

ВЕКТОР НАУКИ Тольяттинского государственного университета

Основан в 2008 г.

№ 1 (55)

2021

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, член-корреспондент РАН, 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.
Табакон 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 № ФС77-76949 от 09 октября 2019 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: <https://vektornaukitech.ru>

Подписано в печать 31.03.2021.
Выход в свет 15.06.2021.
Формат 60×84 1/8.
Печать цифровая.
Усл. п. л. 9,0.
Тираж 25 экз. Заказ 3-145-21.
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, член-корреспондент РАН, 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

Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении С.Б. Ермаков.....	7
Структурно-фазовые превращения при деформации сплавов Fe-Co-V методом кручения под высоким давлением Л.Ф. Мурадинова, А.М. Глезер, С.О. Ширшиков, И.В. Щетинин, Д.Л. Дьяконов.....	16
Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов Н.В. Носов, Н.П. Костин., Р.В. Ладыгин.....	24
Разработка цифрового двойника процесса точения на основе машинного обучения Д.А. Расторгуев, А.А. Севастьянов.....	32
Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок К.С. Савельев, М.В. Илюшкин, Е.С. Киселев.....	42
Повышение режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных сталей наложением ультразвуковых колебаний на заготовку А.В. Хазов, А.Н. Унянин.....	55
Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных МУНТ при постоянном электрическом напряжении А.В. Щегольков	63
НАШИ АВТОРЫ.....	74

CONTENT

Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying S.B. Ermakov.....	7
Structural phase transformations during deformation of Fe-Co-V alloys using the high-pressure torsion method L.F. Muradimova, A.M. Glezer, S.O. Shirshikov, I.V. Shchetinin, D.L. Dyakonov	16
Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasioptimal correlation algorithms N.V. Nosov, N.P. Kostin, R.V. Ladyagin.....	24
Development of turning process digital twin based on machine learning D.A. Rastorguev, A.A. Sevastyanov.....	32
Use of digital twins for mathematical modeling of ultrasonic drilling of titanium blanks K.S. Savelyev, M.V. Ilyushkin, E.S. Kiselev.....	42
The enhancement of cutting capacity of a grinding wheel when processing ductile steel blank parts by ultrasonic activation A.V. Khazov, A.N. Unyanin.....	55
The comparative analysis of thermal effects in elastomers modified with MCNT at constant dc voltage A.V. Shchegolkov.....	63
OUR AUTHORS	74

Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении

© 2021

Ермаков Сергей Борисович, директор научно-образовательного центра «Северсталь-Политех»
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург (Россия)

E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Аннотация: Аддитивные технологии относятся к числу наиболее стремительно развивающихся направлений современного производства. Для обеспечения поступательного движения развития аддитивных технологий в РФ необходимо обеспечить максимальную доступность отечественных предприятий к аддитивному сырью – сферическим металлическим порошкам, однако отсутствие отечественных установок для производства таких порошков затрудняет решение этой задачи. В СПбПУ Петра Великого были разработаны и успешно прошли промышленные испытания системы плазменной атомизации твердых металлических фидстоков различных химических составов. В работе приводятся результаты исследования влияния ряда технологических параметров на гранулометрический размер, форму и дефектность порошков стали 12X18H9 и сплава ВЖ98. Приведены результаты исследований влияния таких параметров распыления, как сила тока и скорость плазмообразующего газа, подаваемых на плазмотрон и объем защитного газа, подаваемого в факел распыления через форсунки системы «кипящего слоя», расположенного в средней части камеры распыления атомизера. Показано, что, повышая силу тока и скорость плазмообразующего газа, можно снизить средний размер частиц порошка, а изменяя объем подачи защитного газа – регулировать форму частиц. Анализ химического состава полученных порошков показал, что в процессе распыления угара легирующих элементов не происходит и состав порошка не отличается от составов исходных фидстоков. В работе приведены разработанные режимы распыления фидстоков сплавов, показана возможность получения металлических порошков с уровнем сферичности 92–96 % и минимальным – не превышающим 0,5 % от общей массы порошка – количеством частиц с неметаллическими включениями, наружными и внутренними дефектами.

Ключевые слова: аддитивные технологии; плазменная атомизация; порошки металлов и сплавов; режимы распыления; гранулометрический состав; сферичность; сталь 12X18H9; сплав ВЖ98.

Для цитирования: Ермаков С.Б. Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии позволяют полностью пересмотреть основные подходы к созданию новых машин и механизмов. С использованием аддитивных машин в опытном производстве удастся быстро и без значительных материальных затрат изготавливать экспериментальные агрегаты, их узлы и детали, создавать принципиально новые машины и механизмы; в условиях удаленности добывающих и перерабатывающих производств выполнять ремонтно-восстановительные работы, печатая вышедшие из строя узлы: зубчатые колеса, траки гусениц и другие детали карьерных экскаваторов и бульдозеров. По данным Wohlers Associates, мировой рынок аддитивных технологий в 2014 году составил около 3 млрд долларов при средних темпах роста на уровне 20–30 %, а к исходу 2020 года может достичь 16 млрд долларов¹, что подтверждается данными отечественных исследований², в том числе [1; 2].

¹ 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry: Wohler's Report 2020. Colorado: Wohler associates, 2020. 113 p.

² Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.

К числу передовых отраслей, широко внедряющих 3D-печать и постепенно отказывающихся от традиционных вычитающих технологий, следует отнести авиакосмическую промышленность [3], низкотемпературное и криогенное машиностроение, судостроение [4], энергетику, медицинскую промышленность [5]. Наряду с технологической целесообразностью перевода производства деталей на аддитивные технологии в этих отраслях, необходимо экономическое обоснование перестройки производства. Вопросы экономического обоснования замещения традиционных методов производства аддитивными широко обсуждаются в настоящее время. Так, в [6; 7] проработаны проблемы экономической классификации аддитивных технологий и показано, что наибольший эффект внедрения аддитивных методов производства достигается в случае изготовления наиболее технологически сложных узлов и деталей. В работе [8] обосновываются условия перевода на аддитивные методы производства крупных серий изделий.

Однако при всей научно-экономической проработке вопросов замещения традиционных технологий на аддитивные внедрение 3D-печати сталкивается с целым рядом технологических трудностей. К числу основных проблем, возникающих при переходе от традиционных технологий к аддитивным, относятся как малое число марок порошковых сталей и сплавов, представленных

на рынке, так и особенности производства, упаковки, транспортировки и хранения металлических порошков. В [9] показано, что даже химически эквивалентные порошки, полученные различными методами атомизации, могут иметь различные скорости окисления в воздушной среде, отличающиеся физико-механические и технологические свойства. Например, из анализа результатов исследований авторов работы [10] следует, что существует более 130 технологических параметров, влияющих на процесс лазерного сплавления порошковых частиц, в том числе это параметры исходных порошковых частиц, среди которых их форма, гранулометрический и химический составы, наличие внешних и внутренних дефектов.

В самом начале XXI века Россия находилась в первых рядах стран, развивающих аддитивные технологии, но в последнее десятилетие было отмечено постепенное снижение темпов внедрения аддитивной продукции в промышленность. Одной из причин такого замедления является отсутствие отечественной производственной базы металлических порошков для аддитивных машин. В настоящий момент большая часть порошков поставляется из-за рубежа. По мнению академика Е.Н. Каблова, для имеющегося российского парка установок аддитивного производства уже сейчас необходимо около 20 тонн порошков в год, и объем потребления порошков будет постоянно увеличиваться [11]. Учитывая проблему санкционных ограничений поставок порошков для аддитивных машин, отечественное производство металлических порошков приобретает большое значение. Главным показателем возможности использования металлических порошков в 3D-принтерах является их металлургическое качество.

Еще в середине XX века в нашей стране началось активное развитие порошковой металлургии, в том числе и оборудования для производства металлических порошков. Были разработаны основные технологии и принципы производства. В качестве основных методов получения порошков были использованы физико-химические и физико-механические технологии производства. Порошки, полученные этими методами, отличаются друг от друга фазовым составом, морфологией поверхности, микроструктурой частиц, физико-технологическими свойствами и конечной чистотой. Наибольший объем выпуска порошков приходился на физико-механические способы получения, однако получаемые этими способами частицы имеют неравновесные формы, обладают невысокой текучестью и из-за особенностей технологического процесса аддитивной печати, требующей исходного сырья правильной сферической формы, не могут быть использованы в аддитивных машинах. Как показала практика, для аддитивного производства наилучшим методом получения порошков явился процесс распыления расплавленного металла направленным потоком инертного газа. Полученные таким методом порошки обладают высокой чистотой поверхности частиц, в них практически отсутствуют неметаллические включения и посторонние примеси; микроструктура металлов, полученных этим методом, однородна, а процессы их кристаллизации предсказуемы [12].

Рядом исследований было установлено, что максимальная химическая однородность получаемого по-

рошка и стабильность его гранулометрического состава достигается при распылении потоками газа твердых фидстоков – проволоки распыляемого вещества. Поток газа, используемый при распылении, должен иметь температуру, значительно превышающую температуру плавления фидстока. Наиболее простым и технологически доступным методом такого распыления является метод распыления плазменным факелом, создаваемым дуговым плазмотроном. Использование дуговых плазмотронов позволяет регулировать в широких пределах энергосиловые параметры факела, поэтому именно плазменная атомизация является наиболее перспективным методом получения порошков для аддитивных машин [13]. Так, например, изменяя объем подачи плазмообразующего газа, можно изменять кинетическую энергию газоплазменного факела, что приводит к большему или меньшему дроблению капель расплава, т. е. возникает возможность регулирования гранулометрического состава получаемого порошка. Изменяя силу тока, подаваемого на плазмотрон, можно регулировать скорость расплавления фидстока и объем мгновенно распыляемой жидкости; регулируя диаметр фидстока, можно учесть влияние на процесс распыления основных теплофизических свойств распыляемого металла – его температуру плавления, теплоемкость и теплопроводность. При этом также необходимо учитывать, что увеличение диаметра фидстока, с одной стороны, приводит к повышению производительности процесса, с другой – к снижению количества мелких частиц в порошке, так как при использовании проволоки больших диаметров увеличивается моментная масса расплава, поступающего в зону распыления, и уменьшается число взрывообразного разбрызгивания крупных первичных капель [14]. Это приводит к определенным противоречиям: с одной стороны, увеличение диаметра проволоки – это повышение производительности процесса, с другой – увеличение диаметра – это увеличение среднего диаметра частиц получаемого порошка, снижение выхода товарной продукции (обычно это порошки диаметрами от 100–140 до 10–20 мкм). Определение оптимального соотношения между гранулометрическим составом получаемого порошка и диаметром используемого фидстока является одной из важнейших задач при разработке технологии и режимов плазменного метода [15; 16].

Цель исследования – определение возможности регулирования размеров и формы металлических порошков, получаемых при распылении в плазменном атомайзере, разработанном и изготовленном в СПбПУ Петра Великого, твердых фидстоков нержавеющей сталей и сплавов и установление основных технологических параметров распыления, оказывающих максимальное влияние на процессы сфероидизации порошковых частиц.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования влияния технологических параметров плазменного распыления на форму и размеры частиц металлических порошков были проведены на плазменном атомайзере СПбПУ [17] с горизонтальной подачей твердого фидстока, работающего в трехплазмотронном режиме, т. е. при одновременном распылении в одной камере атомайзера трех фидстоков тремя

независимыми генераторами плазмы. При этом каждый из узлов распыления может работать в своем технологическом режиме, поддерживая заданный уровень силы тока, скоростей подачи плазмообразующего газа и фидстока, создавая необходимые условия для распыления. Принципиальная схема атомайзера приведена на рис. 1.

Для исследований были использованы твердые фидстоки – проволоки диаметром 1,6 мм стали 12Х18Н9 и сплава ВЖ98 (ХН60ВТ). Химические составы исходных фидстоков соответствовали требованиям ГОСТ 5632-14. При проведении опытов по распылению проволок сила тока, подаваемого на каждый из плазмотронов, изменялась от 250 до 350 А, скорость плазмообразующего газа – аргона высокой чистоты (ГОСТ 10157-79) – от 30

до 50 л/мин, объем подачи защитного газа в систему противотока – от 0 до 20 л/мин, скорость подачи проволок – 3,5 м/мин. Время каждого опыта составляло 10 мин, что позволяло не опасаться излишнего роста температуры газа в камере распыления и не принимать мер по ее стабилизации.

Учитывая, что в зависимости от типа 3D-принтеров в основном могут использоваться порошки либо фракций 20–60 мкм – установки селективного лазерного сплавления, либо 40–140 мкм – системы прямого лазерного сплавления, были рассчитаны доли выхода порошков этих фракций. Расчет был выполнен на установке CAMSIZER X2 Microtrac MRB, использующей технологию динамического анализа изображений сыпучих образцов.

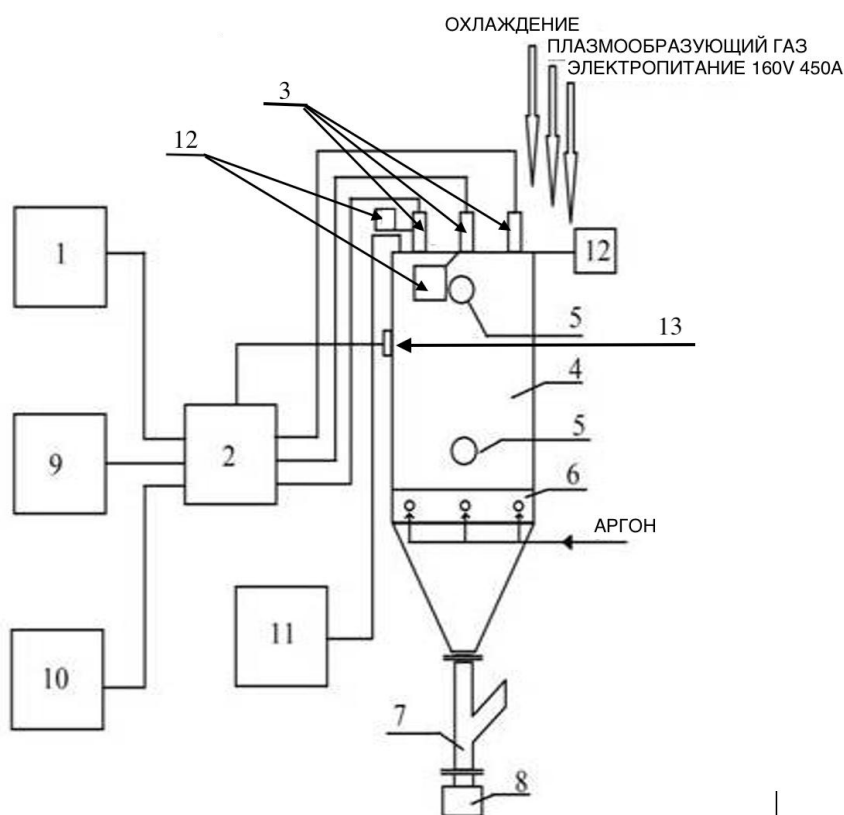


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного атомайзера СПбПУ:

- 1 – источник питания; 2 – блок управления и безопасности; 3 – плазмотроны (показана трехплазменная компоновка); 4 – колонна распыления; 5 – окна-глядельки для визуализации процесса распыления;
- 6 – пояс «кипящего слоя» – система разнонаправленных форсунок, через которые подается защитный газ;
- 7 – система отвода плазмообразующего газа в процессе распыления; 8 – система сбора порошков;
- 9 – газовая система; 10 – система охлаждения плазмотронов; 11 – система охлаждения колонны распыления;
- 12 – система подачи твердых фидстоков; 13 – измерительная аппаратура (устройство управления и безопасности)

Fig. 1. Basic diagram of plasma atomizer of St. Petersburg Polytechnic University:

- 1 – power supply; 2 – control and security unit; 3 – plasma torch (three-plasma torch assembly is shown);
- 4 – spraying column; 5 – windows-observation holes for the spraying process visualization;
- 6 – fluidized bed area – the system of multidirectional nozzles supplying protective gas;
- 7 – the system for plasma-forming gas disposal during the spraying process; 8 – powders gathering system;
- 9 – gas system; 10 – plasma torch cooling system; 11 – spraying column cooling system;
- 12 – solid feedstock delivery system; 13 – measuring equipment (control and security unit)

³ Анализатор размера и формы частиц CAMSIZER X2. URL: <https://laboimpex.ru/catalog/analizatory-formy-i-razmera-chastich/camsizer-x2>.

Металлографическое исследование микроструктуры распыленных порошков производилось с помощью оптического микроскопа Reihert-Jung MeF3A при увеличениих 50÷1000 крат, оснащенного количественным анализатором изображений Thixomet, и метода растровой электронной микроскопии в сочетании с микро-рентгеноспектральным анализом при помощи микроскопа SUPRA 55VP WDS, оснащенного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром.

Для определения влияния энергосиловых параметров распыления на гранулометрический состав распыленных порошков, полученных в ходе каждого из проведенных экспериментов, были проведены исследования порошков на ситовом анализаторе AS200 Basic с набором сит от 20 до 200 мкм. С этой целью полученный в ходе эксперимента порошок делился на три части, и проводились три ситовых анализа материала. Приведенные в работе данные о гранулометрическом составе порошков являются средними значениями результатов трех анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диспергирование расплавленных плазмой металлических капель должно определяться двумя основными параметрами процесса – тепловой мощностью плазменной дуги, определяемой силой тока, подаваемого на плазмотрон, и скоростью подачи плазмообразующего

газа, а качество получаемого порошка – скоростью его охлаждения, т. е. как теплофизическими характеристиками распыляемого материала, так и его теплообменом с окружающей частицу газовой средой. В таблице 1 приведены результаты исследования влияния силы тока (I_p) и скорости плазмообразующего газа (V_2) на гранулометрический состав частиц порошков обоих сплавов.

Доля порошков фракций 20–60 мкм и 40–140 мкм обоих сплавов интенсивно нарастает при увеличении скорости плазмообразующего газа от 9–14 до 25 % и от 30–39 до 57–61 % соответственно; роль силы тока более сложна: при повышении силы тока до 300 А процент выхода интенсивно растет, достигая максимума, и при больших значениях силы тока уже практически не изменяется.

Дополнительное подстуживание частиц распыленного порошка системой «кипящего слоя», обеспечивающей подачу холодного газа в направлениях перпендикулярных потоку частиц и вдоль стенок колонны, обеспечивает увеличение доли сферичности частиц (рис. 2) и снижение общего числа дефектов частиц порошков, описанных в ГОСТ 58418-2019.

Отсутствие или недостаточная мощность потока газа в системе «кипящего слоя» не позволяет обеспечить необходимую форму частиц порошка. При этом доли порошков сферической и округлой формы (ГОСТ 25849-83) в распыленной массе примерно равны. При обеспечении уровня подачи защитного газа в систему

Таблица 1. Влияние энергосиловых параметров распыления на гранулометрический состав порошка
Table 1. The influence of spraying energy-power parameters on the powder granulometric composition

I, А	V ₂ , л/мин	Гранулометрический состав (мкм), % к общему						
		<20	20–40	40–60	60–100	100–140	140–200	>200
Сталь 12Х18Н9								
250	30	2	5	9	11	14	14	45
	50	4	7	12	15	15	13	34
300	30	2	6	10	12	15	16	39
	50	5	10	14	19	16	14	22
350	30	4	6	11	14	18	16	31
	50	6	10	15	20	16	13	20
Сплав ВЖ98								
250	30	2	3	6	9	12	17	51
	50	3	6	8	12	14	14	43
300	30	4	7	10	12	15	16	36
	50	7	11	14	17	15	14	22
350	30	5	7	11	13	14	14	37
	50	8	10	15	18	14	13	22

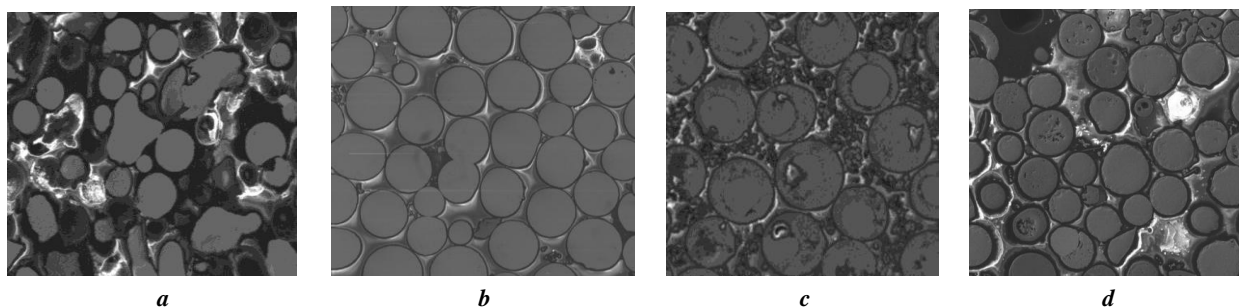


Рис. 2. Форма частиц порошков стали 12Х18Н9 (а, с) и сплава ВЖ98 (b, d) после распыления с отключенной (а, с) системой «кипящего слоя» и после подачи защитного газа объемом 15 л/мин (b, d). Увеличение ×500
Fig. 2. Particle shape of powders of 12H18N9 steel (a, c) and VG98 alloy (b, d) after spraying with the deactivated (a, c) fluidized bed system and after feeding the protective gas with a volume of 15 l/min (b, d). Zoom ×500

«кипящего слоя» в 10 и более л/мин доля сферичности порошков возрастает до 92–96 %. Дальнейшее увеличение объема продувки практически не изменяет процент порошков сферической формы.

Металлографический анализ порошков (рис. 2 b, 2 d) показал, что в металле порошков обоих сплавов, распыленных при силе тока 300 А и подачах плазмообразующего и защитного газов в объеме 50 и 15 л/мин, доля дефектных частиц порошков с различными видами дефектов: расслоений, трещин и т. п. (раздел 3.2. ГОСТ 58418-2019) – не превышала в разных партиях распыленных порошков 0,2–0,5 %. Практически отсутствуют внутренние дефекты – поры, инородные, в том числе металлические, включения, а анализ количества неметаллических включений, выполненных в соответствии с требованиями ГОСТ 1778-70 (таблица 2), показал, что их содержание практически не отличается от содержания этих включений в исходных проволоках.

Анализ химического состава распыленных порошков, выполненный микрорентгеноспектральным методом, показал, что составы распыленных порошков и исходных проволок обоих материалов практически идентичны. На рис. 3 и в таблице 3 в качестве примера приведены результаты анализа проволоки и порошка стали 12Х18Н9. Среднее содержание азо-

та в порошке стали составляет 0,006 мас.%, кислорода – 0,017 мас.%.
 Для проверки применимости полученных порошков в системах аддитивной печати методом послойного лазерного сплавления были изготовлены образцы для механических испытаний. Механические свойства образцов стали 12Х18Н9 следующие: временное сопротивление – 545 МПа, предел текучести – 205 МПа, относительное удлинение – 37 %, у сплава ВЖ98 – 780 МПа, 345 МПа, 49 % соответственно. Полученные результаты соответствуют требованиям к механическим свойствам обоих материалов, полученных традиционными методами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс образования металлической частицы при распылении в низкотемпературной плазме может условно быть разделен на несколько стадий: образование крупной капли неправильной формы, ее взрывообразное разбрызгивание на мелкие сферические капли, их кристаллизация, охлаждение частицы во время движения в газовом объеме камеры распыления, температура которого жестко контролируется, и, наконец, сбор частиц распыленного порошка без доступа к ним внешней

Таблица 2. Неметаллические включения в частицах порошка стали 08Х18Н9 и сплава ВЖ98
Table 2. Nonmetallic inclusions in the particles of 08H18N9 steel and VG98 alloy powders

Сплав	вид	Неметаллические включения (по методу Ш4 ГОСТ 1778-70)								
		ОТ*	ОС	СХ	СП	СН	С	НС	НТ	НА
12Х18Н9	фидсток	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	порошок	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ВЖ98	фидсток	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	порошок	0	0	0	0	1	0	0	1	1

*Примечание: ОТ – оксиды точечные; ОС – оксиды строчечные; СХ – силикаты хрупкие; СП – силикаты пластичные; СН – силикаты недеформирующиеся; С – сульфиды; НС – нитриды строчечные; НТ – нитриды и карбонитриды точечные; НА – нитриды алюминия.

