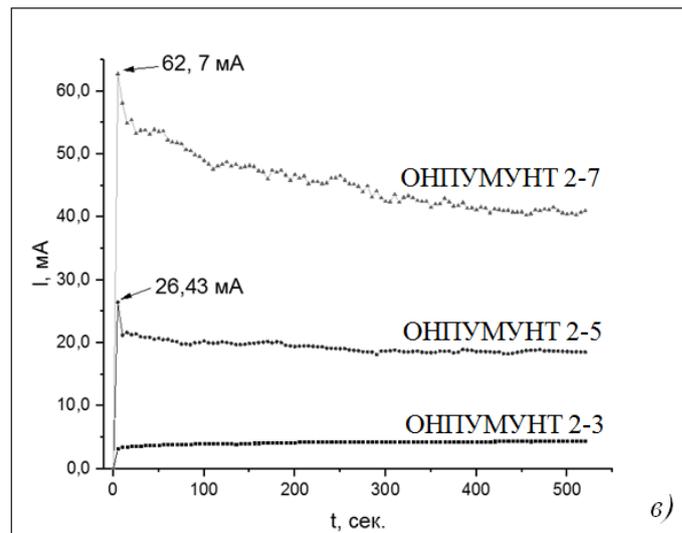
Выявлено, что электропроводящие свойства наномодифицированных полиуретанов зависят от диаметра многослойных углеродных нанотрубок и их массовой концентрации. Для композитов, полученных с применением многослойных углеродных нанотрубок, синтезированных на катализаторе $\text{Fe-Co}/_{2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$, удельное объемное электрическое сопротивление ниже на 2 порядка, чем у композитов, содержащих многослойные углеродные нанотрубки, синтезированные на $\text{Co-Mo}/_{2,1}\text{Al}_2\text{O}_3$ катализаторе.



a



б



в

Рис. 6. Зависимость изменения силы тока от времени для ОНПУМУНТ
a – ОНПУМУНТ 1-1, ОНПУМУНТ 1-3; *б* – ОНПУМУНТ 1-5, ОНПУМУНТ 1-7;
в – ОНПУМУНТ 2-3, ОНПУМУНТ 2-5, ОНПУМУНТ 2-7