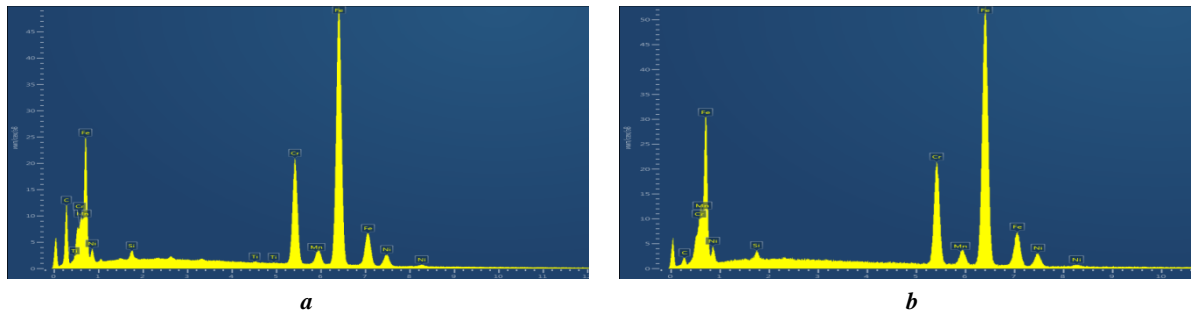


Рис. 3. Спектры стали 12Х18Н9: **a** – проволока; **b** – порошок
 Fig. 3. 12H18N9 steel spectra: **a** – a wire; **b** – a powder

Таблица 3. Химические составы исходных проволоки и порошка стали 12Х18Н9
 Table 3. Chemical compositions of original 12H18N9 steel wire and powder

Материал	Химический состав, мас. %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Проволока 12Х18Н9	0,11	0,49	1,14	18,20	9,49	0,011	0,012
Средний состав порошка	0,11	0,48	1,14	18,18	9,40	0,011	0,011

агрессивной среды. Время существования капли на, возникающей на торце сварочного электрода или сварочной проволоки в защитных газах, что связано с высокой скоростью газоплазменного факела и ее мгновенным отрывом от поверхности фидстока. Отрыв осуществляется в результате действия различных сил: давления дуги, реактивных сил при испарении металла и выделении газов, гравитационных сил, силы поверхностного натяжения, электродинамических сил и др. В момент отрыва капля характеризуется определенными размерами, температурой и начальной скоростью [18; 19].

После отрыва капли она движется в среде практически холодного защитного газа, температура которого не превышает несколько десятков градусов, постепенно кристаллизуется и охлаждается. В зависимости от условий распыления, температуры плавления распыляемого материала, длины свободного пробега частицы внутри камеры распыления (до соударения с днищем камеры) защитная среда может иметь пониженное, нормальное или повышенное давление, быть либо неподвижной (при отсутствии поступления дополнительных объемов газа через форсунки пояса «кипящего слоя», расположенные в средней части цилиндрической поверхности камеры распыления), либо подвижной. В этом случае скорость и направление движения газа в камере будет определяться параметрами поддува системы «кипящего слоя».

Выброс капель с расплавляемой струей плазмы поверхности фидстока начинается при плазменной нагрузке выше порога плавления, но ниже порога кипения материала. Представляется возможным описать процесс образования и движения капли с помощью теории

малых возмущений и пульсацию жидкости в струе газа. Эти возмущения обеспечивают волновой характер перемещения жидкости с растущей амплитудой колебания волны, которая образует будущую каплю, причем именно длина волны определяет диаметр капли [18–21]. При относительно малой скорости истечения характер и степень деформации струи определяются только осесимметричными колебаниями, амплитуда которых возрастает по мере удаления от точки распада. Распад струи сопровождается образованием крупных однородных по размеру капель. Повышение скорости истечения приводит к возникновению режима объемного распыления, причем зона взрывного разрушения крупных исходных капель сдвигается непосредственно к точке распыления, образуя факел из распыленных, неоднородных по размеру микрокапель жидкости. В свою очередь, размер образовавшихся микрокапель определяется распределением плотности теплового потока на поверхности проволоки. Это распределение неравномерно: поперечное обтекание плазменным потоком стороны проволоки, повернутой к плазматрону, происходит обычно в условиях ламинарного течения, а на обратной стороне возможны отрыв и турбулизация плазмы [19], что полностью подтверждается полученными результатами анализа гранулометрического состава полученных порошков. Очевидно, что увеличение силы тока, подаваемого на плазматрон, и скорости плазмообразующего газа приводят к увеличению зоны взрывного разрушения, ее смещению в направлении точки распыления и увеличению доли более мелких сферических капель. Анализ таблицы 1 позволяет утверждать, что при увеличении скорости истечения, определяемой скоростью подачи плазмообразующего газа,

с 30 до 50 л/мин доля мелких (товарных) фракций возрастает примерно в два раза. Роль энергетического фактора – силы тока более неоднозначна и имеет выраженный участок насыщения. Если при увеличении силы тока, подаваемого на плазматрон, с 200 до 300 А доля товарных фракций постоянно растет, то при дальнейшем повышении силы тока (до 350 А) происходит стабилизация гранулометрического состава получаемых порошков и процентное содержание товарных фракций практически не изменяется.

Еще одним параметром, определяющим качество получаемых порошков, является скорость подачи защитного газа. Образующаяся в средней части колонны распыления холодная газовая завеса кипящего слоя, распространяющаяся в плоскости, перпендикулярной факелу распыления, тормозит и дополнительно подсушивает порошковые частицы, обеспечивая получение качественных сферических порошков. Так, в отсутствие газовой завесы кипящего слоя доли порошка сферической и округлой формы (ГОСТ 25849-83) примерно равны, а при суммарной подаче защитного газа через 12 форсунок системы кипящего слоя, равной 120–150 л/мин, доля сферических порошков составляет уже более 92 %.

Анализ химического состава, наличия и количества неметаллических включений, поверхностных и объемных дефектов распыленных частиц стали 12Х18Н9 и сплава ВЖ98 показал полное соответствие полученных порошков требованиям, предъявляемым к порошкам для аддитивных машин. А результаты механических испытаний образцов, изготовленных из распыленных порошков методом селективного лазерного сплавления, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к этим материалам.

Таким образом, были определены основные технологические параметры работы атомайзера, позволяющие методом плазменной атомизации получать мелкодисперсные порошки, пригодные для их дальнейшего использования в 3D-принтерах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показана принципиальная возможность управления размерами и формой частиц порошка при распылении твердых фидстоков в камере плазменного атомайзера за счет регулирования трех основных технологических параметров – силы тока, подаваемого на плазматрон, скорости подачи плазмообразующего газа и объема подачи защитного газа в систему «кипящего слоя». Установлено, что с повышением скорости плазмообразующего газа с 30 до 50 л/мин средний размер частиц порошка d_{50} монотонно снижается. Роль силы тока носит более сложный характер – увеличение от 250 до 300 А – приводит к уменьшению диаметра частиц, дальнейшее повышение до 350 А – практически не изменяет их средний геометрический размер. Продувка камеры распыления защитным газом обеспечивает повышение сферичности получаемого порошка от 55–60 % при отсутствии продувки до 92–96 % при объеме продувки в 15 л/мин. Дальнейшее увеличение объема продувки практически не изменяет показатель сферичности.

2. Установлено, что при обеспечении оптимальных параметров распыления могут быть получены порошки,

химические составы которых не отличаются от составов исходных фидстоков, а содержание частиц с неметаллическими включениями, наружными и внутренними дефектами не превышает 0,2–0,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 22–25.
2. Петров И.М. Основные тенденции российского рынка металлических порошков для аддитивных технологий // *Аддитивные технологии*. 2019. № 1. С. 24–26.
3. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2015. Vol. 229. № 11. P. 2132–2147.
4. Дектярев А.В., Товпинец А.О., Гришин П.Р., Лейцин В.Н., Морозов В.Н. Сравнительный анализ физико-механических характеристик материалов аддитивного производства с традиционными методами литья как возможность применения 3D-печати в ремонтных работах на борту судна в рейсе в условиях Арктической зоны // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 2. С. 41–48.
5. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: НАМИ, 2015. 220 с.
6. Дресвянников В.А., Страхов Е.П. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. № 2. С. 16–28.
7. Шимохин А.В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции предприятия // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент*. 2019. № 4. С. 13–19.
8. Dröder K., Heyn J.K., Gerbers R., Wonenberg B., Dietrich F. Partial Additive Manufacturing: Experiments and Prospects with regard to Large Series Production // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 55. P. 122–127.
9. Терентьева О.А., Маймистов Д.Н., Гусев К.А., Флисюк Е.В., Наркевич И.А. Аддитивные технологии в фармацевтике. М.: КноРус, 2021. 172 с.
10. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2015. № 2. С. 11–22.
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУЦП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3–33.
12. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. № 5. P. 315–360.
13. Григорьев А.В., Разумов Н.Г., Попович А.А., Самохин А.В. Плазменная сфероидизация порошков на

- основе сплавов Nb-Si, полученных механическим легированием // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2017. Т. 23. № 1. С. 247–254.
14. Тимофеев А.Н., Логачева А.И. От металлургии гранул к аддитивным технологиям // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2018. № 3. С. 84–94.
 15. Алымов М.И., Левинский Ю.В., Набойченко С.С., Касимцев А.В., Панов В.С., Оглезнева С.А., Мильяев И.М., Тимофеев И.А., Вершинина Е.В., Абоганбиев А.Ю., Тузов Ю.В., Фомина О.Н., Комлев В.С. Металлические порошки и порошковые материалы. М.: Научный мир, 2018. 610 с.
 16. Головков В.Г., Пашко С.А. Аддитивные технологии в России // Управление качеством. 2017. № 9. С. 43–48.
 17. Ermakov B.S., Ermakov S.B., Pavlenko A., Vologzhanina S.A. Regulation of powder particle sizes during plasma spraying // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 826. № 1. Article number 012007.
 18. Linke J., Akiba M., Duwe R., Lodato A., Penkalla H.-J., Rodig M., Schopflin K. Material degradation and particle formation under transient thermal loads // Journal of Nuclear Materials. 2001. Vol. 290-293. P. 1102–1106.
 19. Safronov V., Arkhipov N., Bakhtin V., Barsuk V., Kurkin S., Mironova E., Piazza G., Würz H., Zhitlukhin A. Macroscopic erosion of divertor materials under plasma heat load typical for ITER hard disruption // Вопросы атомной науки и техники. 2002. № 5. С. 27–29.
 20. Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Петров С.В. Нагрев и плавление проволоки-анода при плазменно-дуговом напылении // Автоматическая сварка. 2011. № 5. С. 5–11.
 21. Мордынский В.Б., Гусев В.М., Тюфтяев А.С., Булаков А.Г., Саргсян М.А. Диспергирование капли при электродуговой металлзации // Физика химия обработки материалов. 2016. № 6. С. 74–81.
 22. Dresvyannikov V.A., Strakhov E.P. Classification of additive technologies and analysis of directions of their economic use. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*, 2018, no. 2, pp. 16–28.
 23. Shimokhin A.V. Economic substantiation of the introduction of additive technology in the technological processes of production of the production of the company. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment*, 2019, no. 4, pp. 13–19.
 24. Dröder K., Heyn J.K., Gerbers R., Wonenberg B., Dietrich F. Partial Additive Manufacturing: Experiments and Prospects with regard to Large Series Production. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 55, pp. 122–127.
 25. Terenteva O.A., Maymistov D.N., Gusev K.A., Fli-syuk E.V., Narkevich I.A. *Additivnyye tekhnologii v farmatsii* [Additive technologies in pharmacy]. Moscow, KnoRus Publ., 2021. 172 p.
 26. Smurov I.Yu., Konov S.G., Kotoban D.V. On the implementation of additive technologies and manufacturing into the Russian industry. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 2, pp. 11–22.
 27. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC OF RF on realization of “Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 3–33.
 28. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360.
 29. Grigorev A.V., Razumov N.G., Popovich A.A., Samokhin A.V. Plasma spheroidization of Nb-Si-based powder alloys obtained by mechanical alloying. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 247–254.
 30. Timofeev A.N., Logacheva A.I. From metallurgy of granules to additive technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2018, no. 3, pp. 84–94.
 31. Alymov M.I., Levinskiy Yu.V., Naboychenko S.S., Kasimtsev A.V., Panov V.S., Oglezneva S.A., Milyaev I.M., Timofeev I.A., Vershinina E.V., Aboganbiev A.Yu., Tuzov Yu.V., Fomina O.N., Komlev V.S. *Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy* [Metal powders and powder materials]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2018. 610 p.
 32. Golovkov V.G., Pashko S.A. Additive technologies in Russia. *Upravlenie kachestvom*, 2017, no. 9, pp. 43–48.
 33. Ermakov B.S., Ermakov S.B., Pavlenko A., Vologzhanina S.A. Regulation of powder particle sizes during plasma spraying. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 826, no. 1, article number 012007.
 34. Linke J., Akiba M., Duwe R., Lodato A., Penkalla H.-J., Rodig M., Schopflin K. Material degradation and particle formation under transient thermal loads. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, vol. 290-293, pp. 1102–1106.
 35. Safronov V., Arkhipov N., Bakhtin V., Barsuk V., Kurkin S., Mironova E., Piazza G., Würz H., Zhitlukhin A. Macroscopic erosion of divertor materials under plasma

REFERENCES

1. Sirotkin O.S. State-of-the-art and prospects of development of additive technologies. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2015, no. 2, pp. 22–25.
2. Petrov I.M. Principal trends in the Russian market of metal powders for additive technologies. *Additivnyye tekhnologii*, 2019, no. 1, pp. 24–26.
3. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2015, vol. 229, no. 11, pp. 2132–2147.
4. Dektyarev A.V., Tovpinets A.O., Grishin P.R., Leytsin V.N., Morozov V.N. Comparative analysis of physical stress-strain properties of materials of additive production with common methods of casting as possibility to use 3d-printing in repair works on board ship in voyage under arctic conditions. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2020, no. 2, pp. 41–48.
5. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in engineering]. Moscow, NAMI Publ., 2015. 220 p.

- heat load typical for ITER hard disruption. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, 2002, no. 5, pp. 27–29.
20. Kharlamov M.Yu., Krivtsun I.V., Korzhik V.N., Petrov S.V. Heating and melting of an anode wire during arc plasma spraying. *Avtomaticheskaya svarka*, 2011, no. 5, pp. 5–11.
21. Mordynskiy V.B., Gusev V.M., Tyuftyaev A.S., Buklakov A.G., Sargsyan M.A. Dispersion of drops under arc spraying. *Fizika khimiy obrabotki materialov*, 2016, no. 6, pp. 74–81.

Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying

© 2021

Sergey B. Ermakov, Director of the Research and Education Center “Severstal-Polytech”
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg (Russia)

E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Abstract: Additive technologies are among the most rapidly developing areas of modern production. To ensure the progressive movement of additive technologies development in the Russian Federation, it is necessary to provide maximum availability of additive raw materials – spherical metal powders for the domestic enterprises; however, the absence of domestic assemblies to produce such powders hampers the solution of this issue. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University has developed and successfully carried out industrial tests of a plasma atomization system for solid metal feedstocks of various chemical compositions. The paper presents the results of the study of the influence of some technological parameters on the granulometric size, shape, and defect structure of 12H18N9 steel and VG98 alloy powders. The paper includes the results of the research of the influence of such spraying parameters as the current strength and the plasma-forming gas velocity supplied to the plasma generator and the volume of protective gas supplied to the spray torch through the fluidized bed system nozzles located in the midsection of the atomizer spraying chamber. The study showed that by increasing the current strength and the plasma-forming gas velocity, it is possible to reduce the average size of the powder particles; and by changing the volume of the protective gas supply, it is possible to control the particle shape. The analysis of the chemical composition of the obtained powders shows that during the spraying process, there is no loss of alloying elements and the powder composition is the same as the original feedstock compositions. The paper gives the developed modes for the alloy feedstocks spraying, shows the possibility to produce metal powders with the level of the spherical shape factor of 92–96 % and minimal – not exceeding 0.5 % of powder aggregate weight – number of particles with nonmetallic inclusions, external and internal defects.

Keywords: additive technologies; plasma atomization; metal and alloy powders; spraying modes; granulometric composition; spherical shape factor; 12H18N9 steel; VG98 alloy.

For citation: Ermakov S.B. Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15.

Структурно-фазовые превращения при деформации сплавов Fe-Co-V методом кручения под высоким давлением

© 2021

Мурадинова Ляйсан Фанисовна^{1,3}, аспирант*Глезер Александр Маркович*^{*1,4}, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник*Ширшиков Станислав Олегович*¹, аспирант*Щетинин Игорь Викторович*¹, кандидат технических наук, доцент*Дьяконов Дмитрий Львович*², старший научный сотрудник¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва (Россия)²Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина, Москва (Россия)

*E-mail: a.glezer@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4891-8681>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3491-1326>

Аннотация: Сплавы Fe-Co относятся к классу магнитно-мягких материалов и обладают при комнатной температуре очень высоким значением намагниченности насыщения σ . В частности, сплав Fe-Co с эквиатомным соотношением компонентов имеет при комнатной температуре максимальное значение σ среди всех известных ферромагнитных материалов. К сожалению, уникальные магнитные свойства этих сплавов (особенно Fe-Co) трудно реализовать из-за их высокой хрупкости, которая обусловлена главным образом формированием в структуре дальнего атомного упорядочения по типу B2. Для повышения пластичности сплавы Fe-Co легируют ванадием, но при этом снижаются основные магнитные характеристики. В данной статье с помощью рентгеноструктурного анализа, просвечивающей электронной микроскопии и магнитометрии проанализировано влияние кручения под высоким давлением при температурах 77 и 295 К на структуру и фазовый состав магнитно-мягких сплавов $(\text{Fe-Co})_{100-x}\text{V}_x$ ($x=0-6,0$). В качестве основного структурного параметра до и после деформации анализировалась величина объемной доли γ -фазы в ОЦК магнитной матрице. Установлено, что пластическая деформация приводит к подавлению образования избыточной γ -фазы в сплавах, содержащих (3,0–6,0) % V. Показано, что исчезновение γ -фазы наблюдается по мере роста деформации методом кручения под высоким давлением сначала в сплавах с высоким содержанием ванадия и при деформационном воздействии при более высокой температуре (295 К). Сделано заключение, что обнаруженный эффект является следствием протекания мартенситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$, обусловленного деформацией, по аналогии с ТРИП-эффектом. Выявлено, что подавление парамагнитной γ -фазы ведет к заметному повышению удельной намагниченности насыщения.

Ключевые слова: магнитно-мягкий сплав; намагниченность насыщения; структура; парамагнитная фаза; мартенситное превращение; пластичность; мегапластическая деформация; SPD; КВД.

Для цитирования: Мурадинова Л.Ф., Глезер А.М., Ширшиков С.О., Щетинин И.В., Дьяконов Д.Л. Структурно-фазовые превращения при деформации сплавов Fe-Co-V методом кручения под высоким давлением // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 16–23. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-16-23.

ВВЕДЕНИЕ

Сплав Fe-Co с эквиатомным соотношением компонентов относится к классу магнитно-мягких материалов и обладает при комнатной температуре очень высоким значением намагниченности насыщения среди существующих ферромагнитных материалов [1]. Однако эффективная реализация уникальных магнитных свойств этого сплава встречает серьезные трудности из-за высокой склонности к хрупкому разрушению. Установлено, что охрупчивание обусловлено преимущественно образованием дальнего атомного упорядочения по типу B2 [2; 3]. Для повышения пластичности сплав Fe-Co легируют, как правило, ванадием. Это благоприятно сказывается на пластичности, но приводит к некоторому снижению высоких магнитных характеристик [4]. Последнее обусловлено главным образом выделением при легировании ванадием парамагнитной γ -фазы (ГЦК), а также снижением магнитного момента матричной α -фазы Fe-Co-V [5]. В ряде работ были определены

концентрационные границы существования двухфазной области ($\alpha+\gamma$) при легировании сплава Fe-Co ванадием, но полученные результаты являются достаточно противоречивыми. Так, согласно [6; 7], γ -фаза образуется в сплавах, содержащих более 2 ат.% V, а в соответствии с [8; 9] – при содержании более (2,5–3,0) ат.% V. В работе [10] указана очень высокая граничная концентрация ванадия (5 %), а в [11] – очень низкая (1,5 %). Подобные колебания критической концентрации связаны, очевидно, с некоторым различием в соотношении компонентов в сплавах и в режимах их предварительной термической обработки. Можно ли избежать отрицательного влияния ванадия на магнитные свойства сплава Fe-Co, сохранив при этом достаточно высокую пластичность?

В последнее время было обнаружено, что большая (мегапластическая) деформация (SPD – severe plastic deformation) способна не только эффективно влиять на размер зерна поликристаллических материалов на основе Fe, Ni и Cu и других металлов, но и существенно трансформировать их фазовый состав [12–14]. Сплавы на

основе Fe-Co также подвергались SPD [15–18], однако при этом основное внимание уделялось формированию микрозернистой структуры и ее влиянию на механические и магнитные свойства. В данной работе мы предприняли попытку воздействовать не только на структуру, но и на фазовый состав ферромагнитных сплавов Fe-Co-V, содержащих различную концентрацию ванадия, с помощью SPD при различных температурах. При легировании ванадием в тройных сплавах сохранялось эквивалентное соотношение атомов железа и кобальта.

Цель исследования – систематическое изучение влияния большой пластической деформации путем кручения под высоким давлением (КВД) на склонность к образованию в сплавах, легированных ванадием, парамагнитной γ -фазы, которая оказывает отрицательное влияние на ферромагнитные свойства.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сплавы $(\text{Fe-Co})_{100-x}\text{V}_x$ ($x=0; 1,5; 3,0; 4,5; 6,0$) были выплавлены в вакуумной печи в виде стержней диаметром 10 мм. Далее из них были изготовлены диски толщиной 0,5 мм, которые были отожжены в атмосфере аргона при температуре 800 °С в течение 50 ч с последующим охлаждением до комнатной температуры со скоростью 100 град/час. Дискообразные образцы всех сплавов были подвергнуты пластической деформации КВД при комнатной (295 К) и криогенной (77 К) температурах при $N=1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4$ и 6, где N – число полных оборотов подвижной наковальни при квазигидростатическом давлении 6 ГПа и при скорости вращения подвижной наковальни 1 об/мин. Величина истинной логарифмической деформации e в процессе кручения под давлением определялась по формуле [10]

$$e = \ln \left(1 + \left(\frac{\varphi \cdot r}{h} \right)^2 \right)^{0,5} + \ln \left(\frac{h_0}{h} \right), \quad (1)$$

где φ – угол поворота подвижной наковальни;
 r и h – соответственно радиус и высота образца в виде диска.

Значение e в соответствии с (1) варьировалось в пределах 5–9.

Рентгеноструктурный анализ образцов до и после SPD проводился на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием излучения $\text{CoK}\alpha$ и графитового монохроматора. Дифрактограммы снимались по методу Брегга – Брентано в интервале углов 30–125° с шагом 0,1°. Анализ дифрактограмм проводился с использованием модифицированного метода Ритвелда. В качестве структурного параметра до и после деформации определялось значение объемной доли γ -фазы C_γ . Полученные рентгенограммы обрабатывались с помощью программы Rigaku PDXL (Фирма “Rigaku Corp.”, Япония) [19], в которой учитывались фактор Дебая – Уэллера, поляризационный фактор Лоренца, а также кристаллографическая текстура. Ошибка в определении

объемной доли γ -фазы не превышала 5 %. Минимальное ненулевое значение C_γ составляло 1 об.%.