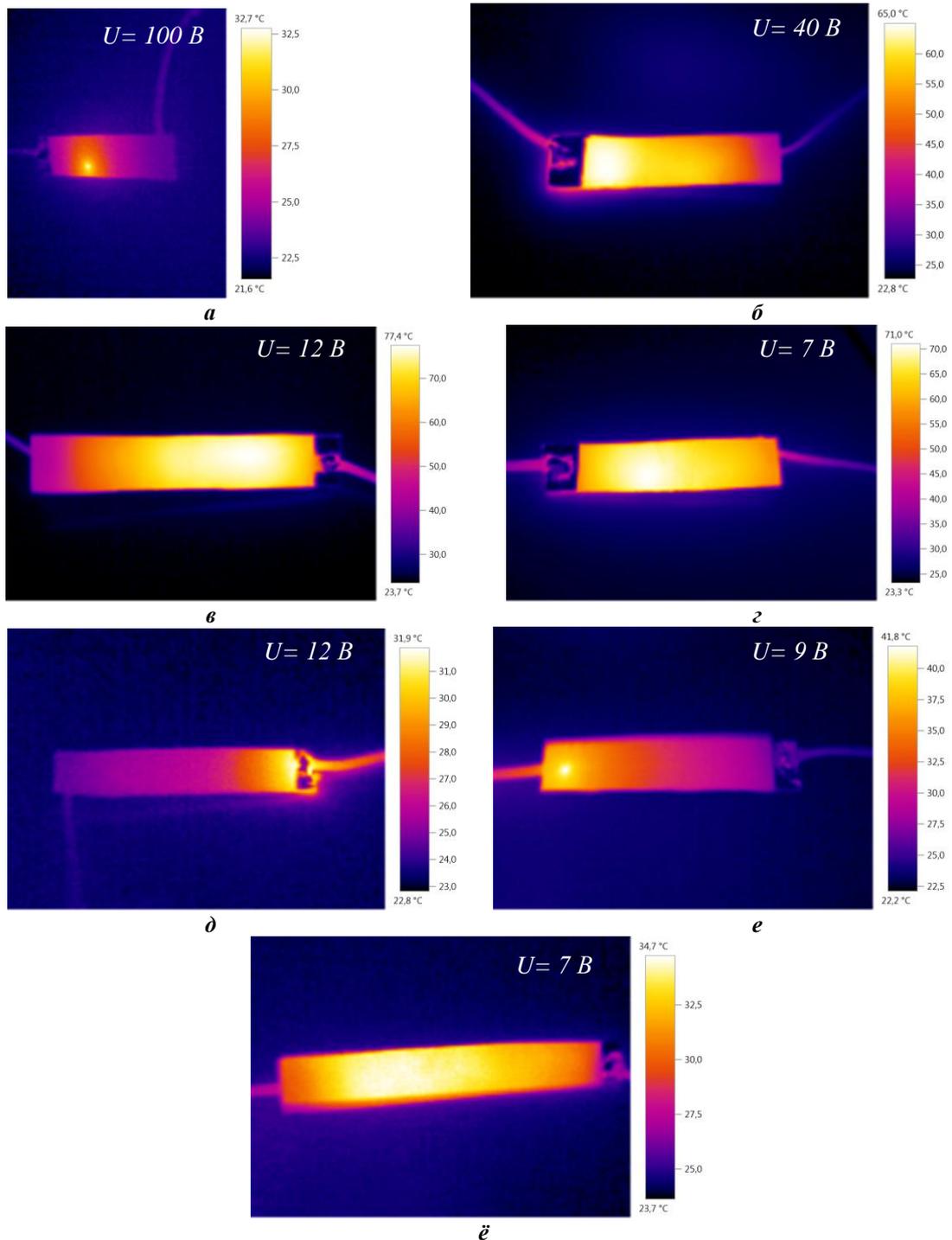


Рис. 7. Термограммы ОНПУМУНТ, подключенных к напряжению постоянного электрического тока
а – ОНПУМУНТ 1-1, *б* – ОНПУМУНТ 1-3, *в* – ОНПУМУНТ 1-5, *г* – ОНПУМУНТ 1-7,
д – ОНПУМУНТ 2-3, *е* – ОНПУМУНТ 2-5, *ё* – ОНПУМУНТ 2-7

Установлено, что для образцов наномодифицированных полиуретанов с концентрацией многослойных углеродных нанотрубок (1, 3, 5 %) с диаметром 10–15 нм и многослойных углеродных нанотрубок (3 и 5 масс. %) с диаметром 20–40 нм и концентрацией 3 % при их подключению к источнику постоянного тока характерно неравномерное распределение температурного поля. При этом максимальная температура сосредотачивается на краях образцов наномодифицированного полиуретана.

Показано, что образцы с концентрацией 7 % углеродных нанотрубок, как меньшего, так и большего диамет-

ра, обладают равномерным распределением температурного поля по всей площади поверхности.

Полученные результаты исследования позволили определить влияние концентрации и диаметра многослойных углеродных нанотрубок на электропроводность и характер распределения температурного поля при подключении образцов к источнику постоянного тока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-53-00032 Бел_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саундерс Д., Фриш К. Химия полиуретанов. М.: Химия, 1968. 470 с.
2. Яманова Р.Р. Современные материалы и технологии для получения форм и отливок при изготовлении сувенирной продукции // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 292–295.
3. Ирле К., Райер Р., Рошу Р., Штингль Т., Буланов М.Н. Высокоэффективные водно-дисперсионные полиуретановые ЛКМ для защиты стальных поверхностей // Лакокрасочные материалы и их применение. 2011. № 10. С. 43–46.
4. Еськов А.А., Лебедева Т.А., Белова М.В. Лакокрасочные материалы с пониженным содержанием летучих веществ (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 6. С. 8–35.
5. Li J., Feng Q., Cui J., Yuan Q., Qiu H., Gao S., Yang J. Self-assembled graphene oxide microcapsules in Pickering emulsions for self-healing waterborne polyurethane coatings // Composites Science and Technology. 2017. Vol. 151. P. 282–290.
6. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of Graphitic Oxide // Journal of the American Chemical Society. 1958. Vol. 80. № 6. P. 1339–1339.
7. Балаева С.М., Козлов Г.В., Заиков Г.Е., Стоянов О.В. Зависимость степени усиления от структуры нанонаполнителя для нанокомпозитов полиуретан/углеродные нанотрубки // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 2. С. 163–166.
8. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Парфимович И.Д., Буракова Е.А., Кобелев А.В., Дьячкова Т.П. Аспекты направленного синтеза углеродных нанотрубок для создания иерархических радиопоглощающих композитных материалов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 4. С. 337–343.
9. Гусева Е.Н., Пихуров Д.В., Зуев В.В. Диэлектрические свойства полиуретановых нанокомпозитов, модифицированных фуллереном C60 и наноалмазами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 982–989.
10. Leng J.S., Huang W.M., Lan X., Liu Y.J., Du S.Y. Significantly reducing electrical resistivity by forming conductive Ni chains in a polyurethane shape-memory polymer/carbon-black composite // Applied Physics Letters. 2008. Vol. 92. № 20. P. 204101.
11. Hohimer C.J., Petrossian G., Ameli A., Mo C., Pötschke P. Electrical conductivity and piezoresistive response of 3D printed thermoplastic polyurethane/multiwalled carbon nanotube composites // Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII 2018: proceedings of SPIE – International Society for Optics and Photonics. 2018. Vol. 10596. P. 105960J.
12. Li Y., Zhou B., Zheng G., Liu X., Li T., Yan C., Cheng C., Dai K., Liu C., Shen C., Guo Z. Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing // Journal of Materials Chemistry C. 2018. Vol. 6. № 9. P. 2258–2269.
13. Ягубов В.С., Щегольков А.В. Саморегулируемый электронагреватель на основе эластомера, модифицированный многослойными углеродными нанотрубками // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 3. С. 341–345.
14. Tang P., Zhang R., Shi R., Bin Y. Synergetic effects of carbon nanotubes and carbon fibers on electrical and self-heating properties of high-density polyethylene composites // Journal of Materials Science. 2015. Vol. 50. № 4. P. 1565–1574.
15. Xiao Z., Sheng C., Xia Y., Yu X., Liang C., Huang H., Gan Y., Zhang J., Zhang W. Electrical heating behavior of flexible thermoplastic polyurethane/Super-P nanoparticle composite films for advanced wearable heaters // Journal of industrial and engineering chemistry. 2019. Vol. 71. P. 293–300.
16. Liu P., Liu L., Jiang K., Fan S. Carbon-nanotube-film microheater on a polyethylene terephthalate substrate and its application in thermochromic displays // Small. 2011. Vol. 7. № 6. P. 732–736.
17. Yan J., Jeong Y.G. Highly elastic and transparent multiwalled carbon nanotube/polydimethylsiloxane bilayer films as electric heating materials // Materials & Design. 2015. Vol. 86. P. 72–79.
18. Luo J., Lu H., Zhang Q., Yao Y., Chen M., Li Q. Flexible carbon nanotube/polyurethane electrothermal films // Carbon. 2016. Vol. 110. P. 343–349.
19. Ha J.-H., Chu K., Park S.-H. Electrical Properties of the Carbon-Nanotube Composites Film Under Extreme Temperature Condition // Journal of Nanoscience and Nanotechnology. 2019. Vol. 19. № 3. P. 1682–1685.
20. Yao X., Hawkins S.C., Falzon B.G. An advanced anti-icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs // Carbon. 2018. Vol. 136. P. 130–138.
21. Марков А.В., Гушин В.А., Марков В.А. Термоэлектрические характеристики электропроводящих композитов на основе смесей кристаллизующихся и аморфных полимеров с техническим углеродом // Пластические массы. 2019. № 1-2. С. 44-47.
22. Raza M.A., Westwood A., Brown A., Hondow N., Stirling Ch. Characterisation of graphite nanoplatelets and the physical properties of graphite nanoplatelet/silicone composites for thermal interface application // Carbon. 2011. Vol. 49. № 13. P. 4269–4279.
23. Yagubov V., Stolyarov R., Memetov N., Blokhin A., Tkachev A., Gorshkova A., Moskova M. Nanomodified electroconducting glue compositions based on polychloroprene rubber // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2041. № 1. P. 020026.