Электронно-микроскопические исследования проводились на просвечивающем электронном микроскопе JEM 1400 при ускоряющем напряжении 120 кВ с применением методики темного поля высокого разрешения. Измерение удельной намагниченности насыщения σ осуществлялось при комнатной температуре. В экспериментах использовался вибрационный магнитометр VSM-250. Напряженность постоянного магнитного поля изменялась в пределах 80–640 кА/м с минимальным шагом 0,8 А/м. Калибровка прибора была проведена по эталонному образцу чистого никеля. Для исследований отбирались практически идеально круглые образцы, лишенные трещин. Значения σ усреднялись по результатам измерений четырех различных образцов для каждого режима деформации. Ошибка в измерении значения σ не превышала 3 %.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 а представлена зависимость объемной доли γ -фазы C_γ от концентрации ванадия в исходном (до деформации) состоянии изученных сплавов. В сплавах Fe-Co и Fe-Co-1,5%V γ -фазы не обнаружено. При более высоких концентрациях ванадия наблюдается плавный рост значения C_γ от 2,0 до 6,7 об.% по мере роста содержания ванадия от 3,0 до 6,0 % соответственно. После деформационной обработки методом кручения под высоким давлением при 295 К характер зависимости C_γ (% V) существенно изменяется (рис. 1 б–г). Наблюдается эффект подавления образования γ -фазы в сплавах с высоким содержанием ванадия. Эффект выражен тем больше, чем выше величина деформации при НРТ (High Pressure Torsion). Если после $N=0,5$ γ -фаза не наблюдается только в сплаве с 6,0 % V, то после $N=1$ она не обнаруживается уже в двух сплавах с 6,0 и 4,5 % V. Наконец, после $N=2$ γ -фаза отсутствует в трех сплавах с 6,0, 4,5 и 3,0 % V. Значения C_γ в изученных сплавах после деформации варьируются в пределах 3–4 об.%.

На рис. 2 представлена зависимость максимальной концентрации ванадия в изученных сплавах Fe-Co-V, для которых зафиксирована γ -фаза, от величины деформации N в процессе кручения под давлением при различных температурах (% V_{max}). Отмечается четкая закономерность: чем больше величина деформации, тем ниже значение % V_{max} . Наблюдающиеся на рис. 2 зависимости свидетельствуют о том, что кручение при комнатной температуре более эффективно снижает значение % V_{max} , нежели деформация при криогенной температуре.

На рис. 3 представлены типичные электронно-микроскопические изображения микроструктуры сплава Fe-Co-4,5%V в исходном состоянии (до деформации) (рис. 3 а–с) и после НРТ ($N=1$) при 77 К (рис. 3 д). Аналогичный характер структуры наблюдался в исходном состоянии сплавов с (3,0–6,0) % V. Тонкие прослойки γ -фазы располагаются, как правило, между пластинами пакетного мартенсита α -фазы (рис. 3 б, рис. 3 с). После кручения вне зависимости от температуры и величины деформации γ -фаза не наблюдалась либо наблюдалась

в виде наночастиц размером 10–50 нм, имеющих сферическую или вытянутую форму (рис. 3 d). На основании рентгеновских и электронно-микроскопических данных средний размер наночастиц γ -фазы увеличивался от 10 до 50 нм по мере роста концентрации ванадия в сплаве соответственно от 3,0 до 6,0 %.

На рис. 4 представлены результаты измерений удельной намагниченности насыщения σ для сплавов

Fe-Co и Fe-Co-6,0%V в зависимости от N (от величины деформации ϵ) после кручения под давлением при комнатной температуре. Если значение σ для бинарного сплава Fe-Co практически не меняется со значением N (слегка снижается), то в сплаве, легированном 6,0 % V, по мере роста пластической деформации наблюдается заметный рост σ (примерно на 15 %). Как следствие, значение σ для тройного сплава с 6,0 % V после кручения

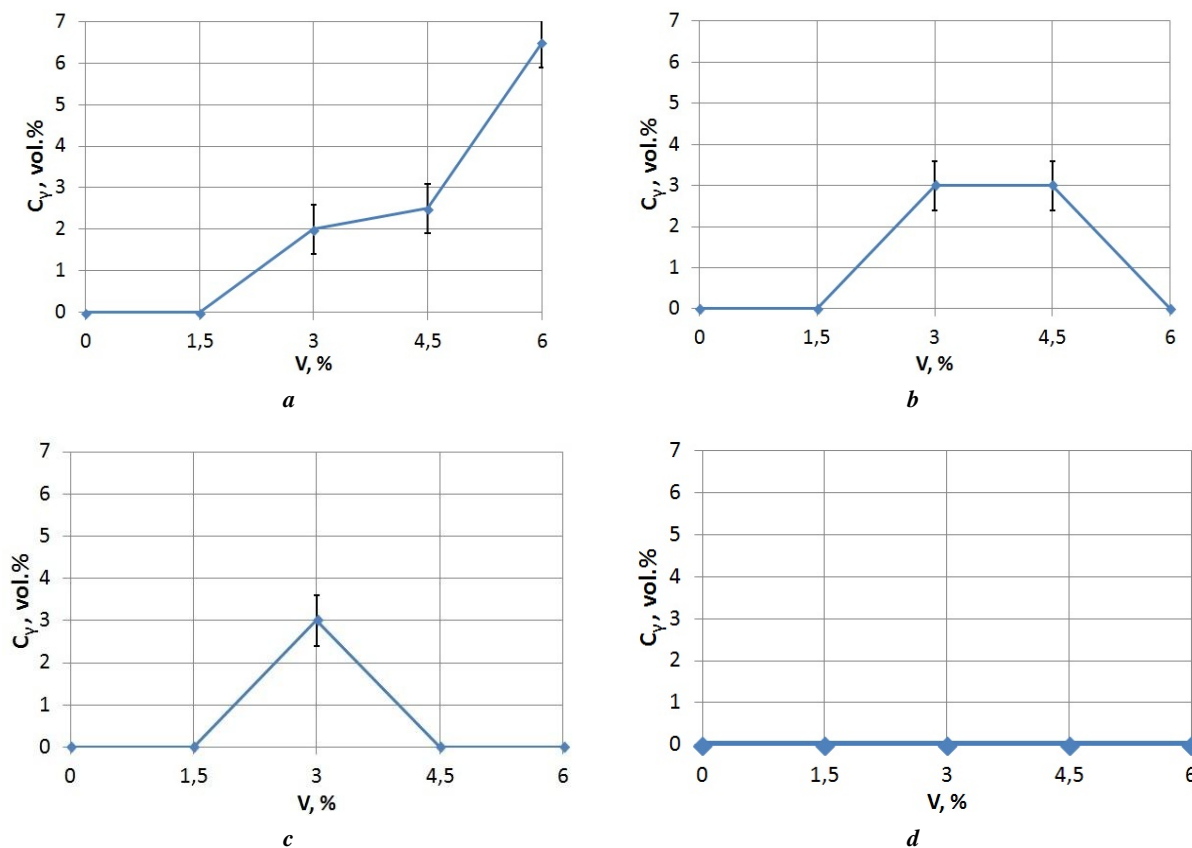


Рис. 1. Зависимость объемной доли γ -фазы C_γ от содержания ванадия в сплавах Fe-Co-V до КВД (a) и после КВД при 295 K: $N=0,5$ (b); $N=1,0$ (c); $N=2,0$ (d)

Fig. 1. The dependence of γ -phase C_γ volume ratio on vanadium content in the Fe-Co-V alloys before HPT (a) and after HPT at 295 K: $N=0.5$ (b); $N=1.0$ (c); $N=2.0$ (d)

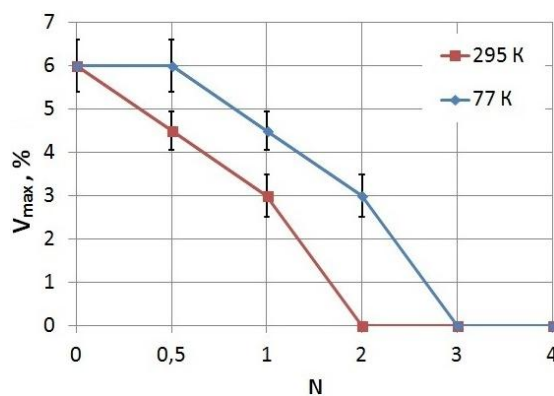


Рис. 2. Зависимость максимального содержания ванадия в сплаве, где наблюдается γ -фаза, от значения N при 77 и 295 K

Fig. 2. The dependence of maximal content of vanadium in the alloy with γ -phase on the value N at 77 and 295 K

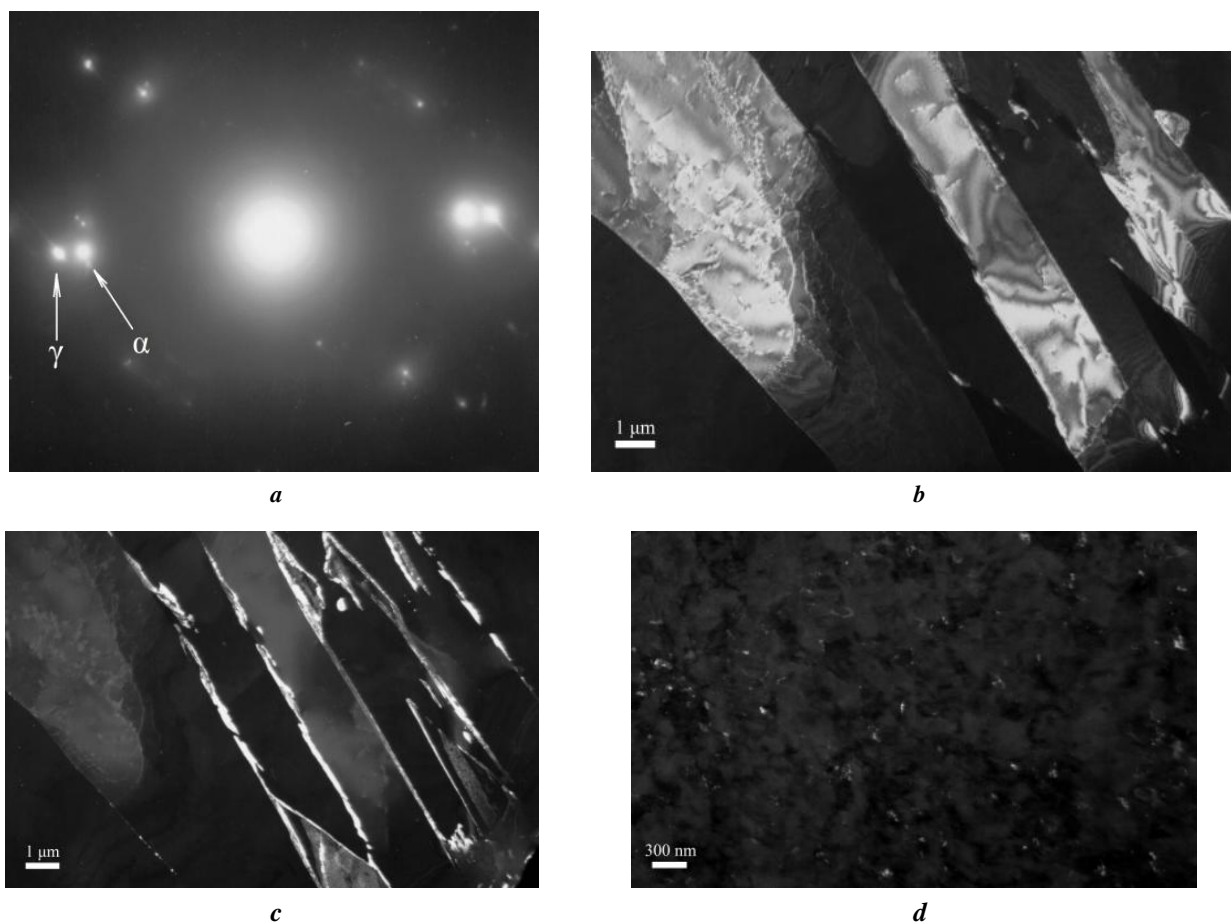


Рис. 3. Структура сплава Fe-Co-4,5%V до КВД (а-с) и после КВД ($N=1$; 77 K) (d):
 а – микроэлектроннограмма; б – темное поле в рефлексе α -фазы; в, d – темное поле в рефлексе γ -фазы
Fig. 3. The structure of Fe-Co-4.5%V alloy before HPT (a-c) and after HPT ($N=1$; 77 K) (d):
 a – micro-electron-diffraction pattern; b – dark field in the α -phase reflection; c, d – dark field in the γ -phase reflection

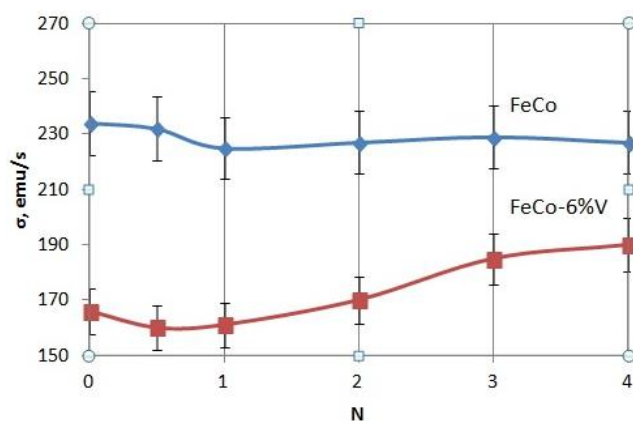


Рис. 4. Зависимость удельной намагниченности насыщения σ от величины N (295 K) для сплавов Fe-Co и Fe-Co-6%V
Fig. 4. The dependence of specific saturation magnetization σ on the value N (295 K) for the Fe-Co and Fe-Co-6%V alloys

под давлением ($N=4$) заметно приближается к аналогичной характеристике σ бинарного сплава Fe-Co. В результате разницы значений σ , сокращается примерно в два раза (рис. 4).

Итак, мы видим, что кручение под высоким давлением приводит к снижению объемной доли избыточной γ -фазы в структуре сплавов Fe-Co-(3,0–6,0)%V по мере роста величины деформации. После $N \geq 2$ при 295 К и после $N \geq 3$ при 77 К выделение γ -фазы в изученных сплавах полностью подавляется вне зависимости от содержания ванадия (рис. 2).

Хорошо известно, что в сплавах Fe-Co-V при охлаждении в области высоких температур (750–900 °С) наблюдается полиморфное превращение $\gamma(\text{ГЦК}) \rightarrow \alpha(\text{ОЦК})$, которое происходит по диффузионному механизму при $\% V < 2,0$ и по мартенситному механизму при $\% V \geq 2,0$ [1]. В последнем случае во всем объеме сплава образуется пакетный мартенсит, и лишь затем в процессе последующего медленного охлаждения на границах мартенситных кристаллов и фрагментов формируется избыточная γ -фаза. Результаты электронно-микроскопических исследований, представленные на рис. 3 а–с, подтверждают эти закономерности. Следует отметить, что состав высокотемпературной γ -фазы соответствует содержанию основных компонентов сплава, в то время как избыточная γ -фаза, наблюдающаяся при комнатной температуре в сплавах с (3,0–6,0) % V, существенно обогащена атомами ванадия. По данным работы [20] избыточная γ -фаза в сплаве Fe-Co-2,0%V обогащена кобальтом и ванадием (65 % Co и 22 % V) и не претерпевает низкотемпературного фазового превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ при охлаждении до температуры 77 К. В сплавах с (3,0–6,0) % V, содержащих избыточную γ -фазу, при малых значениях N в процессе деформации при 295 и 77 К отмечается заметное изменение ее морфологии. Наблюдаются однородно распределенные в объеме α -фазы наночастицы, средний размер которых изменяется по мере роста содержания ванадия и в зависимости от температуры деформации (рис. 3 d).

Полное исчезновение в структуре частиц γ -фазы (рис. 2) связано, скорее всего, с протеканием в процессе пластической деформации мартенситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$. Эффект появления при пластической деформации мартенситных фаз, которые не образуются в процессе термической обработки, связан с расширением температурного интервала мартенситных превращений под действием пластических деформаций [21]. В нашем случае речь идет о больших (мегапластических) деформациях. Причина этого явления заключается в том, что деформация приводит к заметному увеличению термодинамического стимула мартенситного превращения при относительно низких температурах [22].

Смещение мартенситной точки T_M при приложении эффективных внешних напряжений $\sigma(e)$ можно описать уравнением Клайперона:

$$\frac{dT_M}{d\sigma} = \varepsilon_0 \left(\frac{VT_0}{\Delta H} \right), \quad (2)$$

где ε_0 – собственная деформация превращения;
V – объем грамм-моля вещества;

T_0 – температура термодинамического равновесия γ - и α -фаз;

ΔH – изменение энтальпии превращения.

Так как все величины, входящие в правую часть уравнения (2), в первом приближении постоянны, количество мартенситной фазы при заданной температуре линейно растет с ростом критического напряжения $\sigma_{cr}(e_{cr})$, соответствующего протеканию мартенситного превращения при пластической деформации.

При $N(e_{cr}) \geq 2$ все наночастицы γ -фазы в нашем случае претерпели мартенситное превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ в процессе КВД при 295 К и при $N(e_{cr}) \geq 3$ – при температуре 77 К. Более эффективное влияние кручения под давлением при комнатной температуре по сравнению с КВД при 77 К свидетельствует о том, что при мартенситном $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении определенную роль могут играть термически активируемые процессы. Аналогичный результат был получен нами ранее при изучении мартенситного превращения $\alpha \rightarrow \omega$ в α -Ti в процессе кручения при различных температурах [23]. Образование мартенситной ω -фазы наблюдалось на более ранних стадиях деформации при 295 К по сравнению с деформацией при 77 К.

Обнаруженное нами мартенситное превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ при больших пластических деформациях в сплавах Fe-Co-(3,0–6,0)%V по существу аналогично активации ТРИП-эффекта (мартенситного превращения, обусловленного пластической деформацией [24]). Отличие состоит лишь в том, что мартенситное превращение вызвано не обычной, а мегапластической деформацией.

Интересной особенностью обнаруженного нами эффекта является то, что подавление γ -фазы по мере роста величины деформации $N(e)$ сначала происходит в сплаве с высоким содержанием V (6 %) при $N \geq 0,5$ (295 К) и $N \geq 1,0$ (77 К) (рис. 2). Далее по мере роста $N(e)$ предельное содержание ванадия в сплаве, где еще наблюдается существование γ -фазы, линейно снижается (рис. 2).

Подобный эффект может быть объяснен следующими причинами:

1. По мере роста содержания ванадия в сплаве заметно растет относительное содержание ванадия в γ -фазе [20]. Соответственно, по мере роста % V может снижаться критическое напряжение σ_{cr} и, следовательно, величина деформации e_{cr} , при которой происходит мартенситное превращение, стимулированное деформацией.

2. Средний размер частиц γ -фазы при кручении под давлением до мартенситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ (рис. 3 d), как мы установили, заметно растет от 10 до 50 нм по мере увеличения % V в сплаве. Как известно, существует размерный эффект, при котором стимул к мартенситному превращению в наночастицах существенно снижается по мере снижения размера частиц исходной фазы [25]:

$$M = M_0 - K_M d_{av}^{-1/2}, \quad (3)$$

где M – доля превращенного объема при мартенситном превращении;

$M_0 = K_I(T^* - T_d)$,

где T^* – температура термодинамического равновесия γ - и α -фаз; T_d – температура деформации;

d_{av} – средний размер частиц γ -фазы;

K_M и K_I – константы.

В нашем случае подобный эффект, описываемый уравнением (3), может приводить к относительной стабилизации частиц γ -фазы с меньшим размером d_{av} в сплавах с более низким содержанием ванадия.

Эффект подавления образования γ -фазы под воздействием мегапластической деформации наглядно подтверждается характером изменения удельной намагниченности насыщения σ (рис. 4). Поскольку γ -фаза имеет парамагнитную природу [26], ее исчезновение в сплавах с (3,0–6,0) % V приводит к заметному росту значения σ и, как следствие, к повышению эффективности их применения в качестве высокопрочных магнитно-мягких материалов с высокой магнитной индукцией. При этом оптимальный режим термической обработки, не приводящий к повторному появлению в структуре γ -фазы, по-видимому, может исключить нежелательный рост коэрцитивной силы, наблюдающийся под воздействием кручения под давлением.

В рамках обсуждения полученных результатов мы должны рассмотреть еще один фактор, который может повлиять на структурное состояние сплавов при воздействии НРТ. Этим фактором является высокое гидростатическое давление (6 ГПа), которое в нашем случае воздействует на образец в процессе кручения в камере Бриджмена. В соответствии с [22] после преобразования уравнения (2) имеем

$$\Delta T_0(\sigma_{hs}) = \frac{T_0(0)}{q\sigma_{hs}\left(\frac{\Delta v}{v}\right)}, \quad (4)$$

где $T_0(\sigma_{hs})$ – изменение температуры фазового превращения при переходе менее плотной α -фазы в более плотную γ -фазу под воздействием гидростатического напряжения σ_{hs} ;

$T_0(0)$ – температура превращения при отсутствии гидростатического давления;

q – теплота фазового перехода;

$\Delta v/v$ – относительное изменение удельного объема γ - и α -фаз.

Иными словами, высокое гидростатическое давление должно в принципе стимулировать образование (снижать значение T_0) более плотной γ -фазы, что, однако, не наблюдалось в наших экспериментах. Исходя из измеренных нами рентгеновским методом значений параметров решетки γ - и α -фаз в изученных сплавах Fe-Co-V, имеем $\Delta v/v \approx 0,06$. По существу это означает, что в соответствии с выражением (4) и с учетом реальных значений q и σ_{hs} [1; 12] эффекты стабилизации γ -фазы под воздействием гидростатического давления 6 ГПа в наших экспериментах невелики ($\Delta T_0 \leq 10$ К), и ими можно пренебречь.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что кручение под высоким давлением (КВД) при температурах 77 и 295 К приводит к исчезновению избыточной γ -фазы в магнитно-мягких сплавах Fe-Co-V, содержащих (3,0–6,0) % V.

2. Показано, что обнаруженный эффект, скорее всего, является следствием активации при КВД мартен-

ситного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ по аналогии с ТРИП-эффектом.

3. Обнаружено, что полное исчезновение γ -фазы происходит по мере роста величины деформации при КВД сначала в сплавах с высоким содержанием ванадия и под воздействием КВД при 295 К.

4. Установлено, что эффект подавления парамагнитной γ -фазы в изученных сплавах сопровождается заметным повышением удельной намагниченности насыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sourmail T. Near equiatomic FeCo alloys: constitution, mechanical and magnetic properties // *Progress in Materials Science*. 2005. Vol. 50. № 7. P. 816–860.
2. Nabi B., Helbert A.L., Brisset F., Andre G., Waeckerle T., Baudin T. Effect of recrystallization and degree of order on the magnetic and mechanical properties of soft magnetic FeCo-2V alloy // *Materials science and engineering a-structural materials properties microstructure and processing*. 2013. Vol. 578. P. 215–221.
3. Turk C., Leitner H., Kellezi G., Clemens H., Gan W.M., Staron P., Primig S. Impact of the B2 ordering behavior on the mechanical properties of a FeCoMo alloy // *Materials science and engineering a-structural materials properties microstructure and processing*. 2016. Vol. 662. P. 511–518.
4. Glezer A.M., Muradimova L.F., Shirshikov S.O., Shchetinin I.V., D'yakonov D.L., Tomchuk A.A. Effect of large plastic deformations in Bridgman chamber on the structure and properties of FeCo-V alloys // *Bulletin of the Russian Academy Sciences: Physics*. 2019. Vol. 83. № 10. P. 1250–1260.
5. Hasani S., Shafyei A., Shamsian M., Behjati P., Mostaan H., Juuti T., Szpunar J. Correlation Between Magnetic Properties and Allotropic Phase Transition of Fe-Co-V alloy // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2015. Vol. 28. № 8. P. 1055–1058.
6. Ashby J.A., Flower H.M., Rawlings R.D. Gamma phase in an Fe-Co-2%V alloy // *Metal Science*. 1977. Vol. 11. № 3. P. 91–96.
7. Pitt C.D., Rawlings R.D. Microstructure of Fe-Co-2V and Fe-Co-V-Ni alloys containing 1.8–7.4 wt.% Ni // *Metal Science*. 1981. Vol. 15. P. 369–376.
8. Mahajan S., Pinnel M.R., Bennet J.E. Influence of heat treatments on microstructures in an Fe-Co-V alloy // *Metall Trans*. 1974. Vol. 5. № 6. P. 1263–1272.
9. Bennet J.E., Pinnel M.R. Aspects of phase equilibria in Fe/Co/2.5 to 3.0% V alloys // *Journal of Materials Science*. 1974. Vol. 9. № 7. P. 1083–1090.
10. Fiedler H.S., Davies A.M. The formation of gamma phase in Vanadium Permendur // *Metallurgical Transactions*. 1970. Vol. 1. № 4. P. 1036–1037.
11. Foster W., Schmid H. Iron-Cobalt-Vanadium Ternary System. Part I // *Archiv Eisenhüttenw*. 1955. Vol. 10. P. 345–353.
12. Glezer A.M., Sundeev R.V. General view of severe plastic deformation in solid state // *Materials Letters*. 2015. Vol. 139. P. 455–457.
13. Shabashov V., Sagaradze V., Kozlov K., Ustyugov Y. Atomic Order and Submicrostructure in Iron Alloys at

- Megaplastic Deformation // *Metals*. 2018. Vol. 8. № 12. P. 995–1018.
14. Straumal B.B., Pontikis V., Kilmametov A.R., Mazilkin A.A., Dobatkin S.V., Baretzky B. Competition between precipitation and dissolution in Cu–Ag alloys under high pressure torsion // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 60–71.
 15. Susan D.F., Jozaghi T., Karaman I., Rodelas J.M. Equal channel angular extrusion for bulk processing of Fe-Co-2V soft magnetic alloys. Part I: Processing and mechanical properties // *Journal of Materials Research*. 2018. Vol. 33. № 15. P. 2168–2175.
 16. Poudyal N., Rong C., Zhang Y., Wang D., Kramer M.J., Hebert R.J., Ping Liu J. Self-nanoscaling in FeCo alloys prepared via severe plastic deformation // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. Vol. 521. P. 55–59.
 17. Wu L.-Z., Chen J., Du Z.-Z., Wang J.-T. Microstructures of ultra-fine grained FeCoV alloys processed by ECAP plus cold rolling and their evolutions during tempering // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. Vol. 20. № 4. P. 602–606.
 18. Scheriau S., Rumpf K., Kleber S., Pippin R. Tailoring the Magnetic Properties of Ferritic Alloys by HPT // *Materials Science Forum*. 2008. Vol. 584-586. P. 923–928.
 19. Advanced integrated X-ray powder diffraction suite PDXL 2 // *Rigaku Journal*. 2012. Vol. 28. № 1. P. 29–30.
 20. Pitt C.D., Rawlings R.D. Microstructure of Fe-Co-2V and Fe-Co-V-Ni alloys containing 1.8-7.4 wt-%Ni // *Metal Science*. 1981. Vol. 15. № 8. P. 369–376.
 21. Kakeshita T., Saburi T., Kindo Sh., Endo K. Effect of Magnetic Field and Hydrostatic Pressure on Martensitic Transformation and Its Kinetics // *Japanese Journal of Applied Physics*. Part 1: Regular papers and short notes and review papers. 1997. Vol. 36. № 12. P. 7083–7091.
 22. Roitburd A.L., Kurdyumov G.V. The nature of the martensitic transformation // *Materials Science and Engineering*. 1979. Vol. 39. № 2. P. 141–167.
 23. Shurygina N.A., Cheretaeva A.O., Glezer A.M., D'yakonov D.L., Shchetinin I.V., Sundeev R.V., Tomchuk A.A., Muradimova L.F. Effect of the Temperature of Megaplastic Deformation in a Bridgman Chamber on the Formation of Structures and the Physicochemical Properties of Titanium (BT1-0) // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2018. Vol. 82. № 9. P. 1113–1124.
 24. Waitz T., Tsuchiya K., Antretter T., Fischer F.D. Phase Transformations of Nanocrystalline Martensitic Materials // *MRS Bulletin*. 2009. Vol. 34. № 11. P. 814–823.
 25. Glezer A.M., Blinova E.N., Pozdnyakov V.A., Shelyakov A.V. Martensite Transformation in Nanoparticles and Nanomaterials // *Journal of Nanoparticle Research*. 2003. Vol. 5. № 5-6. P. 551–560.
 26. Persiano A.I.C., Rawlings R.D. A Mössbauer Investigation of Equiatomic FeCo with Vanadium and Niobium Additions // *Physica Status Solidi (a)*. 1987. Vol. 103. № 2. P. 547–556.
 2. Nabi B., Helbert A.L., Brisset F., Andre G., Waeckerle T., Baudin T. Effect of recrystallization and degree of order on the magnetic and mechanical properties of soft magnetic FeCo-2V alloy. *Materials science and engineering a-structural materials properties microstructure and processing*, 2013, vol. 578, pp. 215–221.
 3. Turk C., Leitner H., Kellezi G., Clemens H., Gan W.M., Staron P., Primig S. Impact of the B2 ordering behavior on the mechanical properties of a FeCoMo alloy. *Materials science and engineering a-structural materials properties microstructure and processing*, 2016, vol. 662, pp. 511–518.
 4. Glezer A.M., Muradimova L.F., Shirshikov S.O., Shchetinin I.V., D'yakonov D.L., Tomchuk A.A. Effect of large plastic deformations in Bridgman chamber on the structure and properties of FeCo-V alloys. *Bulletin of the Russian Academy Sciences: Physics*, 2019, vol. 83, no. 10, pp. 1250–1260.
 5. Hasani S., Shafyei A., Shamanian M., Behjati P., Mostaan H., Juuti T., Szpunar J. Correlation Between Magnetic Properties and Allotropic Phase Transition of Fe-Co-V alloy. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2015, vol. 28, no. 8, pp. 1055–1058.
 6. Ashby J.A., Flower H.M., Rawlings R.D. Gamma phase in an Fe-Co-2%V alloy. *Metal Science*, 1977, vol. 11, no. 3, pp. 91–96.
 7. Pitt C.D., Rawlings R.D. Microstructure of Fe-Co-2V and Fe-Co-V-Ni alloys containing 1.8–7.4 wt.% Ni. *Metal Science*, 1981, vol. 15, pp. 369–376.
 8. Mahajan S., Pinnel M.R., Bennet J.E. Influence of heat treatments on microstructures in an Fe-Co-V alloy. *Metal Trans*, 1974, vol. 5, no. 6, pp. 1263–1272.
 9. Bennet J.E., Pinnel M.R. Aspects of phase equilibria in Fe/Co/2.5 to 3.0% V alloys. *Journal of Materials Science*, 1974, vol. 9, no. 7, pp. 1083–1090.
 10. Fiedler H.S., Davies A.M. The formation of gamma phase in Vanadium Permendur. *Metallurgical Transactions*, 1970, vol. 1, no. 4, pp. 1036–1037.
 11. Foster W., Schmid H. Iron-Cobalt-Vanadium Ternary System. Part I. *Archiv Eisenhüttenw*, 1955, vol. 10, pp. 345–353.
 12. Glezer A.M., Sundeev R.V. General view of severe plastic deformation in solid state. *Materials Letters*, 2015, vol. 139, pp. 455–457.
 13. Shabashov V., Sagaradze V., Kozlov K., Ustyugov Y. Atomic Order and Submicrostructure in Iron Alloys at Megaplastic Deformation. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 12, pp. 995–1018.
 14. Straumal B.B., Pontikis V., Kilmametov A.R., Mazilkin A.A., Dobatkin S.V., Baretzky B. Competition between precipitation and dissolution in Cu–Ag alloys under high pressure torsion. *Acta Materialia*, 2017, vol. 122, pp. 60–71.
 15. Susan D.F., Jozaghi T., Karaman I., Rodelas J.M. Equal channel angular extrusion for bulk processing of Fe-Co-2V soft magnetic alloys. Part I: Processing and mechanical properties. *Journal of Materials Research*, 2018, vol. 33, no. 15, pp. 2168–2175.
 16. Poudyal N., Rong C., Zhang Y., Wang D., Kramer M.J., Hebert R.J., Ping Liu J. Self-nanoscaling in FeCo alloys prepared via severe plastic deformation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 521, pp. 55–59.

REFERENCES

1. Sourmail T. Near equiatomic FeCo alloys: constitution, mechanical and magnetic properties. *Progress in Materials Science*, 2005, vol. 50, no. 7, pp. 816–860.

17. Wu L.-Z., Chen J., Du Z.-Z., Wang J.-T. Microstructures of ultra-fine grained FeCoV alloys processed by ECAP plus cold rolling and their evolutions during tempering. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, vol. 20, no. 4, pp. 602–606.
18. Scheriau S., Rumpf K., Kleber S., Pippin R. Tailoring the Magnetic Properties of Ferritic Alloys by HPT. *Materials Science Forum*, 2008, vol. 584-586, pp. 923–928.
19. Advanced integrated X-ray powder diffraction suite PDXL 2. *Rigaku Journal*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 29–30.
20. Pitt C.D., Rawlings R.D. Microstructure of Fe-Co-2V and Fe-Co-V-Ni alloys containing 1.8-7.4 wt-%Ni. *Metal Science*, 1981, vol. 15, no. 8, pp. 369–376.
21. Kakeshita T., Saburi T., Kindo Sh., Endo K. Effect of Magnetic Field and Hydrostatic Pressure on Martensitic Transformation and Its Kinetics. *Japanese Journal of Applied Physics. Part 1: Regular papers and short notes and review papers*, 1997, vol. 36, no. 12, pp. 7083–7091.
22. Roitburd A.L., Kurdyumov G.V. The nature of the martensitic transformation. *Materials Science and Engineering*, 1979, vol. 39, no. 2, pp. 141–167.
23. Shurygina N.A., Cheretaeva A.O., Glezer A.M., D'yakonov D.L., Shchetinin I.V., Sundeev R.V., Tomchuk A.A., Muradimova L.F. Effect of the Temperature of Megaplastic Deformation in a Bridgman Chamber on the Formation of Structures and the Physicochemical Properties of Titanium (BT1-0). *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2018, vol. 82, no. 9, pp. 1113–1124.
24. Waitz T., Tsuchiya K., Antretter T., Fischer F.D. Phase Transformations of Nanocrystalline Martensitic Materials. *MRS Bulletin*, 2009, vol. 34, no. 11, pp. 814–823.
25. Glezer A.M., Blinova E.N., Pozdnyakov V.A., Shelyakov A.V. Martensite Transformation in Nanoparticles and Nanomaterials. *Journal of Nanoparticle Research*, 2003, vol. 5, no. 5-6, pp. 551–560.
26. Persiano A.I.C., Rawlings R.D. A Mössbauer Investigation of Equiatomic FeCo with Vanadium and Niobium Additions. *Physica Status Solidi (a)*, 1987, vol. 103, no. 2, pp. 547–556.

Structural phase transformations during deformation Of Fe-Co-V alloys using the high-pressure torsion method

© 2021

Lyaisan F. Muradimova^{1,3}, postgraduate student

Aleksandr M. Glezer^{*1,4}, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, leading researcher

*Stanislav O. Shirshikov*¹, postgraduate student

*Igor V. Shchetinin*¹, PhD (Engineering), Associate Professor

*Dmitriy L. Dyakonov*², senior researcher

¹National University of Science and Technology MISIS, Moscow (Russia)

²I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy, Moscow (Russia)

*E-mail: a.glezer@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4891-8681>

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3491-1326>

Abstract: Fe-Co alloys belong to the soft magnetic materials and have an extremely high value of saturation magnetization σ at room temperature. In particular, Fe-Co alloy with the equiatomic ratio of components at room temperature has the maximal σ value among all known ferromagnetic materials. Unfortunately, it is hard to reproduce the unique magnetic properties of these alloys (especially Fe-Co alloys) due to their high fragility caused mainly by the formation of far atomic ordering according to B2 type in the structure. Adding vanadium to the Fe-Co alloys increases plasticity, but it reduces basic magnetic characteristics. In this paper, using the X-ray structural analysis, transmission scanning microscopy, and magnetometry, the authors analyzed the influence of high-pressure torsion at the temperatures of 77 and 295 K on the structure and phase composition of soft magnetic alloys (Fe-Co)_{100-x}V_x ($x=0-6.0$). As the principal structural parameter before and after deformation, the authors analyzed the magnitude of γ -phase volume ratio in the BCC magnetic matrix. The study identified that plastic deformation causes the suppression of formation of excessive γ -phase in alloys containing (3.0–6.0) % V. The study shows that the loss of γ -phase is observed with the increase of high-pressure torsion deformation firstly in the alloys with the high vanadium proportion and at the deformation effect at higher temperature (295 K). The authors conclude that the detected effect is a consequence of $\gamma \rightarrow \alpha$ martensite transformation caused by deformation by analogy to TRIP-effect. The study identified that the suppression of paramagnetic γ -phase leads to a noticeable increase in the specific saturation magnetization.

Keywords: soft magnetic alloy; saturation magnetization; structure; paramagnetic phase; martensite transformation; plasticity; severe plastic deformation; SPD; HPT (high-pressure torsion).

For citation: Muradimova L.F., Glezer A.M., Shirshikov S.O., Shchetinin I.V., Dyakonov D.L. Structural phase transformations during deformation of Fe-Co-V alloys using the high-pressure torsion method. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 16–23. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-16-23.

Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов

© 2021

Носов Николай Васильевич^{*1}, доктор технических наук*Костин Никита Павлович*², магистр*Ладыгин Роман Владимирович*³, магистр

Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)

*E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-2098>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

Аннотация: Рассмотрен новый метод текстурного анализа прецизионных механически обработанных поверхностей, основанный на применении компьютерной оптики и автокорреляционного метода обработки полученных изображений текстур исследуемых микрорельефов. Метод основан на вероятностной сравнительной оценке неизвестной текстуры исследуемого микрорельефа с известными текстурами эталонных микрорельефов, для которых определены параметры микрорельефов. В статье предложен подход к идентификации шероховатости поверхности профиля пера лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) после виброконтактного полирования по параметрам текстуры корреляционной поверхности. Микрогеометрия поверхности спинки и корыта лопаток исследовалась на оптико-электронном комплексе на основе вычисления средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции, полученной в результате компьютерной обработки видеоизображения поверхности. Применение оптико-электронного метода оценки текстуры поверхности компрессорных и турбинных лопаток позволяет строить поля шероховатости поверхности и более глубоко анализировать технологию окончательной обработки профиля пера лопаток ГТД. Актуальность и новизна работы заключается в перспективном способе оценки параметров качества поверхности с помощью оптико-электронного метода, особенностью которого является измерение шероховатости площади поверхности, тогда как щуповые методы измеряют шероховатость профиля поверхности. Важным преимуществом предлагаемого метода является применение его для измерения параметров шероховатости криволинейной поверхности бесконтактным способом, что технологично, так как существуют поверхности деталей, не предполагающие их царапание алмазной иглой.

Ключевые слова: текстура; микрорельеф; прецизионная поверхность; бинарное изображение; цифровая обработка; оптико-электронный метод; идентификация микрорельефа; корреляционная поверхность; лопатки ГТД.

Для цитирования: Носов Н.В., Костин Н.А., Ладыгин Р.В. Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 24–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-24-31.

ВВЕДЕНИЕ

Шероховатость поверхности – важнейший показатель качества деталей в машиностроении, влияющий на их работоспособность [1]. Поэтому точное определение параметров микрогеометрии поверхности является приоритетной задачей при контроле обработанных поверхностей.

Существует множество методов измерения шероховатости, которые делятся на профильные (щуповые) и бесконтактные. Оба метода имеют свойственные им особенности и недостатки. У профильных методов имеются следующие недостатки: измерять шероховатость можно у деталей только простых геометрических форм; отсутствует возможность комплексно оценивать распределение микронеровностей в продольном и поперечном направлениях [2]; вероятны погрешности вследствие огибания микронеровностей щупом и преобразования механических колебаний в электрические; методы не применимы для поверхностей, не допускающих контакт с алмазной иглой; возможности для крупногабаритных деталей ограничены. К недостаткам бесконтактных методов относятся: наличие специальных микроскопов [3], что исключает их применение

в производственных условиях; повышенные требования к световому потоку, падающему на измеряемую поверхность; большое время на обработку видеоданных.

Вышеперечисленные методы – параметрические, с помощью которых измеряются высотные и шаговые параметры микрорельефа. В работах [4–6] авторы предлагают перейти к непараметрическому методу оценки, учитывающему эксплуатационные характеристики. Шероховатость оценивается графическим методом по плотности распределения ординат и тангенсов угла наклона профиля, график исследуемой поверхности сравнивается с эталонным графиком. В случае получения эталонного графика с применением профильного метода, картина распределения микронеровностей получается неполной, так как измерение проходит, как правило, в плоскости, перпендикулярной распределению микронеровностей. А в случае, если график получен измерением шероховатости поверхности бесконтактными методами, отсутствует возможность такого измерения в производственных условиях, к тому же высокая стоимость измерительной аппаратуры и необходимость ее обслуживания является ограничивающим фактором для ее широкого распространения.

В последнее десятилетие получили распространение методы определения параметров микрорельефа поверхности с помощью компьютерной обработки изображений исследуемой поверхности [7–9].

Применение компьютерных методов [4–9] для анализа микронеровностей поверхностей позволяет по-новому подойти к оценке качества изделий в машиностроении. К основным задачам описания микронеровностей относятся: выбор параметров, описывающих текстурные поверхности; классификация текстур по назначению; корреляция текстур с другими параметрами микронеровностей.

В работе авторы предлагают оптический метод анализа микрорельефа поверхности, при котором текстурный анализ является доминирующим. Он основан на описании поверхности с помощью автокорреляционной функции [10–12]. Данный метод применим к оценке шероховатости прецизионных поверхностей сложной формы и при стохастическом распределении микронеровностей, где не могут использоваться традиционные методы, так как они определяют только поперечную шероховатость профиля.

Разработка нового оптического метода контроля качества поверхности с использованием текстурного анализа позволит определять параметры микрорельефа поверхности в местах, недоступных в производственных и лабораторных условиях.

Цель исследования – разработка методики определения параметров микрогеометрии на площади поверхности и алгоритма перехода, связывающего параметры профиля и параметры площади поверхности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для разработки методики определения параметров микрогеометрии на площади поверхности был создан оптический прибор. Измерительная система включала микроскоп с видеокамерой, персональный компьютер и специальную программу, на которую получен патент [13]. Образец или деталь устанавливалась на инструментальный столик, затем камера фокусировалась на участок поверхности, делался цифровой снимок в черно-белом изображении, который передавался на компьютер.

Для работы программы необходимо внести в нее исходные данные, полученные при обработке специальных образцов (эталонов), у которых параметры микрогеометрии определены другими методами, в частности щуповыми измерительными системами. Специальные образцы обрабатывались шлифованием, а затем полировались при различных режимах. Это позволило получать поверхности в широком диапазоне шероховатости.

Известно, что на величину шероховатости большое влияние оказывает марка обрабатываемого материала, поэтому были подготовлены образцы из закаленной стали ШХ 15 HRC 62-65, титанового сплава ВТ8, жаропрочной стали ЭИ961Ш и никелевого сплава ЖС6ФУ. Исследование шероховатости поверхности образцов проводилось щуповым методом, в ходе которого определялись параметры шероховатости с использованием профилографа модели SJ-201P. Величина R_a образцов изменялась от 0,25 до 0,025 мкм. Параметры шерохова-

тости вычислялись по 10 образцам в каждой серии. Измеренные параметры шероховатости определялись по профилограммам профиля поверхности. Оптико-электронная система позволяет исследовать участок поверхности образцов площадью 7,5 мм² (3×2,5 мм). При этом плотность пикселей видеокадра, который передается в программу компьютера, зависела от кривизны поверхности и составляла от 240 до 600 dpi.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для идентификации поверхностей были выбраны 4 образца из закаленной стали ШХ 15 с разной шероховатостью поверхностей. Диапазон шероховатости подбирался таким образом, чтобы микрогеометрия поверхностей имела явно выраженную структуру, шероховатость поверхности в различных направлениях расходилась не более чем на 20 %, что невозможно получить при однонаправленной обработке, т. е. шероховатость $R_a \geq 0,15$ мкм. Первичная обработка видеоизображений начинается с корректировки формы поверхности образца: криволинейная поверхность преобразуется в плоскую. Для этого была создана подпрограмма разложения видеоизображения на плоскости [13]. Кроме того, с помощью программы определяется положение средней плоскости, соответствующее положению средней линии на профилограмме профиля (сечения) поверхности.

Для определения положения средней плоскости на видеоизображении находились точки максимальной и минимальной яркости, которая изменялась от 0 до 255 отн. ед. Положение средней плоскости соответствовало 127,5 отн. ед. После нахождения средней плоскости видеоизображение преобразовывается в черно-белое, т. е. все микронеровности ниже средней плоскости становятся абсолютно черными, а выше – абсолютно белыми.

На рис. 1 показаны видеоизображения и их преобразования для образцов с различной величиной R_a .

По полученным черно-белым изображениям можно определить величину шероховатости в различных направлениях (продольном и поперечном). Образец № 1 обладает типичной однонаправленной шероховатостью поверхности, у которой поперечная шероховатость в несколько раз больше продольной, и это характеризует шероховатость профиля поверхности в поперечном направлении, нашей же целью является определение шероховатости площади поверхности по ее текстуре. В этом случае доминирующее влияние оказывает регулярная (периодическая) компонента, которую определяют в направлении, перпендикулярном направлению скорости резания при шлифовании. Текстура поверхностей образца № 2 имеет смешанный тип, который получается при наложении изображения предварительно обработанной поверхности на изображение поверхности, сформированной на данной операции. На поверхностях образцов № 3 и № 4 строгой ориентации микронеровностей не наблюдается, и описать шероховатость профиля поверхности не представляется возможным, поэтому необходимо перейти от щуповых методов оценки к оптическим, которые оценивают поверхность комплексно по параметрам ее структуры.

Для обработки бинарных изображений была разработана программа определения параметров текстуры

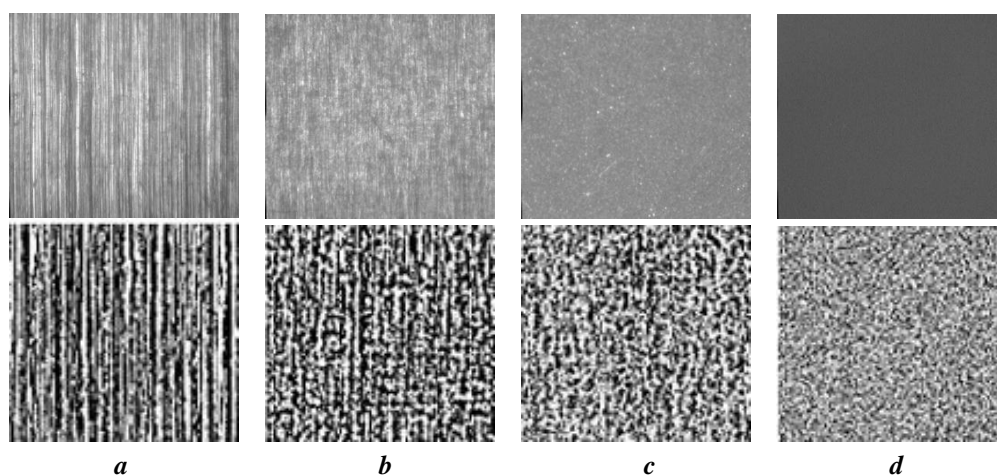


Рис. 1. Текстура поверхности в зависимости от шероховатости образцов:
a – № 1, $R_a=0,13$ мкм; *b* – № 2, $R_a=0,084$ мкм; *c* – № 3, $R_a=0,048$ мкм; *d* – № 4, $R_a=0,025$ мкм
Fig. 1. Surface texture depending on roughness of samples:
a – No. 1, $R_a=0.13\mu\text{m}$; *b* – No. 2, $R_a=0.084\mu\text{m}$; *c* – No. 3, $R_a=0.048\mu\text{m}$; *d* – No. 4, $R_a=0.025\mu\text{m}$

поверхности с помощью квазиоптимальных корреляционных алгоритмов [14]. В работе [15] предложен подход, связанный с применением корреляционного метода сравнения черно-белого изображения с принятым эталоном:

$$r_{x,y}(k_1, k_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^{n-1}} F_{ii}(\Delta), \quad (1)$$

где $r_{x,y}(k_1, k_2)$ – коэффициент корреляции;
 N – количество сравниваемых элементов микрорельефа;
 $F_{ii}(\Delta)$ – парная критериальная функция.