REFERENCES

1. Saunders D., Frish K. *Khimiya poliuretanov* [Polyurethane Chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 470 p.
2. Yamanova R.R. Modern materials and technologies for obtaining molds and castings in the manufacture of souvenirs. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 292–295.
3. Irle K., Rayer R., Roshu R., Shtingl T., Bulanov M.N. High-performance waterborne polyurethane coatings for protection of steel surfaces. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*, 2011, no. 10, pp. 43–46.
4. Eskov A.A., Lebedeva T.A., Belova M.V. Paint-and-lacquer materials with lowered content of volatile

- organic compounds (review). *Trudy VIAM*, 2015, no. 6, pp. 8–35.
5. Li J., Feng Q., Cui J., Yuan Q., Qiu H., Gao S., Yang J. Self-assembled graphene oxide microcapsules in Pickering emulsions for self-healing waterborne polyurethane coatings. *Composites Science and Technology*, 2017, vol. 151, pp. 282–290.
 6. Hummers W.S., Offeman R.E. Preparation of Graphitic Oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 1958, vol. 80, no. 6, pp. 1339–1339.
 7. Balaeva S.M., Kozlov G.V., Zaikov G.E., Stoyanov O.V. Dependence of the degree of amplification on the structure of the nanofiller for polyurethane/carbon nanotubes nanocomposites. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 163–166.
 8. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Parfimovich I.D., Burakova E.A., Kobelev A.V., Dyachkova T.P. Aspects of the directional synthesis of carbon nanotubes to create hierarchical radio-absorbing composite materials. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2018, vol. 80, no. 4, pp. 337–343.
 9. Guseva E.N., Pikhurov D.V., Zuev V.V. Dielectric properties of polyurethane nanocomposites modified by fullerene C60 and nanodiamonds. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 982–989.
 10. Leng J.S., Huang W.M., Lan X., Liu Y.J., Du S.Y. Significantly reducing electrical resistivity by forming conductive Ni chains in a polyurethane shape-memory polymer/carbon-black composite. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 20, pp. 204101.
 11. Hohimer C.J., Petrossian G., Ameli A., Mo C., Pötschke P. Electrical conductivity and piezoresistive response of 3D printed thermoplastic polyurethane/multiwalled carbon nanotube composites. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites XII 2018: proceedings of SPIE – International Society for Optics and Photonics*, 2018, vol. 10596, pp. 105960J.
 12. Li Y., Zhou B., Zheng G., Liu X., Li T., Yan C., Cheng C., Dai K., Liu C., Shena C., Guo Z. Continuously prepared highly conductive and stretchable SWNT/MWNT synergistically composited electrospun thermoplastic polyurethane yarns for wearable sensing. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, vol. 6, no. 9, pp. 2258–2269.
 13. Yagubov V.S., Shchegolkov A.V. Self-regulating electric heater based on elastomer, modified with multilayer carbon nanotubes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2018, vol. 80, no. 3, pp. 341–345.
 14. Tang P., Zhang R., Shi R., Bin Y. Synergetic effects of carbon nanotubes and carbon fibers on electrical and self-heating properties of high-density polyethylene composites. *Journal of Materials Science*, 2015, vol. 50, no. 4, pp. 1565–1574.
 15. Xiao Z., Sheng C., Xia Y., Yu X., Liang C., Huang H., Gan Y., Zhang J., Zhang W. Electrical heating behavior of flexible thermoplastic polyurethane/Super-P nanoparticle composite films for advanced wearable heaters. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2019, vol. 71, pp. 293–300.
 16. Liu P., Liu L., Jiang K., Fan S. Carbon-nanotube-film microheater on a polyethylene terephthalate substrate and its application in thermochromic displays. *Small*, 2011, vol. 7, no. 6, pp. 732–736.
 17. Yan J., Jeong Y.G. Highly elastic and transparent multiwalled carbon nanotube/polydimethylsiloxane bilayer films as electric heating materials. *Materials & Design*, 2015, vol. 86, pp. 72–79.
 18. Luo J., Lu H., Zhang Q., Yao Y., Chen M., Li Q. Flexible carbon nanotube/polyurethane electrothermal films. *Carbon*, 2016, vol. 110, pp. 343–349.
 19. Ha J.-H., Chu K., Park S.-H. Electrical Properties of the Carbon-Nanotube Composites Film Under Extreme Temperature Condition. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 1682–1685.
 20. Yao X., Hawkins S.C., Falzon B.G. An advanced anti-icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs. *Carbon*, 2018, vol. 136, pp. 130–138.
 21. Markov A.V., Gushchin V.A., Markov V.A. Thermoelectric characteristics of electrically conductive composites based on mixtures of crystallizable and amorphous polymers with technical carbon // *Plastics*. 2019. no. 1-2. Pp. 44-47.
 22. Raza M.A., Westwood A., Brown A., Hondow N., Stirling Ch. Characterisation of graphite nanoplatelets and the physical properties of graphite nanoplatelet/silicone composites for thermal interface application. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 13, pp. 4269–4279.
 23. Yagubov V., Stolyarov R., Memetov N., Blokhin A., Tkachev A., Gorshkova A., Moskova M. Nanomodified electroconducting glue compositions based on polychloroprene rubber. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2041, no. 1, pp. 020026.