С помощью формулы (1) выполнен анализ известных квазиоптимальных корреляционных алгоритмов и критериальных функций [16], который показал перспективность использования парных критериальных функций и бинарных изображений

$$\begin{matrix} F_{1,1}(\Delta) & F_{0,1}(\Delta) \\ F_{1,0}(\Delta) & F_{0,0}(\Delta) \end{matrix},$$

где Δ – относительный сдвиг изображений; $F_{ij}(\Delta)$, $i, j=0,1$ – количество совпавших элементов с заданной интенсивностью. При этом самое высокое быстродействие обеспечивается путем применения корреляционно-экстремального алгоритма в виде

$$R_r(\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^{n-1}} F_{ii},$$

где $R_r(\Delta)$ – шероховатость рассматриваемого участка поверхности;

N – количество сравниваемых элементов в эталонном и текущем фрагменте изображения.

Большое значение имеет правильный выбор размера эталона $N_1 \cdot N_2$ пикселя. Программа позволяет варьировать размер эталона от 4×4 до 32×32 пикселей. Выбор размера эталона связан с высотой шероховатости исследуемой стохастической поверхности: чем ниже шероховатость, тем меньше размер эталона. Так как об-

разцы подвергались окончательной обработке с низкой шероховатостью поверхности, площадь эталона составляла 8×8 пикселей. В программе предусмотрена следующая последовательность движения эталона. Эталон может располагаться или в правом верхнем углу, перемещаясь вдоль изображения, или в центре изображения, двигаясь против часовой стрелки с шагом в 1 пиксель. Коэффициент корреляции подсчитывается в каждой точке по формуле (1). Корреляционная поверхность представляет собой полутоновое изображение, которое необходимо правильно обработать. Для этого осуществляется аналогичная первичная обработка изображения с преобразованием полутонового корреляционного изображения в бинарное – черно-белое, т. е. для получения численных значений необходимо определить нулевое положение автокорреляционной поверхности. Тогда такая поверхность с достаточной степенью точности описывается двумя параметрами текстуры: амплитудой автокорреляционной функции U_{cp} (высотный параметр) и ее математическим ожиданием M_x (шаговый параметр). Для определения связи параметров текстуры с параметрами шероховатости проведена идентификация поверхностей полутонового и корреляционного изображений.

В процессе идентификации поверхностей установлено, что у двумерных автокорреляционных функций средняя случайная амплитуда U_{cp} функции $r_{x,y}(k_1, k_2)$ существенно зависит от шероховатости поверхности и размеров эталона [17–19]. В данном случае размер эталона определяет радиус алмазной иглы профилографа. Этот параметр у профилографов постоянный, но оптический метод позволяет менять его в широких пределах [17–19]. Обработка экспериментальных данных позволила построить регрессионную зависимость влияния величины U_{cp} на среднеарифметическое отклонение высоты микронеровностей поверхности $R_{ar}=f(U_{cp})$:

$$R_{ar} = A_r \cdot U_{cp} - B,$$

где A_r и B_r – коэффициенты, величина которых зависит от материала образцов и площади выбранного эталона.

Величина A_r изменялась в пределах 0,005–0,01, а величина B_r – в пределах 0,01–0,03. Для эталона 8×8 пикселей $A_r=0,01$, $B_r=0,03$.

Большое значение имеет определение ошибок при измерении параметров структуры, характеризующихся доверительным интервалом I_β (отн. ед.) и среднеквадратическим отклонением, которые рассчитываются по формулам [19]:

$$I_\beta = (3,4U_{CP}^2 + 14,4U_{CP} + 1) \times 10^{-3},$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где σ_t – среднее квадратическое отклонение результата измерения;

σ – среднее квадратическое отклонение результата наблюдения;

n – число результатов наблюдений.

В процессе исследований определялись параметры структуры и их ошибки по 30 участкам образцов поверхностей с доверительной вероятностью $P=0,99$ и коэффициентом для случайной величины по распределению Стьюдента $t_\beta=2,576$ (таблица 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В [20; 21] разработана методика оценки микро-структуры поверхности с использованием исследований параметров текстуры. На рис. 2 приведены лопатки 1-й ступени газотурбинного двигателя (ГТД) после виброконтрастного полирования профиля пера.

Обработка результатов исследования поверхности лопаток приведена на рис. 3. Поверхность лопаток имеет сложную пространственную форму, поэтому оптимальным форматом видеоизображения является 320×240 пикселей, а размер эталона – 8×8 пикселей. Исследования на входной и выходной кромках лопаток не проводились, а при угле закрутки $10-12^\circ$ и площади участка $1,6 \times 1,2$ мм кривизна укладывалась в допустимые пределы, которые составляют 20° .

Исследование параметров текстуры проводилось следующим образом. На поверхности лопатки размечалась сетка с шагом 5×5 мм, в узлах которой на инструментальном микроскопе снимались видеоизображения, затем производилось определение параметров корреляционной функции. Установлено, что U_{CP} изменялось в интервале $U_{CP_min}=21,89$ отн. ед. и $U_{CP_max}=22,32$ отн. ед. и составило 22,1 отн. ед. Идентификация параметров текстуры показала, что шероховатость поверхности составляет $R_a=0,15$ мкм, $R_{a_min}=0,09$ мкм и $R_{a_max}=0,21$ мкм. Эти результаты на 15–20 % больше, чем величина R_a , измеренная контактным методом.

Таблица 1. Сравнение параметров шероховатости и текстуры поверхности образцов
Table 1. The comparison of roughness parameters and surface texture of samples

Параметры	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
R_a , мкм	0,13	0,084	0,048	0,025
σ_m , мкм	0,24	0,138	0,084	0,055
I_β , отн. ед.	0,92	0,63	0,44	0,37
U_{CP} , отн. ед.	49–51	40–41	33–34	25–26



Рис. 2. Спинка и корыто лопатки 1-й ступени турбины
Fig. 2. Back and pressure side of a blade of the 1st turbine stage

При полировании профиля пера лопаток турбин большое значение имеет равномерность распределения значений микронеровностей по всему профилю спинки и корыта. Применение сеточного метода позволило построить поля шероховатости поверхности лопаток (рис. 4, рис. 5).

Таким образом, поля шероховатости поверхности позволяют технологам определять идентичность усло-

вий виброконтактного полирования профиля пера лопаток и те места, где параметры качества не соответствуют техническим условиям. В процессе виброконтактного полирования лопатка совершает колебания по некоторой дуге, что приводит к изменению контактного давления инструмента на участках поверхности лопатки.

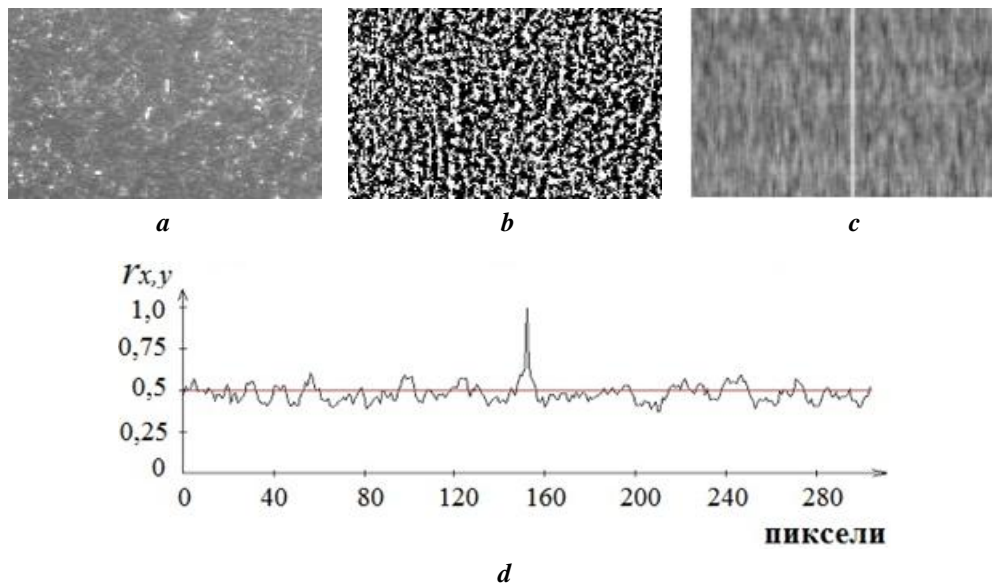


Рис. 3. Исследование единичного участка поверхности лопаток:
a – видеоизображение поверхности; *b* – черно-белое (бинарное) изображение поверхности;
c – корреляционная поверхность; *d* – график изменения коэффициента корреляции

Fig. 3. The study of a separate area of blades surface:
a – surface video image; *b* – monochromatic (binary) image of a surface;
c – correlation surface; *d* – diagram of changes in correlation factor

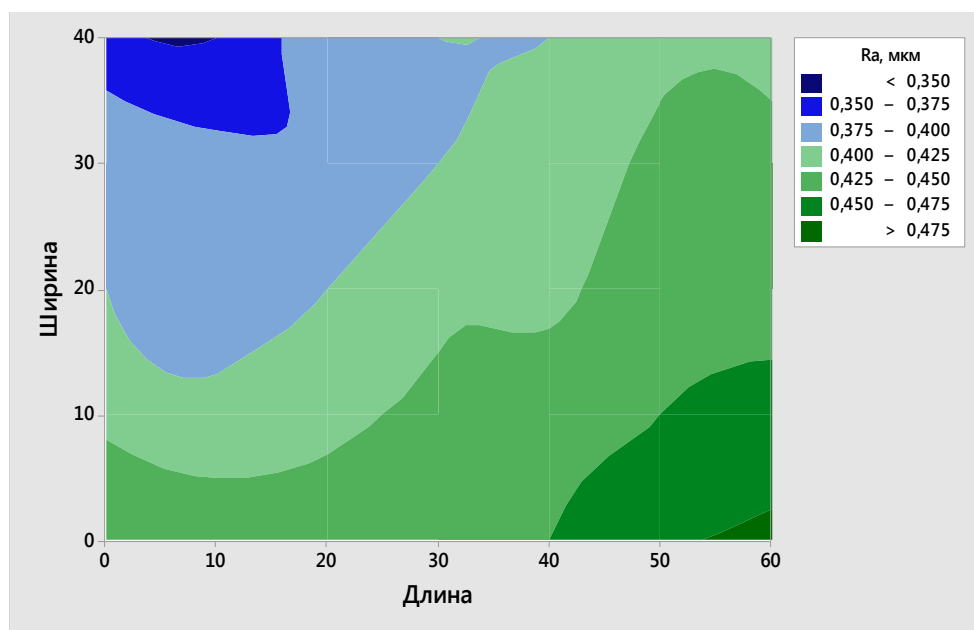


Рис. 4. Поля шероховатости поверхности лопаток: корыто
Fig. 4. Roughness fields of blades' surface: pressure side

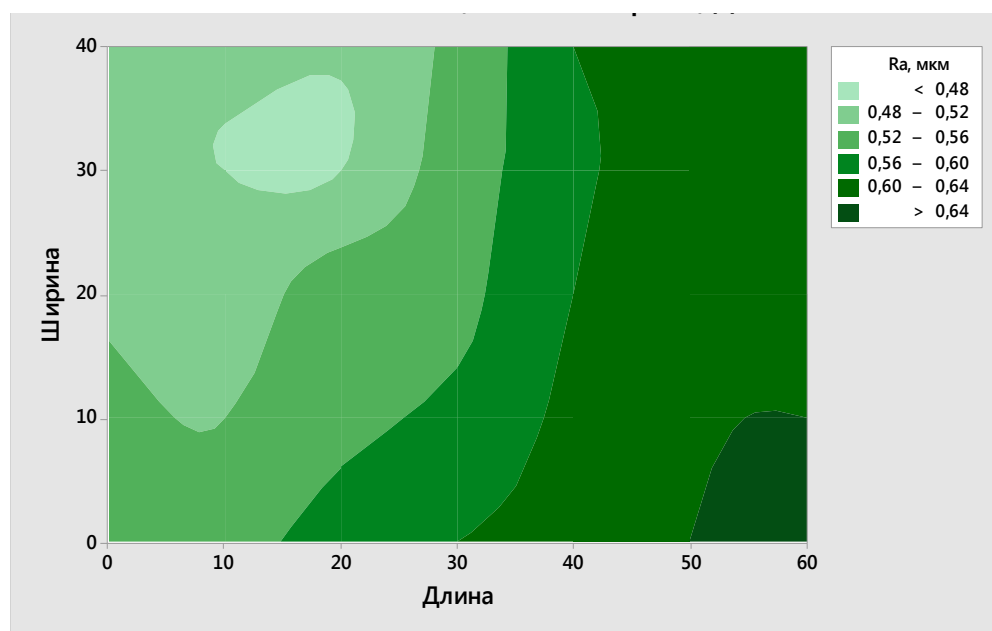


Рис. 5. Поля шероховатости поверхности лопаток: спинка

Fig. 5. Roughness fields of blades' surface: back

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение оптико-электронного метода и квази-оптимального алгоритма позволяет определять параметры текстуры поверхности и рассчитывать величину шероховатости площади поверхности непосредственно в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко В.И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2017. 480 с.
2. Egorov S., Kapitanov A., Loktev D. Turbine Blades Profile and Surface Roughness Measurement // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1476–1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.664>.
3. Han Y., Zuxin W., Yunhai Z., Jia M., Yun X. Surface roughness measurement using laser confocal microscope with boundary area correction // Laser and Optoelectronics Progress. 2020. Vol. 57. № 21. Article number 211203. DOI: <https://doi.org/10.3788/LOP57.211203>.
4. Медунецкий В.М., Васильков С.Д. Методы оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 231–236.
5. Андреев Ю.С., Демкович Н.А., Исаев Р.М., Целищев А.А., Васильков С.Д. Определение микрогеометрии функциональной поверхности детали, обеспечивающей требуемые показатели авиационного датчика вибрации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1103–1110.
6. Гибадуллин И.Н., Валетов В.А. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки

шероховатости // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 1. С. 86–92.

7. Patel D.R., Kiran M.B. Non-contact surface roughness measurement using laser speckle technique // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 895. № 1. Article number 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/895/1/012007>.
8. Pasker V., Grycz O., Hlavica R., Foretník P., Barcáková I. Automatic selection of binarization method from images with serial numbers on industrial products // METAL 2020 – 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2020. P. 1357–1361. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3636>.
9. Frischer R., Krejcar O., Selamat A., Kuca K. 3D surface profile diagnosis using digital image processing for laboratory use // Journal of Central South University. 2020. Vol. 27. № 3. P. 811–823. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4333-y>.
10. Баврина А.Е., Ильясова Н.Ю., Куприянов А.В., Храмов А.Г. Исследование фотограмметрических изображений с помощью матриц вероятностного распределения яркости // Компьютерная оптика. 2002. № 23. С. 62–65.
11. Пластинин А.И., Куприянов А.В., Ильясова Н.Ю. Разработка методов формирования цветотекстурных признаков для анализа биомедицинских изображений // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 2. С. 82–85.
12. Захаров А.А., Баринев А.Е., Жизняков А.Л., Титов В.С. Поиск объектов на изображениях с использованием структурного дескриптора на основе графов // Компьютерная оптика. 2017. Т. 42. № 2. С. 283–290.
13. Абрамов А.Д., Никонов А.И., Носов Н.В. Способ контроля шероховатости поверхности изделия: патент РФ № 2413179, 2011.

14. Krig S. *Computer vision metrics: Survey, taxonomy, and analysis*. Berkeley: Apress Media, 2014. 498 p.
15. Whitehouse D. *Metrology of Surfaces. Principles, Industrial Methods, and Devices*. Dolgoprudnyi: Dom Intellect, 2009. 472 p.
16. Абрамов А.Д. Применение оптико-электронного комплекса и квазиоптимального корреляционного алгоритма для оценки шероховатости поверхностей деталей машин и механизмов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 2. С. 44–49.
17. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Подсекин И.А. Оценка шероховатости поверхности оптико-электронным методом // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Технические науки. 2005. № 33. С. 89–94.
18. Абрамов А.Д. Влияние оптического фактора на оценку шероховатости поверхности оптико-электронным комплексом // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Технические науки. 2012. № 2. С. 45–52.
19. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Анализ и корреляционный метод устранения погрешности оптико-электронного определения микрорельефных параметров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 3–9.
20. Абрамов А.Д., Зинковский А.И., Носов Н.В., Никонов А.И., Родионов В.А. Определение шероховатости поверхности дорожек качения приборных подшипников с использованием квазиоптимального корреляционного алгоритма // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 645–651.
21. Носов Н.В., Абрамов А.Д., Хаустов В.И. Исследование шероховатости поверхности бомбинированных роликов на основе анализа их автокорреляционных функций // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королева. 2009. № 3-2. С. 45–54.
22. microgeometry providing the desired performance of an aircraft vibration sensor. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1103–1110.
23. Gibadullin I.N., Valetov V.A. Image of the surface profile as a graphic criterion of its roughness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 86–92.
24. Patel D.R., Kiran M.B. Non-contact surface roughness measurement using laser speckle technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 895, no. 1, article number 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/895/1/012007>.
25. Pasker V., Grycz O., Hlavica R., Foretník P., Barcáková I. Automatic selection of binarization method from images with serial numbers on industrial products. *METAL 2020 – 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 2020, pp. 1357–1361. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3636>.
26. Frischer R., Krejcar O., Selamat A., Kuca K. 3D surface profile diagnosis using digital image processing for laboratory use. *Journal of Central South University*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 811–823. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4333-y>.
27. Bavrina A.E., Piyasova N.Yu., Kupriyanov A.V., Khramov A.G. Study of photogrammetric images using matrices probability distribution of brightness. *Kompyuternaya optika*, 2002, no. 23, pp. 62–65.
28. Plastinin A.I., Kupriyanov A.V., Piyasova N.Yu. Development of methods for the formation of color-textural features for the analysis of biomedical images. *Kompyuternaya optika*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 82–85.
29. Zakharov A.A., Barinov A.E., Zhiznyakov A.L., Titov V.S. Object detection in images with a structural descriptor based on graphs. *Kompyuternaya optika*, 2017, vol. 42, no. 2, pp. 283–290.
30. Abramov A.D., Nikonov A.I., Nosov N.V. *Sposob kontrolya sherokhovatosti poverkhnosti izdeliya* [Method for controlling the surface roughness of the product], patent RF no. 2413179, 2011.
31. Krig S. *Computer vision metrics: Survey, taxonomy, and analysis*. Berkeley, Apress Media Publ., 2014. 498 p.
32. Whitehouse D. *Metrology of Surfaces. Principles, Industrial Methods, and Devices*. Dolgoprudnyi, Dom Intellect Publ., 2009. 472 p.
33. Abramov A.D. Application of the optiko-electronic complex and quasioptimum correlation algorithm for the estimation of the roughness of surfaces of details of cars and mechanisms. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*, 2012, no. 2, pp. 44–49.
34. Abramov A.D., Nosov N.V., Podsekin I.A. Evaluation of surface roughness by optoelectronic method. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2005, no. 33, pp. 89–94.
35. Abramov A.D. Influences of optical faktor on estimate of surface roughness by optical-electronic complex. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 2, pp. 42–52.
36. Abramov A.D., Nikonov A.I. Analysis and correlation method for eliminating the error of optikal electronic determination of microrelief parameters. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 3–9.

REFERENCES

1. Butenko V.I. *Nauchnye osnovy funktsionalnoy inzhenerii poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Scientific bases of functional engineering of the surface layer of machine parts]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2017. 480 p.
2. Egorov S., Kapitanov A., Loktev D. Turbine Blades Profile and Surface Roughness Measurement. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1476–1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.664>.
3. Han Y., Zuxin W., Yunhai Z., Jia M., Yun X. Surface roughness measurement using laser confocal microscope with boundary area correction. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, vol. 57, no. 21, article number 211203. DOI: <https://doi.org/10.3788/LOP57.211203>.
4. Medunetskiy V.M., Vasilkov S.D. Assessment methods for workpiece surface microgeometry. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 231–236.
5. Andreev Yu.S., Demkovich N.A., Isaev R.M., Tselishchev A.A., Vasilkov S.D. Functional surface

20. Abramov A.D., Zinkovskiy A.I., Nosov N.V., Nikonov A.I., Rodionov V.A. The estimation of roughness with determined probability blades on the foundation computer technologies of optico-electronics surface means. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 645–651.
21. Nosov N.V., Abramov A.D., Khaustov V.I. Research of roughness of surface rollers with modified contact on the basis of analysis of the autocorrelation functions. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika S.P. Koroleva*, 2009, no. 3-2, pp. 45–54.

Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasioptimal correlation algorithms

© 2021

Nikolay V. Nosov^{*1}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor
*Nikita P. Kostin*², graduate student
*Roman V. Ladyagin*³, graduate student

Samara State Technical University, Samara (Russia)

*E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-2098>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

Abstract: The authors considered a new method of texture analysis of machined precision surfaces based on using computer optics and the autocorrelation method of processing the images of micro-relief textures under the study. This method is based on a probabilistic comparative evaluation of the unknown texture of the micro-relief under the investigation with the available textures of reference micro-patterns, in which microrelief parameters are determined. The paper proposes an approach to identify the profile surface roughness of a gas turbine engine (GTE) blade after vibro-contact polishing according to the parameters of correlation surface texture. The authors studied the surface micro-geometry of the blade back and pressure side using the optoelectronic complex based on the calculation of the average amplitude of the variable component of an autocorrelation function resulting from computer processing of a surface video image. The application of the electrooptic method for evaluating the surface texture of compressor and turbine blades allows building the surface roughness fields and more deeply analyzing the technology of final processing of the GTE blade feather profile. The relevance and novelty of the study lie in the promising technique to evaluate the surface quality parameters using the electrooptic method. A special feature of this method is the measurement of surface area roughness, while the stylus methods measure the roughness of the surface profile. An important advantage of the proposed method is its application to measure the roughness parameters of a curved surface by a non-contact method, which is advanced since there are surfaces of parts that do not imply being scratched with a diamond needle.

Keywords: texture; microrelief; precision surface; binary image; digital processing; electrooptic method; microrelief identification; correlation surface; gas turbine engine (GTE) blades.

For citation: Nosov N.V., Kostin N.P., Ladyagin R.V. Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasioptimal correlation algorithms. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 24–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-24-31.

Разработка цифрового двойника процесса точения на основе машинного обучения

© 2021

Расторгуев Дмитрий Александрович^{*1}, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

*Севастьянов Александр Александрович*², магистрант

кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*E-mail: rast_73@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7465-650X>

Аннотация: На сегодняшний день производственные технологии развиваются в рамках концепции «Индустрия 4.0», которая представляет собой внедрение информационных технологий в промышленности. Одной из наиболее перспективных цифровых технологий, находящей все большее применение в производстве, является цифровой двойник, представляющий собой ансамбль математических моделей технологического процесса, который обменивается информацией со своим физическим прототипом в режиме реального времени. В работе рассматривается пример формирования нескольких взаимосвязанных прогнозирующих модулей, входящих в структуру цифрового двойника процесса точения и предназначенных для прогнозирования качества обработки, характера стружкообразования, силы резания. Проведен трехфакторный эксперимент по твердому точению стали ХВГ, закаленной до твердости 55 HRC. На примере проведенного эксперимента описан процесс разработки диагностического модуля цифрового двойника на основе искусственных нейронных сетей. Выявлены более высокие точность, адаптивность и универсальность искусственных нейронных сетей при разработке математической модели для прогнозирования и диагностики процесса резания. Разработанная математическая модель онлайн-диагностики процесса резания для определения качества поверхности и типа стружки при обработке использует фактическое значение снимаемого припуска, определяемого косвенно по силовой нагрузке на приводе. При этом модель использует только сигналы датчиков, входящих в диагностическую подсистему на станке с ЧПУ. В качестве информативного признака, отражающего силовую нагрузку на приводе главного движения станка, выбрано значение энергии сигнала силы тока в моторе привода шпинделя. Установлено, что развитие цифрового двойника возможно за счет разработки дополнительных модулей, прогнозирующих точность размеров, геометрический профиль, износ инструмента.

Ключевые слова: твердое точение; станки с ЧПУ; цифровой двойник; машинное обучение; искусственные нейронные сети.

Благодарности: Проект реализуется при поддержке Фонда содействия развитию институтов гражданского общества в ПФО.

Для цитирования: Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А. Разработка цифрового двойника процесса точения на основе машинного обучения // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 32–41. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-32-41.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных тенденций в современном машиностроении является активное внедрение цифровых технологий на производстве в рамках концепции «Индустрия 4.0» [1]. Многие исследователи называют цифровой двойник одной из наиболее перспективных технологий современности. Цифровой двойник представляет собой ансамбль математических моделей, отражающих различные аспекты процесса обработки и состояния элементов технологической системы, включая заготовку, и обменивающихся данными между собой и с физическим объектом-прототипом в режиме реального времени [2; 3].

Задачи, которые решаются при совместном использовании нескольких моделей для обрабатываемой технологической системы, касаются вопросов диагностики и определения состояния различных элементов оборудования, контроля процесса обработки, оптимизации

параметров системы и управления [4]. Объектами этих процессов являются оборудование, станочное приспособление, режущий инструмент, заготовка, сам процесс обработки. На основе собранной информации, полученной от реального процесса и в результате моделирования, принимаются решения по коррекции проведения операции, режимов обработки, замены инструмента. Алгоритм взаимодействия показан на рис. 1.

С одной стороны, оснащение технологического оборудования комплексом датчиков различного назначения и принципов действия расширяет технологические возможности по мониторингу разнохарактерных процессов (силовых, тепловых, вибрационных), повышает надежность получаемой информации за счет дублирования информационных каналов, что позволяет повысить точность анализа и прогнозирования выходных данных. С другой стороны, это значительно усложняет и удорожает систему контроля, что снижает надежность ее функционирования, усложняет алгоритмы

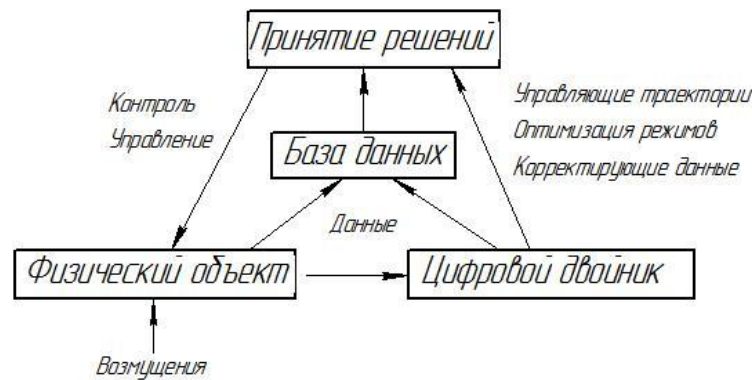


Рис. 1. Схема взаимодействия объекта контроля, цифрового двойника и данных
Fig. 1. Scheme of interaction of control object, digital twin and data

обработки данных из-за необходимости сбора и согласования различных данных моделирования и данных, получаемых по разнообразным каналам с неодинаковой степенью дискретности. Необходимо при минимальном количестве информационных каналов и датчиков обеспечить максимум достоверной информации по максимально разнообразным аспектам функционирования технологической системы. Использование встроенных систем контроля приводов движения, дополняемых минимумом диагностических каналов, требует минимального времени и затрат на модернизацию оборудования с максимально возможным эффектом [5; 6].

Современная концепция применения цифровых двойников технологических систем предполагает интеграцию для комплексного моделирования элементов и процессов различных программ, в том числе основанных на использовании метода конечных элементов, интеграции различных моделей (механических, электромеханических, гидро- и пневматических) из разных математических пакетов. Этот подход отличается сложностью объединения различных по форматам выходных данных виртуальных моделей, различающихся временем выполнения расчетов, сложностью их подготовки, включая идентификацию параметров моделей.

В условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства подготовка и проведение сложных аналитических расчетов нецелесообразны и не для всякого производства возможны. Использование сложных аналитических моделей требует идентификации большого количества трудно определяемых конструктивных и технологических параметров [7]. На станке с ЧПУ отслеживание сигналов встроенных контуров управления дает информацию только по позиционированию рабочих органов станка, исключая положение вершины инструмента, которое из-за силовых и температурных воздействий может отклоняться от текущего нуля инструмента, заложенного в программе [8]. Как правило, при обработке доминирующей колебательной системой является заготовка. Характер ее деформации определяется конструктивными особенностями, габаритами, материалом, схемой установки и условиями закрепления. Взаимодействие заготовки и инструмента проявляется в относительных смещениях формообразующих подсистем заготовки и инструмента. При точении упру-

гая деформация инструмента от сил резания незначительна по сравнению с деформацией заготовки. Тепловую деформацию резца можно рассчитать. При растачивании упругие деформации расточного инструмента будут отличаться значительной величиной и нестабильностью по длине обработки. Возникает задача определения фактического профиля заготовки после прохода, что определяется несоответствием снимаемого припуска заданной величине. Деформация технологической системы при точении непостоянна из-за переменного припуска по длине заготовки и переменной жесткости вала как вдоль оси, так и в поперечном сечении. Разработаны методы аналитического расчета деформаций заготовки в функции положения зоны резания по длине вала с учетом динамического характера процесса обработки [9]. Здесь помимо собственных конструктивных параметров заготовки с геометрическими отклонениями сильно влияет характер закрепления, состояние и вид установочно-зажимных поверхностей станочного приспособления, состояние и вид технологических баз, усилие закрепления. Каждый из этих факторов отличается определенной нестабильностью. Эти же соображения касаются и подсистемы режущего инструмента. В совокупности конструктивные и технологические параметры определяют собственные частоты формообразующих подсистем, а вариации этих параметров приводят к разбросу собственных частот подсистем, что сильно изменяет характер динамических деформаций при обработке [10].

Использование датчиков деформации заготовки предоставляет информацию, которая позволяет судить о формировании профиля детали и величине снимаемого фактического припуска. Если есть данные об исходной поверхности обрабатываемой заготовки, использование дополнительного датчика относительных колебаний заготовки и инструмента формирует фактически полную картину деформации технологической системы и значения фактического припуска. Встраивание таких датчиков усложняет эксплуатацию оборудования, поскольку, находясь в рабочей зоне, они подвергаются опасности повреждения от ударов, загрязнений, воздействия технологических сред. В то же время удаление источника сигнала от непосредственно контролируемого процесса вносит помехи в анализируемый сигнал, содержит меньше полезной информации.

С точки зрения размерных параметров заготовки, отслеживание деформаций формообразующих подсистем в ходе обработки позволяет сформировать геометрический образ заготовки с распределением фактического профиля, что позволяет далее формировать программы движения инструмента с учетом реального распределения припуска с целью компенсаций отклонений, вызванных переменными силами резания. На последнем переходе получается 3D-образ готовой детали.

Рассматривается задача обратного моделирования: по текущему значению энергии процесса обработки восстанавливается значение фактического припуска, который отличается от заданного значения из-за ряда возмущающих факторов – погрешности геометрии исходной заготовки, погрешности позиционирования инструмента по траектории его движения, силовых и температурных деформаций, износа элементов технологической системы. На основе фактических значений технологических режимов (глубины резания, фактической подачи и скорости, отслеживаемых по диагностическим показателям на соответствующих приводах) происходит прогнозирование сил резания, качества обработанной поверхности и вида стружки.

Рассогласование данных моделирования и фактических параметров обработки приводит к ошибке прогнозирования, которая может снижаться периодической подстройкой параметров моделей. В случае использования нейронных сетей для моделирования обработки обратная связь такой сети с технологическим процессом может быть эффективно использована для подстройки модели. Для этого для нейросетевых модулей старые наборы обучающих данных дополняются новыми данными и на их основе проводится повторное обучение. Цикличность процесса переобучения может повторяться через каждую деталь, партию деталей, смену, за период работы инструмента между заменами.

Цель исследования – разработка комплекса взаимосвязанных модулей, которые на основе данных, получаемых в режиме реального времени, обеспечивают комплексную диагностику параметров обработки (качества обработанной поверхности и характера стружкообразования).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика эксперимента подробно описана авторами в статье [11]. Эксперимент проведен на токарном станке модели 16Б16Т1С1 с системой ЧПУ Flex NC. Заготовки представляли собой кольца из стали ХВГ твердостью 55 HRC со следующими геометрическими параметрами: внешний диаметр 55 мм, внутренний диаметр 30 мм, толщина 20 мм. Сталь ХВГ применяется для изготовления режущего и мерительного инструмента с высокими требованиями к точности размеров и отсутствию коробления после термической обработки. Охлаждение в ходе обработки не использовалось. Торцевое подрезание образцов производилось с помощью PCLNR 2525M 12 пластины NP-CNGA120404GA2 Mitsubishi, материал пластины – кубический нитрид бора (КНБ), на следующих режимах: скорость резания – 150, 250, 300, 400 м/мин; подача – 0,1, 0,2, 0,3 мм/об; глубина резания – 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 мм. При обработке фактическая глубина резания могла отличаться от заданной из-за погрешности установки заготовки, настройки станка, упругой деформации. Для каждого опыта определялось значение фактического припуска как разница исходного размера и размера после обработки.

С помощью средств диагностической подсистемы ЧПУ станка производилась запись сигналов датчиков, установленных на моторах, с частотой дискретизации 227 Гц (рис. 2).

Процесс резания проявляется на графике силы тока в виде соответствующего подъема уровня сигнала (на рис. 2 промежуток примерно между 9 и 18 с). Это является следствием увеличения механической нагрузки на приводе по сравнению с холостым ходом в результате процесса резания.

Ток привода главного движения станка может быть найден по формуле

$$K \cdot I = J \cdot \omega + B \cdot \dot{\omega} + T_{l0} + T_S + T_v + T,$$

где K – константа крутящего момента мотора;
 I – ток привода мотора в А;
 J – механическая инерция;

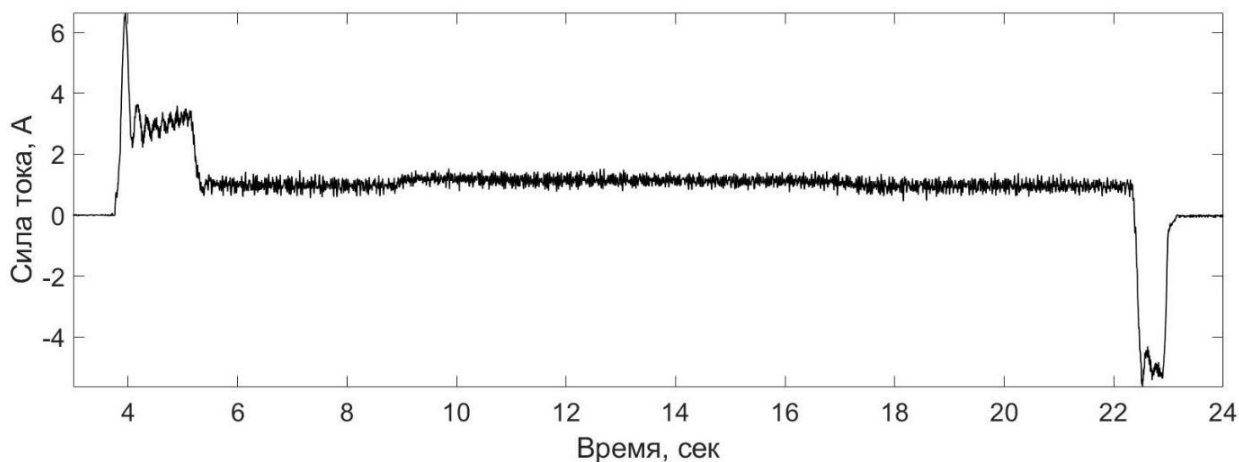


Рис. 2. Осциллограмма значений силы тока привода главного движения, образец № 1
 Fig. 2. The oscillogram of main motion drive current values, sample № 1

B – эквивалентное вязкое демпфирование для холостого хода;
 T_{l0} – сухое трение для холостого хода;
 T_S – крутящий момент резания;
 T_v – прирост крутящего момента за счет вязкого трения при резании;
 T_f – прирост крутящего момента за счет трения при резании.

Из записанных сигналов тока привода получены данные для холостого хода и резания. После анализа тока при резании соответствующая тангенциальная компонента силы резания F_c находится по формуле

$$F_c = \frac{T_S}{K_f},$$

где K_f – коэффициент пропорциональности для силы резания.

Таким образом, на основе анализа токовых данных получена информация о динамике силы резания при обработке.

Проведены статистические исследования для установления корреляции между параметрами силы резания (а именно ее средним значением и размахом) и выходными параметрами процесса, качеством поверхности и типом стружки. Методика исследования основана на анализе диаграмм размаха (boxplots) указанных параметров (рис. 3–6). При последующем анализе в качестве информативного показателя динамики силы резания была выбрана энергия сигнала тока привода.

Энергия дискретного сигнала вычислена по формуле [13]

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} |x_i|^2,$$

где E – энергия сигнала;
 N – число отсчетов сигнала, нумеруемых от 0 до $N-1$;
 x_i – значение i -го отсчета сигнала.

В данной работе число отсчетов $N=90$, что соответствует примерно 0,4 с.

Проведено исследование зависимости силовой нагрузки и энергии сигнала E от режимов резания v, s, t [14]. Вся работа с данными проведена в пакете прикладных программ MATLAB.

Для аппроксимации нелинейной зависимости $E(v, s, t)$ использована искусственная нейронная сеть [15; 16]. Первый шаг работы с нейросетью состоял в подготовке исходных данных, которые необходимо представить в виде пар «вход – выход», объединенных в соответствующие матрицы. Таким образом, матрица входов содержит данные о режимах резания v, s, t для всех 47 опытов. При этом режимы расположены по столбцам, и каждому опыту соответствует своя строка матрицы Input. Матрица Output представляет собой вектор-столбец значений энергии сигнала резания E .

После подготовки массива данных необходимо определиться с архитектурой и параметрами нейронной сети. Для решения задач аппроксимации нелинейных функций хорошо зарекомендовала себя двухслойная сеть прямого распространения, скрытый слой которой

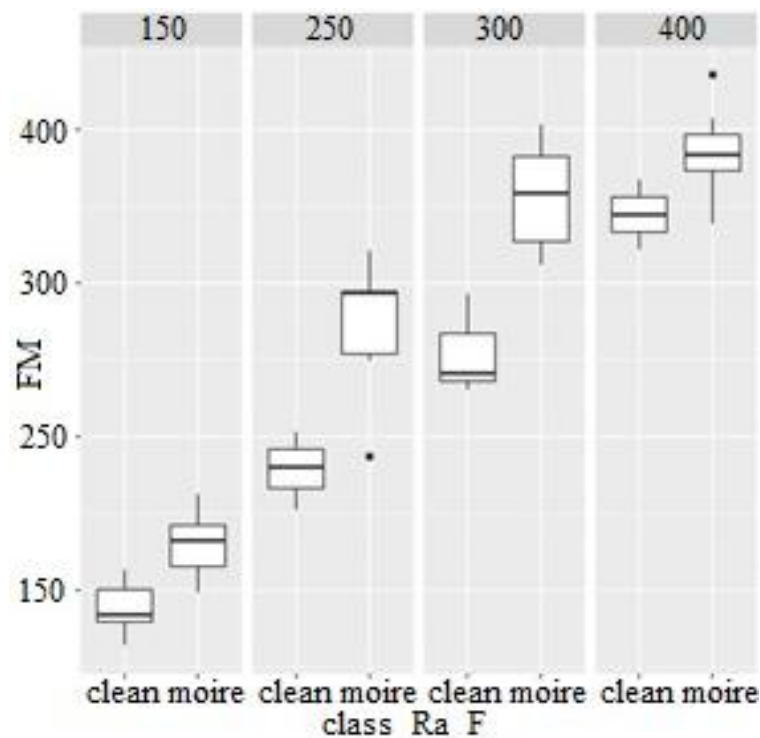


Рис. 3. Диаграммы размаха для средней силы резания для классов качества поверхности
 Fig. 3. Boxplots for mean force for surface quality classes

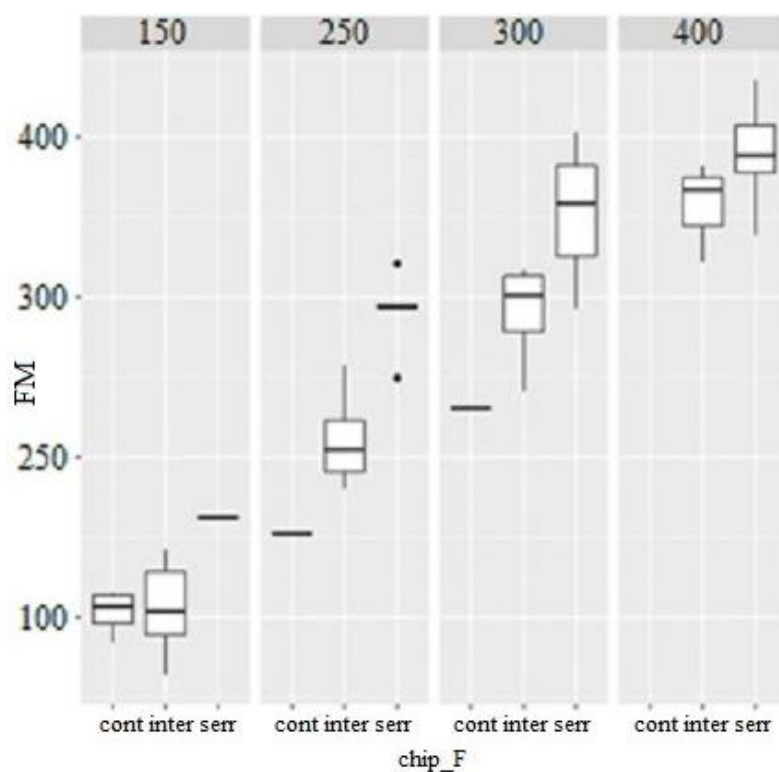


Рис. 4. Диаграммы размаха для средней силы резания для морфологии стружки
 Fig. 4. Boxplots for mean force for chip morphology

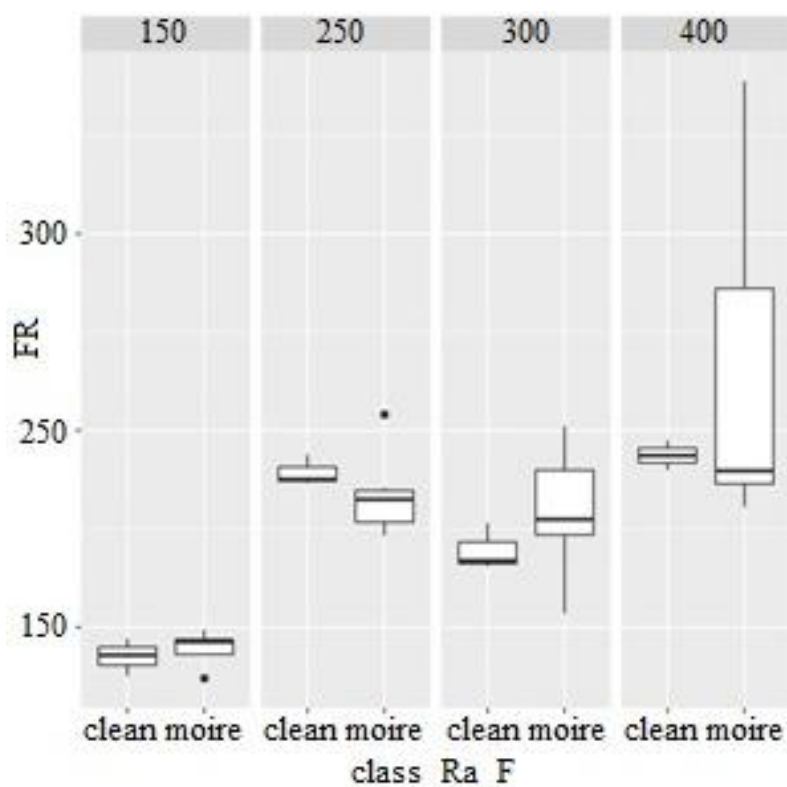


Рис. 5. Графики размаха для размаха силы для классов качества поверхности
 Fig. 5. Boxplots for force range for surface quality classes

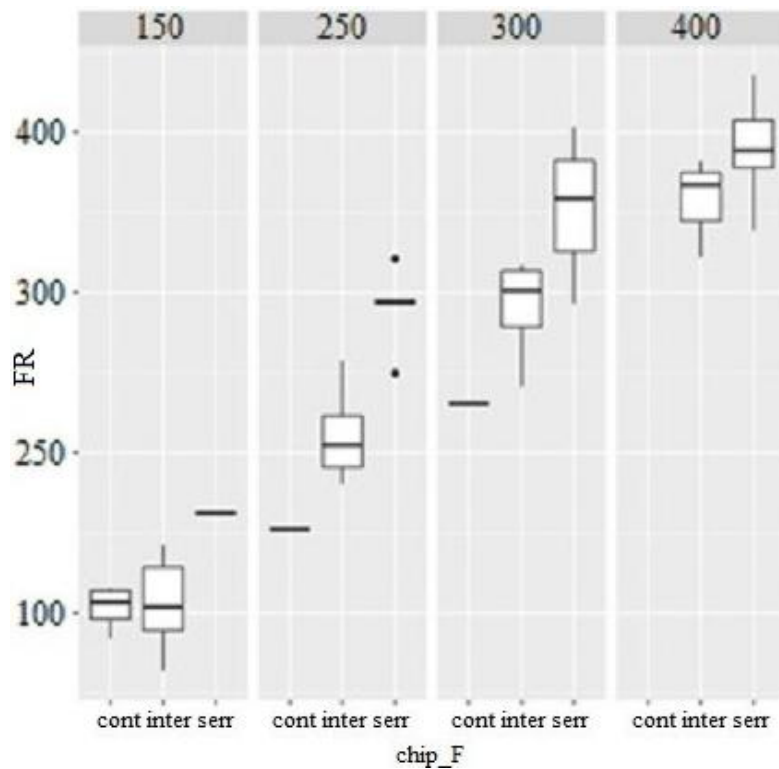


Рис. 6. Графики размаха для размаха силы для морфологии стружки
 Fig. 6. Boxplots for force range for chip morphology

использует сигмоидальную функцию активации (в данном случае гиперболический тангенс), а выходной слой – линейную [17]. Число нейронов скрытого слоя равно 10, выходного – 1 (рис. 7).

В ходе обучения исходные данные разбивались на три выборки: обучающую (training), проверочную (validation) и тестовую (testing) в пропорции 70:15:15 % (33, 7 и 7 экспериментальных наборов соответственно). Обучающая выборка использована для настройки весов и смещений сети (обучения). Проверочная использована для остановки обучения сети в случае, если ее способность к обобщению данных уменьшается, т. е. при возникновении эффекта переобучения сети (метод Байесовской регуляризации) [18]. Тестовый набор данных использован для финальной проверки работоспособно-

сти обученной нейронной сети на новых данных. Для обучения сети использовался алгоритм Левенберга – Марквардта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты обучения сети представлены на рис. 8.

Как видно из рис. 8, сеть качественно воспроизводит зависимость энергии сигнала от режимов обработки. Большинство (81 %) значений ошибок не превосходит 20 %.