HEAT GENERATION OF NANOMODIFIED ELECTRICALLY-CONDUCTIVE POLYURETHANE DURING THE FLOW OF DIRECT CURRENT

© 2019

V.S. Yagubov, postgraduate student of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”
A.V. Shchegolkov, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”
Tambov State Technical University, Tambov (Russia)

Keywords: polyurethane; specific volume resistance; composite; nanomodified polyurethane; multi-wall carbon nanotubes (MWCNT); temperature self-regulation.

Abstract: The development of new types of functional materials based on modified polymers is a promising scientific task. Modified polymers are widely used in radio electronics and electrical engineering. The most effective approach that allows both to change physicomechanical and electro-physical properties of polymers is the introduction of carbon nanomaterials – nanomodifiers – into their structure. As there is a large variety of carbon nanostructures and the types of polymers, it is necessary to study and evaluate the influence of carbon nanostructures morphology and concentration of the introduced modifier on the properties of polymers.

In this regard, the paper deals with the study of the influence of different morphology carbon nanostructures in the composition of polyurethane on heat generation during the flow of direct current.

For this purpose, the authors carried out the experimental studies of polyurethane composites with different mass content (wt. %) of multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) synthesized using different catalysts. The studies of electrically-conductive properties of nanomodified composites at different concentrations of two types of MWCNTs were carried out. During the study, the authors identified that PU modified with 7 wt. % MWCNT synthesized on Fe-Co/2.1Al₂O₃ had the lowest specific volume electrical resistance ($3.5 \times 10^4 \Omega \times \text{cm}$). Using the non-contact method of measuring, the authors studied the distribution of temperature field on the surface of samples of nanomodified composites by connecting them to a DC source. It was found that heater samples made of polyurethanes modified with 7 wt. % MWCNT had the most uniform distribution of temperature field. The research revealed the effect of current fluctuations, which can be explained by the chaotic electrically-conductive network formed by an MWCNT in polyurethane.

The study identified that different MWCNT mass content in the composite affects the temperature field distribution when a constant electric voltage is applied, which follows from special aspects of carbon nanostructures distribution in the polymer matrix.

НАШИ АВТОРЫ

Батищев Виктор Павлович, магистрант.

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Выбойщик Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, 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

Грузков Игорь Викторович, ведущий инженер.