На практике, однако, часто возникает обратная задача. Скорость резания и подачу можно узнать в ходе процесса резания с помощью тахогенераторов, стоящих на моторах станка с ЧПУ, а энергию сигнала можно

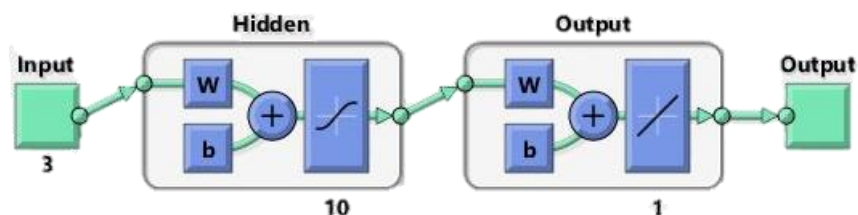


Рис. 7. Архитектура нейронной сети
 Fig. 7. The neural network architecture

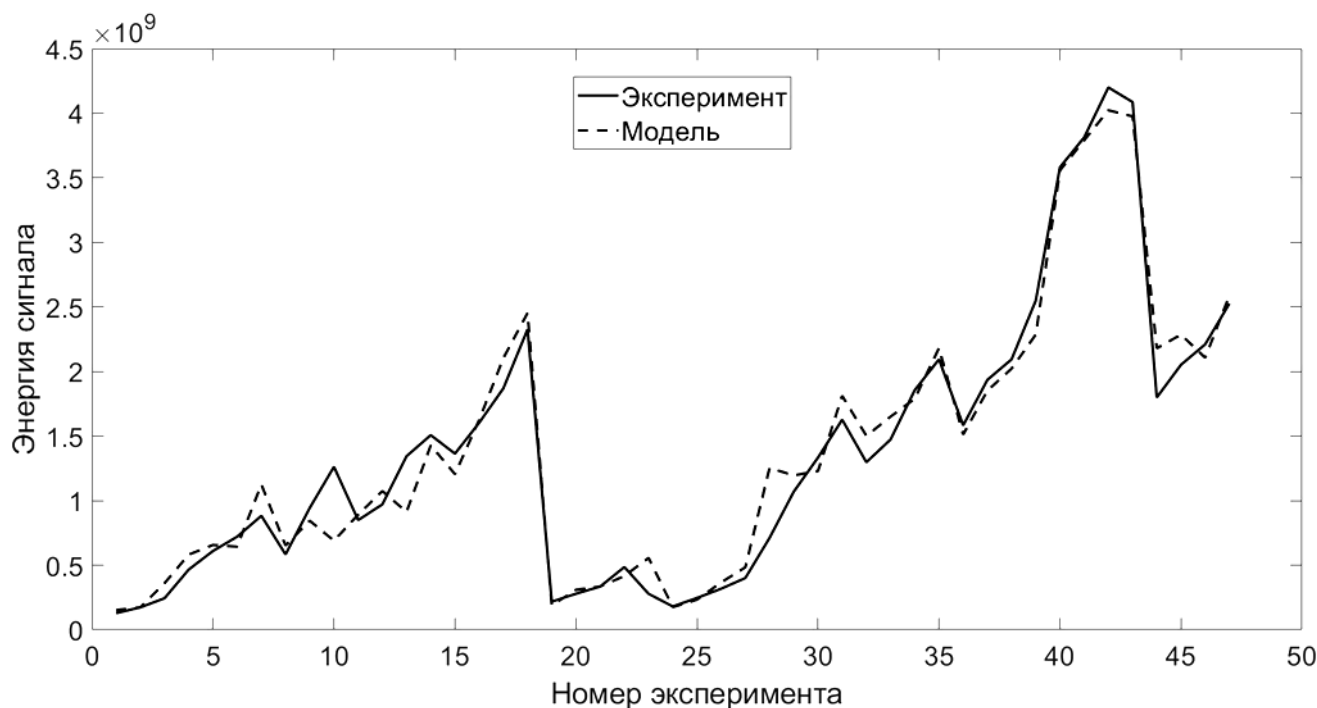


Рис. 8. Результаты обучения сети
Fig. 8. Results of the network learning

вычислять в онлайн-режиме по сигналу датчика силы тока привода главного движения. В то же время значение глубины резания может колебаться во время обработки, главным образом из-за деформации технологической системы, погрешности размеров и формы заготовки. Поэтому актуальной задачей также является определение в режиме реального времени глубины резания: обучив сеть решать задачу прогнозирования энергии сигнала по режимам, нужно обучить новую модель обратной задаче – по двум известным режимам (v и s) и значению энергии E вычислить текущее значение глубины резания t . Для этого можно использовать уже обученную нейронную сеть следующим образом: на вход сети подаем режимы v , s , а также массив $[t_1:\Delta t:t_2]$, где t_1 , t_2 – границы интервала, на котором предположительно находится искомое значение припуска t ; Δt – шаг выборки (задается требуемой точностью определения припуска). На выходе сети получаем вектор значений энергии E , значения которого соответствуют различным значениям глубины резания из отрезка $[t_1:t_2]$. Для определения глубины резания находим $\min|E - E_0|$, то есть среди элементов вектора E ищем значение энергии E_0 , ближайшее к текущему значению энергии E . Затем находим соответствующую энергии E_0 глубину резания t , зная, что индексы соответствующих элементов массивов совпадают. В итоге получаем методику онлайн-диагностики текущего значения глубины резания без датчиков смещений технологической системы.

Полученные фактические значения режимов обработки могут быть использованы совместно с ранее разработанными авторами нейросетевыми моделями качества поверхности и типа стружки [12]. Для этого на вход классификационных моделей подаются опреде-

ленные ранее режимы резания, после чего сети выдают прогнозируемые значения качества поверхности и типа стружки. Полученный ансамбль нейросетевых моделей можно называть цифровым двойником процесса твердого точения (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование искусственных нейронных сетей в качестве основы разработанной математической модели продиктовано тем, что именно нейросети являются на сегодняшний день наиболее эффективным инструментом моделирования сложных нелинейных экспериментальных зависимостей, возникающих в технологических системах [16; 19]. Машинное обучение превосходит другие известные алгоритмы, такие как регрессионный анализ, решающие деревья, нечеткая логика, по нескольким ключевым параметрам [20]. Среди них точность моделирования, простота разработки модели, объем оперативной памяти и вычислительных ресурсов, необходимых для работы алгоритма в реальном времени. Недостатком нейросетевого подхода является необходимость сбора и анализа большого массива экспериментальных данных для обучения нейронной сети (датасета).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе приведен пример построения математической модели в виде комплекса взаимосвязанных модулей, которые на основе данных, получаемых в режиме реального времени, обеспечивают комплексный прогноз по параметрам обработки (качество обработанной поверхности и характер стружкообразования). Развитие данной структуры возможно за счет модулей, прогнозирующих точность размеров, геометрический профиль,

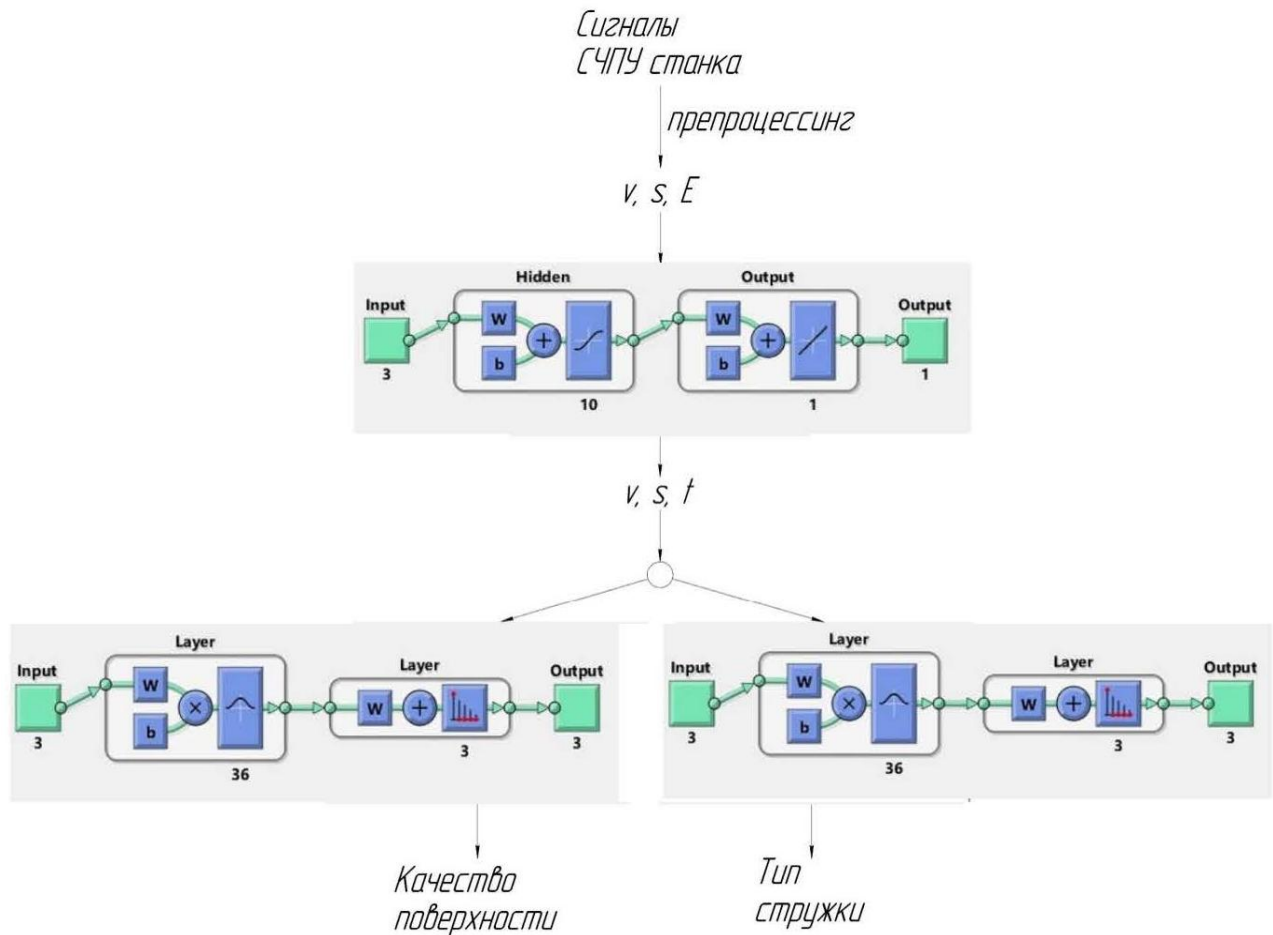


Рис. 9. Архитектура разработанного цифрового двойника
 Fig. 9. Architecture of the developed digital twin

износ инструмента. Включение в структуру цифрового двойника модуля состояния режущего инструмента позволит отслеживать его фактическое состояние (состояние режущей кромки, наличие, форма, размер фаски износа).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Altintas Y. Manufacturing automation. UK: Cambridge University Press, 2012. 366 p.
- Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Колчин П.В. Разработка «цифрового двойника» токарного станка с ЧПУ // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 45-8. С. 44–50.
- Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Тенденции развития науки и образования. 2018. № 45-8. С. 50–57.
- Переверзев П.П. Особенности разработки математической модели съема металла для цифрового двойника процесса круглого шлифования с ЧПУ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 3. С. 72–81.
- Li X. Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 3. Cutting Force Estimation Using Current Sensors // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2001. Vol. 17. № 9. P. 659–664.
- Li X. Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4. Cutting-Force-Induced Errors // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2001. Vol. 17. № 9. P. 665–669.
- Altintas Y. Virtual High Performance Machining // Procedia CIRP. 2016. Vol. 46. P. 372–378. DOI: [10.1016/j.procir.2016.04.154](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.154).
- Yeung C.-H., Altintas Y., Erkorkmaz K. Virtual CNC system. Part I. System architecture // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2006. Vol. 46. № 10. P. 1107–1123. DOI: [10.1016/j.ijmactools.2005.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.08.002).
- Заковоротный В.Л., Лукьянов В.Ф., Фам Д.Т., Фам Т.Х. Кинематические возмущения стационарных траекторий формообразующих движений в динамической системе резания // Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 9. С. 1555–1563.
- Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. М.: Машиностроение, 2006. 384 с.

11. Расторгуев Д.А., Севастьянов А.А. Исследование твердого точения стали ХВГ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2018. № 4. С. 24–32.
12. Rastorguev D., Sevastyanov A. Diagnostics of chip formation and surface quality by parameters of the main drive current in the hard turning // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. P. 1845–1851. DOI: [10.1016/j.matpr.2019.07.025](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.025).
13. Лозовский И.Ф. Цифровая обработка сигналов в РЛС обзора. Новосибирск: НГТУ, 2016. 270 с.
14. Kim D., Jeon D. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors // *Precision Engineering*. 2011. Vol. 35. № 1. P. 143–152. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2010.09.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.001).
15. Khajavi M.N., Nasernia E., Rostaghi M. Milling tool wear diagnosis by feed motor current signal using an artificial neural network // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016. Vol. 30. № 11. P. 4869–4875. DOI: [10.1007/s12206-016-1005-9](https://doi.org/10.1007/s12206-016-1005-9).
16. Labidi A., Tebassi H., Belhadi S., Khettabi R., Yallese M.A. Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2018. Vol. 18. № 4. P. 1017–1033. DOI: [10.1007/s11668-018-0501-x](https://doi.org/10.1007/s11668-018-0501-x).
17. Хайкин С. Нейронные сети. 2-е изд. М.: ИД Вильямс, 2016. 1104 с.
18. Ерыгин Е.В., Дуюн Т.А. Прогнозирование шероховатости поверхности при чистовом фрезеровании с использованием нейронных сетей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 135–141.
19. Chavoshi S.Z., Tajdari M. Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool // *International Journal of Material Forming*. 2010. Vol. 3. № 4. P. 233–239. DOI: [10.1007/s12289-009-0679-2](https://doi.org/10.1007/s12289-009-0679-2).
20. Gupta A.K., Guntuku S.C., Desu R.K., Balu A. Optimisation of turning parameters by integrating genetic algorithm with support vector regression and artificial neural networks // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 77. № 1-4. P. 331–339. DOI: [10.1007/s00170-014-6282-9](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6282-9).
5. Li X. Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 3. Cutting Force Estimation Using Current Sensors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, vol. 17, no. 9, pp. 659–664.
6. Li X. Real-Time Prediction of Workpiece Errors for a CNC Turning Centre, Part 4. Cutting-Force-Induced Errors. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, vol. 17, no. 9, pp. 665–669.
7. Altintas Y. Virtual High Performance Machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 372–378. DOI: [10.1016/j.procir.2016.04.154](https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.154).
8. Yeung C.-H., Altintas Y., Erkorkmaz K. Virtual CNC system. Part I. System architecture. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46, no. 10, pp. 1107–1123. DOI: [10.1016/j.ijmactools.2005.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.08.002).
9. Zakovorotniy V.L., Lukyanov V.F., Pham D.T., Pham T.H. Kinematic perturbations of stationary trajectories shape generating movements in cutting dynamic system. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 11, no. 9, pp. 1555–1563.
10. Vasin S.A. *Prognozirovanie vibroustoychivosti instrumenta pri tochenii i frezerovanii* [Predicting vibration resistance of tools during turning and milling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 384 p.
11. Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A. The study of hard turning of 105WCR6 steel. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, no. 4, pp. 24–32.
12. Rastorguev D., Sevastyanov A. Diagnostics of chip formation and surface quality by parameters of the main drive current in the hard turning. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 19, pp. 1845–1851. DOI: [10.1016/j.matpr.2019.07.025](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.025).
13. Lozovsky I.F. *Tsifrovaya obrabotka signalov v RLS obzora* [Digital signal processing in the radar surveillance system]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2016. 270 p.
14. Kim D., Jeon D. Fuzzy-logic control of cutting forces in CNC milling processes using motor currents as indirect force sensors. *Precision Engineering*, 2011, vol. 35, no. 1, pp. 143–152. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2010.09.001](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.001).
15. Khajavi M.N., Nasernia E., Rostaghi M. Milling tool wear diagnosis by feed motor current signal using an artificial neural network. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30, no. 11, pp. 4869–4875. DOI: [10.1007/s12206-016-1005-9](https://doi.org/10.1007/s12206-016-1005-9).
16. Labidi A., Tebassi H., Belhadi S., Khettabi R., Yallese M.A. Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 1017–1033. DOI: [10.1007/s11668-018-0501-x](https://doi.org/10.1007/s11668-018-0501-x).
17. Khaykin S. *Neyronnye seti* [Neural networks]. 2nd ed. Moscow, Vilyams Publ., 2016. 1104 p.
18. Erygin E., Duyun T. Forecasting of the surface roughness in finishing milling using neural networks. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*, 2019, no. 10, pp. 135–141.
19. Chavoshi S.Z., Tajdari M. Surface roughness modelling in hard turning operation of AISI 4140 using CBN cutting tool. *International Journal of Material Forming*,

REFERENCES

1. Altintas Y. *Manufacturing automation*. Cambridge University Press, 2012. 366 p.
2. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kolchin P.V. Development of “digital twin” of CNC lathe. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2018, no. 45-8, pp. 44–50.
3. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kuzmishina A.M. Development of cutting tool digital twin for machining production. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2018, no. 45-8, pp. 50–57.
4. Pereverzev P.P. Features of developing the mathematical model of metal removal for the digital twin of process of circular grinding with CNC. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 72–81.

2010, vol. 3, no. 4, pp. 233–239. DOI: [10.1007/s12289-009-0679-2](https://doi.org/10.1007/s12289-009-0679-2).

20. Gupta A.K., Guntuku S.C., Desu R.K., Balu A. Optimisation of turning parameters by integrating genetic algo-

rithm with support vector regression and artificial neural networks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, no. 1-4, pp. 331–339. DOI: [10.1007/s00170-014-6282-9](https://doi.org/10.1007/s00170-014-6282-9).

Development of turning process digital twin based on machine learning

© 2021

Dmitriy A. Rastorguev^{*1}, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”

*Aleksandr A. Sevastyanov*², graduate student

of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

*E-mail: rast_73@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6298-1068>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7465-650X>

Abstract: Today, manufacturing technologies are developing within the Industry 4.0 concept, which is the information technologies introduction in manufacturing. One of the most promising digital technologies finding more and more application in manufacturing is a digital twin. A digital twin is an ensemble of mathematical models of technological process, which exchanges information with its physical prototype in real-time. The paper considers an example of the formation of several interconnected predictive modules, which are a part of the structure of the turning process digital twin and designed to predict the quality of processing, the chip formation nature, and the cutting force. The authors carried out a three-factor experiment on the hard turning of 105WCr6 steel hardened to 55 HRC. Used an example of the conducted experiment, the authors described the process of development of the digital twin diagnostic module based on artificial neural networks. When developing a mathematical model for predicting and diagnosing the cutting process, the authors revealed higher accuracy, adaptability, and versatility of artificial neural networks. The developed mathematical model of online diagnostics of the cutting process for determining the surface quality and chip type during processing uses the actual value of the cutting depth determined indirectly by the force load on the drive. In this case, the model uses only the signals of the sensors included in the diagnostic subsystem on the CNC machine. As an informative feature reflecting the force load on the machine’s main motion drive, the authors selected the value of the energy of the current signal of the spindle drive motor. The study identified that the development of a digital twin is possible due to the development of additional modules predicting the accuracy of dimensions, geometric profile, tool wear.

Keywords: hard turning; CNC machines; digital twin; machine learning; artificial neural networks.

Acknowledgements: The project is supported by the Fund for the Promotion of the Development of Civil Society Institutions in Privolzhsky Federal District.

For citation: Rastorguev D.A., Sevastyanov A.A. Development of turning process digital twin based on machine learning. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 32–41. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-32-41.

Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок

© 2021

Савельев Кирилл Сергеевич^{1,3}, аспирант кафедры «Инновационные технологии в машиностроении»*Илюшкин Максим Валерьевич*^{2,4}, кандидат технических наук, заместитель директора*Киселев Евгений Степанович*^{*1,5}, доктор технических наук, профессор,

директор Регионального технологического центра промышленного центра в машиностроении

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)²Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства, Ульяновск (Россия)

*E-mail: kec.ulstu@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0473-4699>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3335-728X>⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Аннотация: В статье рассматривается создание и исследование компьютерных моделей сверления заготовок из титанового сплава методом Лагранжа и Галеркина. Разработанные конечно-элементные модели предназначены для проведения исследований процесса механической обработки и оптимизации технологических параметров резания. Представлены результаты численных исследований сверления титановых заготовок с использованием программ математического моделирования, позволяющие полностью имитировать технологические процессы в компьютере (цифровой двойник). В качестве программы для моделирования процесса съема припуска с титановой заготовки применяли программный многоцелевой продукт конечно-элементного моделирования и анализа высоко-линейных динамических процессов с использованием различных схем интегрирования по времени Ls-DYNA. Применение метода Галеркина позволяет адекватно описать процесс сверления с введением в зону обработки энергии ультразвукового (УЗ) поля, существенно сокращает длительность проведения экспериментальных исследований и дает возможность оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на силовые и энергетические аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин. Оба метода пригодны для создания различных процессов механообработки, однако метод Лагранжа менее чувствителен к энергии ультразвукового поля. Введение в зону сверления заготовок из труднообрабатываемых титановых сплавов энергии ультразвукового поля позволяет существенно снизить энергетические затраты. В результате моделирования был получен расчетный файл, содержащий процесс симуляции, решение которого визуально отражает процесс сверления титановой заготовки, максимально приближенный к реальной ситуации, со снятием стружки. Однако для полной верификации результатов численных исследований необходимо осуществить экспериментальную проверку и внести полученные коррективы в расчетные данные.

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

Ключевые слова: цифровой двойник; моделирование; резание; ультразвук; титан; сверление; энергия деформирования.

Для цитирования: Савельев К.С., Илюшкин М.В., Киселев Е.С. Использование цифровых двойников для математического моделирования ультразвукового сверления титановых заготовок // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 42–54. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-42-54.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка отверстий лезвийными инструментами относится к числу наиболее сложно реализуемых в практике процессов механической обработки заготовок. Высокие требования к точности, шероховатости и качеству поверхности приводят к необходимости совершенствования технологии обработки и подготовки производства. При этом особенно сложным является формообразование отверстий в заготовках из труднообрабатываемых материалов [1], среди которых наиболее распространены титановые сплавы [2]. При проектировании новых технологических процессов оптимизация элементов режима обработки проводится чаще всего эмпирическим путем. Такой подход приводит к увеличению времени и затрат на проектирование. В связи

с этим изучение формообразования новых поверхностей при обработке отверстий сверлением является актуальным [3]. Детальное исследование напряженного состояния при сверлении позволяет лучше изучить и процесс резания в целом. Однако экспериментальные исследования данного вида формообразования отличаются большой трудоемкостью, высокими экономическими и временными затратами.

Эффективность проектирования технологического процесса производства можно повысить, используя Computer-aided engineering (CAE) системы. Большое количество таких систем являются универсальными и не имеют специальных шаблонов для моделирования механической обработки. Создание модели в CAE-системах представляет собой очень трудоемкий процесс, но позволяет получать информацию о напряжениях,

температуре, распределении сил в зоне обработки и деформациях.

В основу инженерного анализа технологических процессов может быть положен метод конечных элементов (МКЭ), разработанный на основе матричных методов расчета механических конструкций и рассматриваемый сегодня как основной способ решения задач, описываемых уравнениями математической физики в частных производных. Метод включается в системы автоматизированного проектирования (САПР) и служит для моделирования механических, тепловых и других задач [4; 5].

Сегодня МКЭ является мощным инструментом инженерного анализа и физических исследований благодаря созданию пакетов компьютерных программ, таких как ANSYS, LS-DYNA, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS, DEFORM, которые не только реализуют вычислительный процесс МКЭ, но и имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычисления и обработки результатов расчета. Однако количество научных трудов по использованию конечно-элементных методов при обработке отверстий со снятием стружки, в частности при сверлении заготовок из труднообрабатываемых титановых сплавов, явно ограничено, а вопросы, связанные с моделированием процесса сверления с наложением ультразвуковых колебаний в зону формообразования, недостаточно полно изучены [6–7].

Общей особенностью при создании конечно-элементных моделей процесса сверления вне зависимости от САЕ-системы, в которой проводится симуляция процесса, является сложность построения модели заготовки. Построение является важным этапом, так как в дальнейшем оно может существенно влиять на точность расчетов.

Основное количество трудов по тематике МКЭ процесса сверления в САЕ-системах посвящены вопросам пластической деформации, полученных методом Лагранжа, однако данный метод не чувствителен к энергии ультразвукового поля [8]. Относительно новый подход к решению подобных задач методом Галеркина, рассмотренный в данной работе, позволяет достаточно

полно оценить влияние частоты ультразвуковых колебаний на результирующую силу резания и другие энергетические показатели процесса съема стружки.

В последнее время все более широкое распространение для уменьшения подобных затрат получили программы математического моделирования, дающие возможность полностью имитировать технологические процессы в компьютере (цифровой двойник). Ls-DYNA является одной из таких программ, позволяющих разработать моделирование процессов сверления [9].

Цель исследования – осуществление конечно-элементного моделирования процессов сверления титанового сплава и на его основе оценка влияния элементов режима резания и ультразвуковых колебаний на силы резания.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе рассматривали два варианта имитации обработки отверстий.

Первый вариант заключался в сверлении заготовки, элементы которой задавались методом Лагранжа (рис.1 а), второй вариант – в сверлении заготовки, элементы которой задавались методом Галеркина (рис. 1 б). Последний вариант позволяет существенно проще и за более короткий временной промежуток оценить влияние ультразвуковых колебаний на энергосиловые параметры процесса обработки.