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

E-mail: vma@63.ru

Захаров Олег Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор.

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Захарченко Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология и системы управления в машиностроении».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Зырянов Андрей Олегович, кандидат технических наук, ведущий инженер.

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

E-mail: vma@63.ru

Костянчук Богдан Николаевич, магистрант.

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Кравцов Алексей Николаевич, инженер.

Адрес: Научно-производственный кооператив «ОНИКС», 623850, Россия, Свердловская область, г. Ирбит, ул. Первомайская, 12.

Тел.: +7 902 275-84-76

E-mail: nord_aleks@mail.ru

Кузнецов Артем Олегович, аспирант.

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Кузьмина Елена Александровна, аспирант.

Адрес: Оренбургский государственный университет, 460018, Россия, г. Оренбург, пр-т Победы, 13.

Тел.: +7 922 816-51-61

E-mail: kuzmina0902@yandex.ru

Ладягин Роман Владимирович, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

Адрес: Самарский государственный технический университет, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 133.

Тел.: (846) 333-34-53

E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Мальшев Владимир Ильич кандидат технических наук, профессор.

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

Месропян Арсен Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной гидромеханики.

Адрес: Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: 8 937 338-35-99

E-mail: avm_74@mail.ru

Мурашкин Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Нанотехнологии, материаловедение и механика».

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

Тел.: (8482) 54-63-23

E-mail: sv.murashkin@yandex.ru

Приймак Елена Юрьевна, кандидат технических наук, заведующий лабораторией металловедения и термической обработки, доцент кафедры материаловедения и технологии материалов.

Адрес 1: ОАО «Завод бурового оборудования», 460026, Россия, г. Оренбург, пр-т Победы, 118.

Адрес 2: Оренбургский государственный университет, 460018, Россия, г. Оренбург, пр-т Победы, 13.

Тел.: 8 905 897-24-44

E-mail: elena-pijjmak@yandex.ru

Разумова Ирина Николаевна, ассистент кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

Адрес: Самарский государственный технический университет, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 133.

Тел.: (846) 333-34-53

E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

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

Адрес: Тольяттинский государственный университет, 445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 16в.

Тел.: (8482) 53-94-53

E-mail: SelivAS@inbox.ru

Ситкина Лариса Петровна, старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

Адрес: Самарский государственный технический университет, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 133.

Тел.: (846) 333-34-53

E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Федотова Анна Владимировна, ведущий инженер.

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

E-mail: vma@63.ru

Шарипов Руслан Рамилович, аспирант кафедры прикладной гидромеханики.

Адрес: Уфимский государственный авиационный технический университет, 450008, Россия, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

Тел.: 8 917 358-15-55

E-mail: obter@yandex.ru

Щегольков Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов».

Адрес: Тамбовский государственный технический университет, 392036, Россия, г. Тамбов, ул. Ленинградская 1.

Тел.: 8 920 475-73-37

E-mail: energynano@yandex.ru

Яковшин Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Технология и системы управления в машиностроении».

Адрес: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Ягубов Виктор Сахибович, аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов».

Адрес: Тамбовский государственный технический университет, 392036, Россия, г. Тамбов, ул. Ленинградская 1.

Тел.: 8 953 719-50-59

E-mail: vitya-y@mail.ru

OUR AUTHORS

Batischev Viktor Pavlovich, graduate student.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya Street, 77.

Tel.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Fedotova Anna Vladimirovna, leading engineer.

Address: LLC "IT-Service", 443001, Russia, Samara, Ulyanovskaya/Yarmarochnaya Street, 52/55.

E-mail: vma@63.ru

Gruzkov Igor Viktorovich, leading engineer.

Address: LLC "IT-Service", 443001, Russia, Samara, Ulyanovskaya/Yarmarochnaya Street, 52/55.

E-mail: vma@63.ru

Kostyanchuk Bogdan Nikolaevich, graduate student.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya Street, 77.

Tel.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Kravtsov Aleksey Nikolaevich, engineer.

Address: Research and Production Company "ONIKS", 623850, Russia, Sverdlovsk region, Irbit, Pervomayskaya Street, 12.

Tel.: +7 902 275-84-76

E-mail: nord_aleks@mail.ru

Kuzmina Elena Aleksandrovna, postgraduate student.

Address: Orenburg State University, 460018, Russia, Orenburg, Prospect Pobedy, 13.

Tel.: +7 922 816-51-61

E-mail: kuzmina0902@yandex.ru

Kuznetsov Artem Olegovich, postgraduate student.

Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya Street, 77.

Tel.: (8452) 99-86-31

E-mail: tms@sstu.ru

Ladyagin Roman Vladimirovich, Senior Lecturer of Chair "Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools".

Address: Samara State Technical University, 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 133.

Tel.: (846) 333-34-53

E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Malyshev Vladimir Ilyich, PhD (Engineering), Professor.

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Mesropyan Arsen Vladimirovich, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair of Applied Hydromechanics.

Address: Ufa State Aviation Technical University, 450008, Russia, Ufa, K. Marx Street, 12.

Tel.: 8 937 338-35-99

E-mail: avm_74@mail.ru

Murashkin Sergey Viktorovich, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair "Nanotechnologies, Material Science and Mechanics".

Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.

Tel.: (8482) 54-63-23

E-mail: sv.murashkin@yandex.ru

Priymak Elena Yurievna, PhD (Engineering), Head of Laboratory of metallurgy and heat treatment, assistant professor of Chair of Materials Science and Engineering, assistant professor of Chair "Material Science and Materials Technology".

Address 1: ZBO Drill Industries, Inc., 460026, Russia, Orenburg, Prospect Pobedy, 118.

Address 2: Orenburg State University, 460018, Russia, Orenburg, Prospect Pobedy, 13.

Tel.: 8 905 897-24-44

E-mail: elena-pijmak@yandex.ru

Razumova Irina Nikolaevna, assistant of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”.
Address: Samara State Technical University, 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 133.
Tel.: (846) 333-34-53
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Selivanov Aleksandr Sergeevich, PhD (Engineering), Associate Professor, Deputy Rector – Director of Mechanical Engineering Institute.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 16v.
Tel.: (8482) 53-94-53
E-mail: SelivAS@inbox.ru

Sharipov Ruslan Ramilevich, postgraduate student of Chair of Applied Hydromechanics.
Address: Ufa State Aviation Technical University, 450008, Russia, Ufa, K. Marx Street, 12.
Tel: 8 917 358-15-55
E-mail: obter@yandex.ru

Shchegolkov Aleksandr Viktorovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”.
Address: Tambov State Technical University, 392036, Russia, Tambov, Leningradskaya Street, 1.
Tel.: 8 920 475-73-37
E-mail: energynano@yandex.ru

Sitkina Larisa Petrovna, Senior Lecturer of Chair “Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools”.
Address: Samara State Technical University, 443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 133.
Tel.: (846) 333-34-53
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Vyboyschik Mikhail Aleksandrovich, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, 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

Yagubov Viktor Sakhibovich, postgraduate student of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”.
Address: Tambov State Technical University, 392036, Russia, Tambov, Leningradskaya Street, 1.
Tel.: 8 953 719-50-59
E-mail: vitya-y@mail.ru

Yakovishin Aleksandr Sergeevich, assistant of Chair “Technology and Management Systems in Mechanic Engineering”.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya Street, 77.
Tel.: (8452) 99-86-31
E-mail: tms@sstu.ru

Zakharchenko Mikhail Yurievich, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Chair “Technology and Management Systems in Mechanic Engineering”.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya Street, 77.
Tel.: (8452) 99-86-31
E-mail: tms@sstu.ru

Zakharov Oleg Vladimirovich, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politekhnikeskaya Street, 77.
Tel.: (8452) 99-86-31
E-mail: tms@sstu.ru

Zyryanov Andrey Olegovich, PhD (Engineering), leading engineer.
Address: LLC “IT-Service”, 443001, Russia, Samara, Ulyanovskaya/Yarmarochnaya Street, 52/55.
E-mail: vma@63.ru