По первому варианту модель состояла из двух частей: сверла 1 и заготовки 2 (рис. 1 а). Фиксация заготовки осуществлялась по боковой поверхности. Угол сверла при вершине составлял 130° . С целью сокращения времени расчета на ПЭВМ в программе LS-DYNA задавались угловая скорость вращения сверла – 160 об/с; подача – 0,2 мм/об.

Заготовка задавалась в виде цилиндра с отверстием, при этом верхняя плоскость представляла собой конус, вытянутый в направлении подачи сверла. Величина конуса соответствовала углу при вершине сверла (130°). Размеры заготовки составляли $\varnothing 12 \times 0,8$ мм, сверла – $\varnothing 10 \times 25$ мм, элементов заготовки – $0,05 \times 0,05 \times 0,025$ мм. Размеры элементов у сверла в зоне контакта режущего

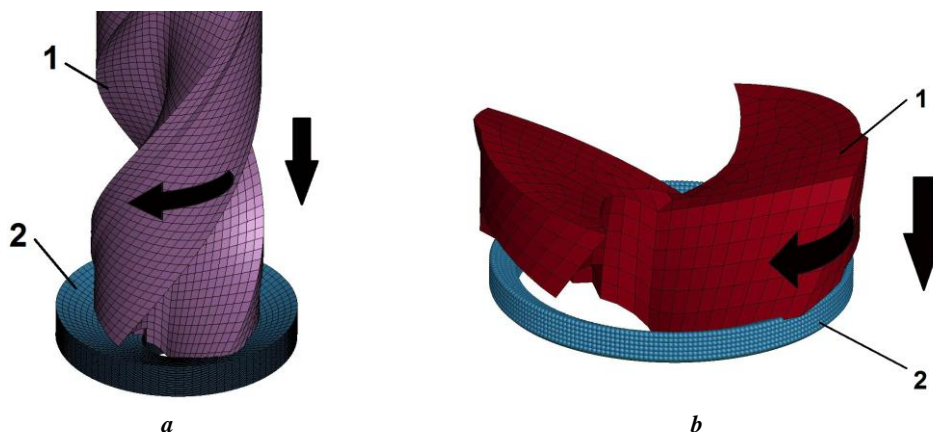


Рис. 1. Схема процесса сверления цилиндрической заготовки методом Лагранжа (а) и трубной заготовки методом Галеркина (б): 1 – сверло, 2 – заготовка
Fig.1. The scheme of the drilling process of a cylindrical work using the Lagrange method (a) and of a tubular blank using the Galerkin method (b): 1 – a spiral drill, 2 – a blank

клина также составляли 0,05 мм. Сама модель заготовки содержала 2 млн элементов и 15 тыс. элементов сверла (сверло перед расчетом было обрезано по длине для ускорения времени расчета).

В качестве материала исходной заготовки использовали титановый сплав ВТ6, задаваемый моделью *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY с определением критерия разрушения Gismo в карте MAT_ADD_EROSION [10; 11]. Данные модели материала позволили задать кривые упрочнения в зависимости от скорости деформации, используя табличные данные в карте DEFINE_TABLE, а критерий разрушения от напряженного состояния – с помощью параметров триаксилити и Lode. Теплофизические характеристики материала задавали в карте MAT_THERMAL_ISOTROPIC (теплопроводность и теплоемкость).

Для заготовки определялся тип элемента *SECTION_SOLID с полноинтегрированной элементной формулировкой (-2), применяемой при плохом соотношении сторон.

Сверло рассматривалось как недеформируемое тело с помощью модели материала *MAT_RIGID с параметрами стали. Для инструмента определялся тип элемента *SECTION_SOLID с пониженным интегрированием.

Контакт между сверлом и заготовкой задавался картой *ERODING_NODES_TO_SURFACE. Этот контакт позволял учесть разрушения элементов в процессе резания и обеспечивал контакт с последующими внутренними элементами заготовки. Величина коэффициента трения составляла 0,05 [12]. Для отсутствия проникновения отхода в заготовку определялся самоконтакт с помощью карты CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE.

Для обеспечения продольной подачи и вращения сверла использовали карту BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID, определение графиков движения осуществлялось с помощью карты DEFINE_CURVE.

Для проведения прочностного расчета совместно с тепловым определялась карта *CONTROL_SOLUTION, а также использовали тепловые карты CONTROL_THERMAL_, позволяющие определять настроечные параметры теплового расчета. На все элементы модели устанавливалась начальная температура 20 °С с помощью карты INITIAL_TEMPERATURE_SET.

Для вывода параметров тензора деформации на заготовке определялась карта DATABASE_EXTENT_BINARY с заданием параметра STRFLG=1.

Для ускорения времени расчета корректировали временной шаг с помощью параметра DT2MS в карте CONTROL_TIMESTEP. Значение этого параметра подбирали опытным путем так, чтобы вносимые воздействия незначительно влияли на весь процесс сверления.

С целью устранения вышеупомянутых недостатков во второй части данной работы в качестве метода, описывающего математическую модель заготовки, использовали бессеточный метод Галеркина (SPG). В этом методе отсутствуют в явном виде отдельные элементы, а разрушение задается потерей связей между узлами. Кроме того, как было ранее установлено, данный метод чувствителен и к ультразвуковым колебаниям [13].

Для оценки влияния ультразвуковых колебаний на эффективность процесса сверления в направлении про-

дольной подачи инструмента вводили синусоидальное смещение, описываемое зависимостью [14]

$$Y = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \eta * t) - s \cdot t,$$

где A – амплитуда воздействия УЗ колебаний;

η – частота воздействия;

t – текущее время;

s – величина подачи в единицу времени.

Для данной модели были заданы следующие параметры: $A=0,013$ мм; $\eta=20$ кГц; $s=4$ мм/с. Кроме основной частоты в 20 кГц, также были рассмотрены варианты с частотой 10 и 40 кГц.

По данному варианту модель состояла из двух частей: сверла 1 и заготовки 2. Фиксация заготовки осуществлялась по ее нижней части. Угловая скорость вращения сверла составляла 16 об/с, подача – 0,22 мм/об.

Заготовку задавали в виде трубной модели, вытянутой вдоль продольной подачи сверла. Ее верхняя плоскость также представляла собой конус, вытянутый в направлении подачи сверла. Наружный диаметр трубной заготовки составлял $\varnothing 9$ мм, внутренний $\varnothing 8$ мм, толщина заготовки 0,625 мм. Размеры элементов заготовки 0,12×0,12×0,12 мм. Сама модель заготовки содержала 6332 элемента и 860 элементов для сверла.

Как и в первом варианте, в качестве материала исходной заготовки был выбран титановый сплав ВТ6, задаваемый моделью *MAT_JOHNSON_COOK. В данной карте отсутствовал критерий разрушения материала, поскольку в модели SPG вместо разрушения описывается разделение материала [15].

Контакт между сверлом и заготовкой задавали картой *AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE так как разрушение элементов заготовки отсутствовало. Величина коэффициента трения составляла 0,05.

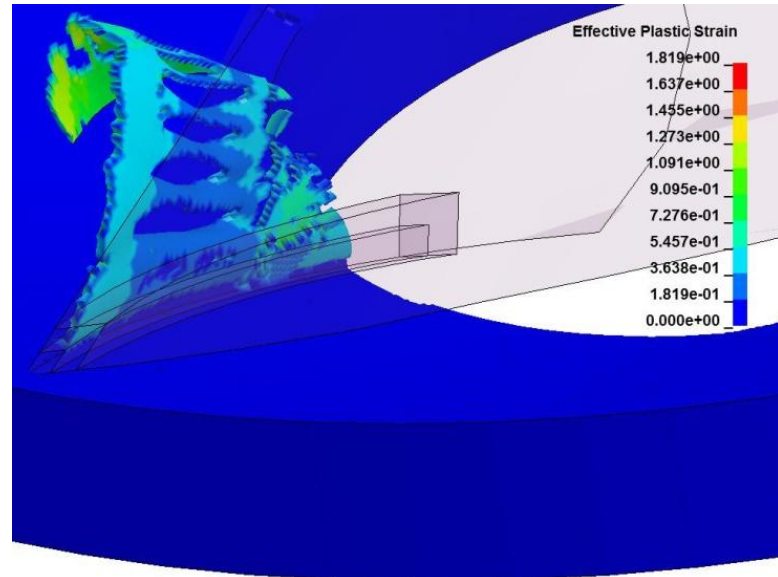
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) на начальных этапах сверления приведены на рис. 2–4. Можно отметить, что наибольшие значения эффективного напряжения находилось в зоне образования стружки от режущего клина сверла (рис. 2 б).

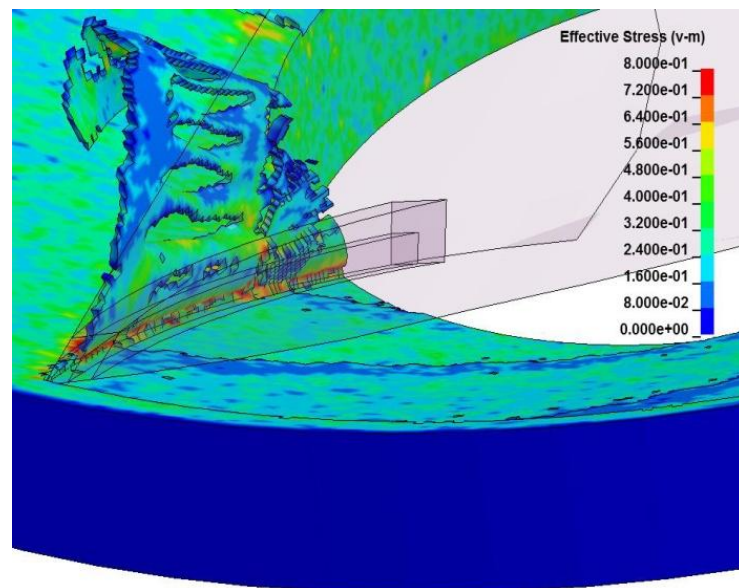
Как видно из рис. 2, стружка представляет собой «рваные участки металла» с последующим их отрывом от заготовки. Сливная стружка не образуется (рис. 3, 4), что характерно для обработки титановых сплавов.

Усилие сверления (рис. 5) соответствует значению 0,12 кН. Энергия деформирования на этапе времени 16 мсек (4 оборота сверла) равна 18 Дж.

Одним из недостатков лагранжевого метода является потеря энергии при удалении элемента стружки. Например, в данном случае потеря энергии составила 55 %, что фактически в 2 раза уменьшает точность расчета. Уменьшить энергию удаления элементов позволяет увеличение их количества или использование других подходов к решению подобных задач. Второй недостаток данного метода – сложность в оценке влияния на процесс сверления энергии ультразвуковых колебаний, позволяющих существенно уменьшить энергетические затраты на формообразование отверстий [17–19].



a



b

*Рис. 2. Отделение стружки на начальной стадии сверления:
a – вывод по пластической деформации; b – по напряжению von mises*

*Fig. 2. Chip separation at the initial drilling stage:
a – the conclusion according to plastic deformation; b – according to von Mises stress*

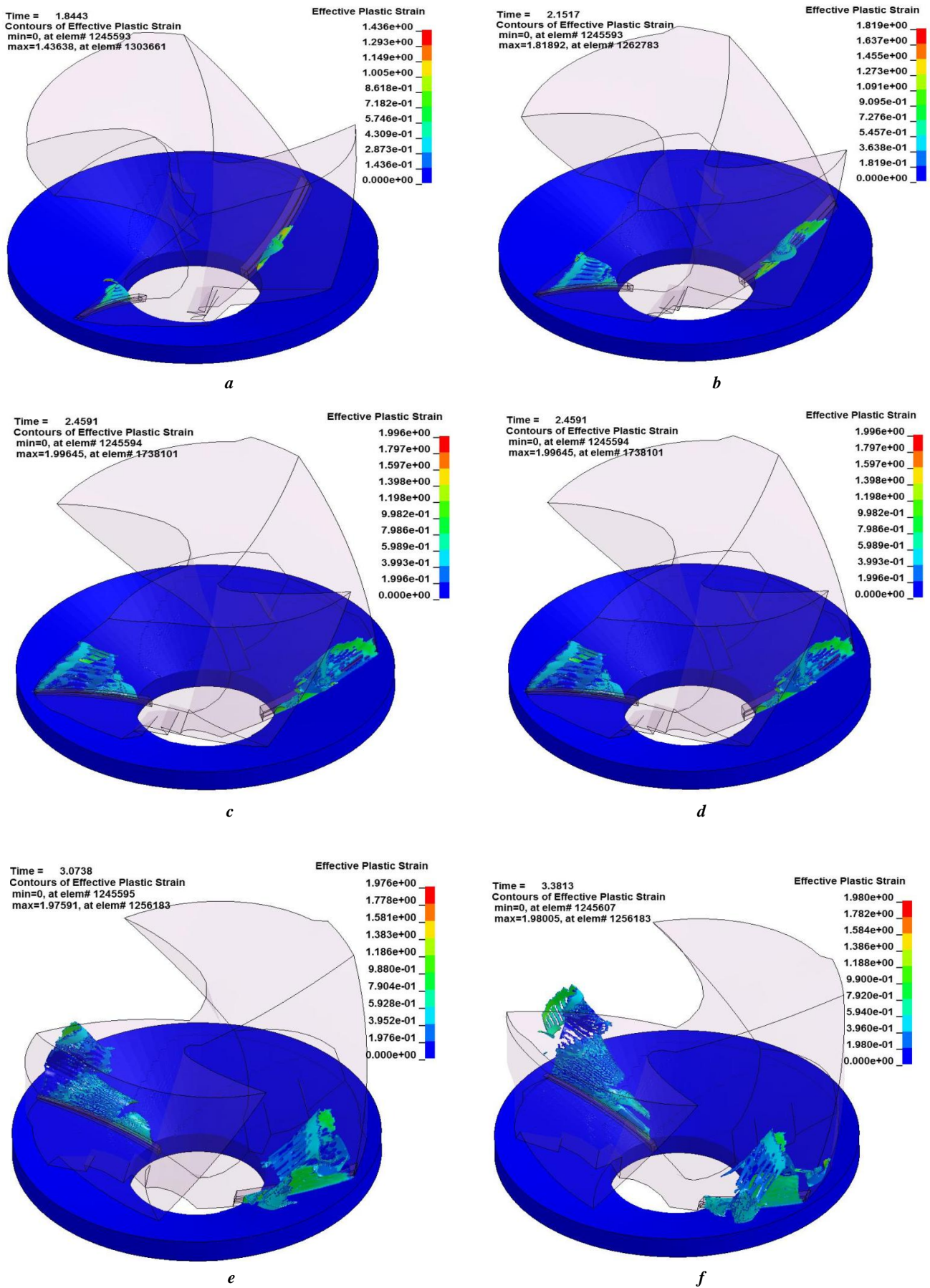


Рис. 3. Пластическая деформация на начальных этапах процесса сверления.
 Показаны последовательные во времени результаты моделирования (a, b, c, d, e, f)
Fig. 3. Plastic deformation at the initial stages of the drilling process.
 The figure shows the time-successive results of modeling (a, b, c, d, e, f)

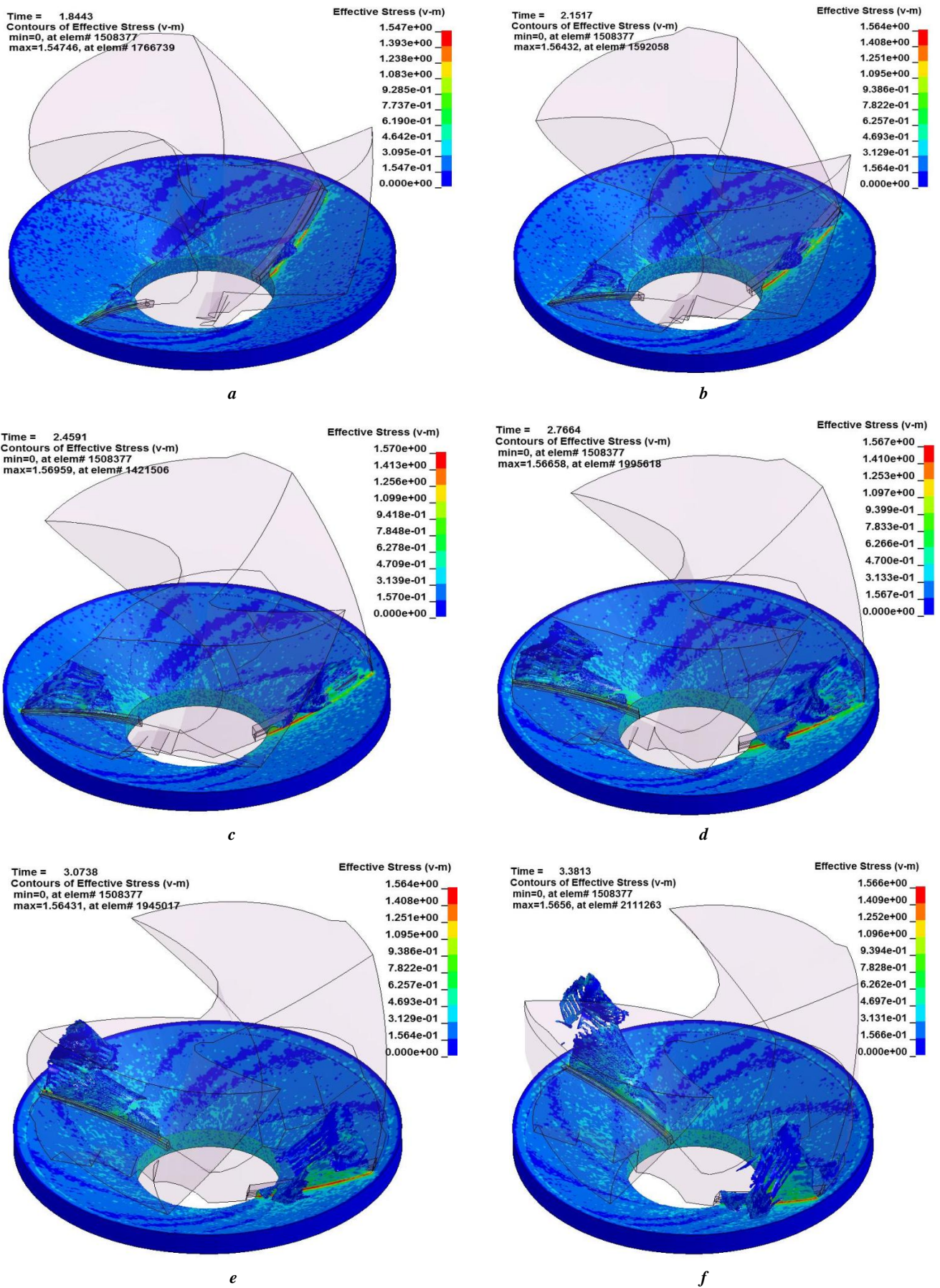


Рис. 4. Напряжения Von mises на начальных этапах процессов сверления. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (a, b, c, d, e, f)

Fig. 4. Von Mises stress at the initial stages of the drilling process. The figure shows the time-successive results of modeling (a, b, c, d, e, f)

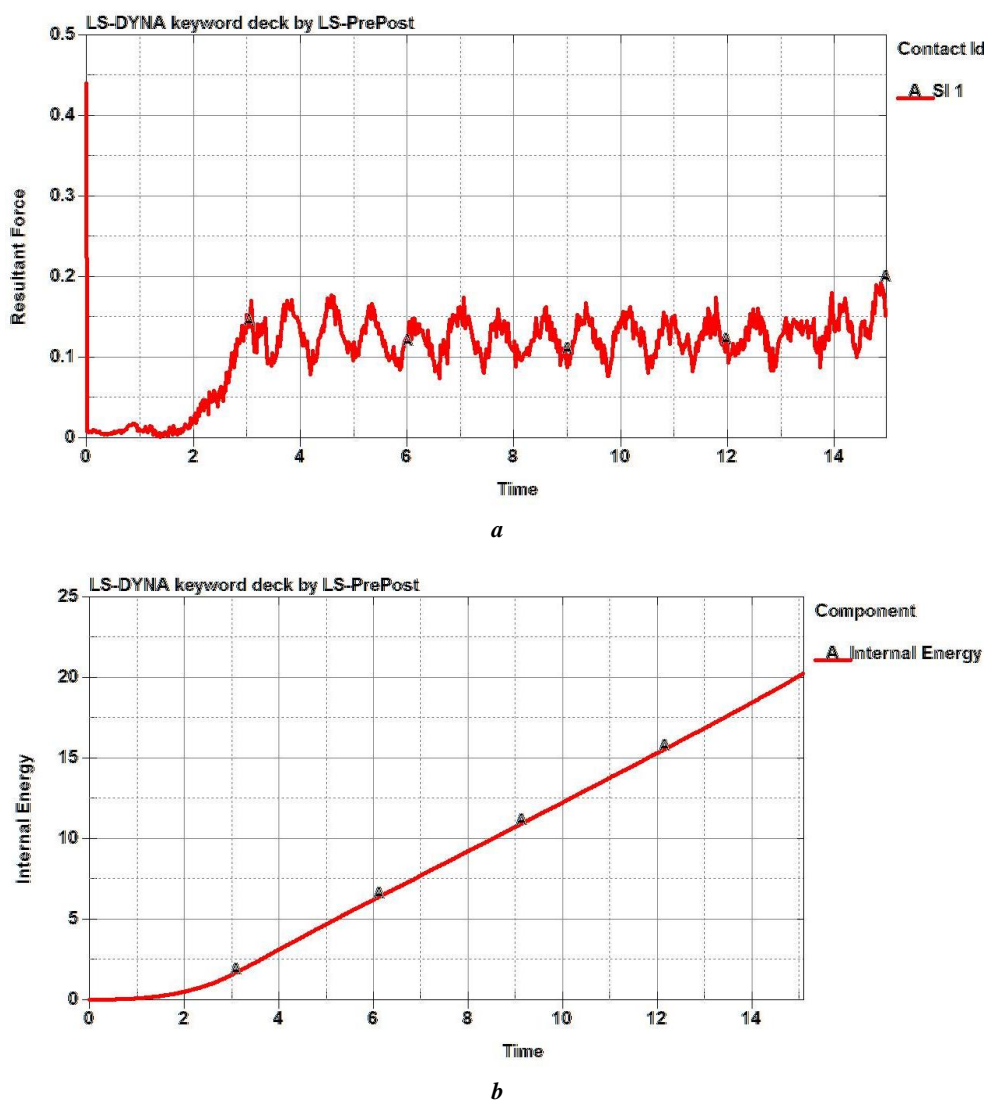


Рис. 5. Усилия сверления (а) и энергия деформирования заготовки (б)
 Fig. 5. Drilling forces (a) and deformation energy of a blank (b)

Результаты моделирования (рис. 6–8) показывают, что наложение колебаний способствует снижению усилия сверления. Введение колебаний при частоте 10 кГц (высокочастотные колебания) приводит к уменьшению усилия на 5 %, при частоте 20 кГц (УЗК) – на 30 %, при частоте 40 кГц (УЗК) – на 50 %. Полученные данные позволяют рассчитывать на повышение точности обработки и повышения стойкости режущего инструмента за счет снижения результирующей силы [18; 19]. По затрачиваемой энергии результаты обратные, воздействие частоты 10–20 кГц приводит к увеличению энергии на 20 %, а частоты 40 кГц – на 37 %.

Некоторое смещение оси сверла относительно оси заготовки (рис. 9) приводит к уменьшению усилия сверления на 15–20 % (рис. 10). При этом энергия деформирования увеличивается на 0,8–1 Дж. Однако этот прием связан с опасностью возникновения увода сверла, что особенно опасно при глубоком сверлении [19; 20].

Данные результаты необходимо учитывать при разработке программ роботизированной групповой обра-

ботки отверстий сверлением в процессе технологической подготовки производства.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основании представленных результатов исследования построены модели процесса сверления, решенные методами Лагранжа и Галеркина. Данные модели позволили провести исследование влияние режима обработки на силы и внутреннюю энергию без использования дорогостоящего процесса обработки на реальном технологическом оборудовании. Разработана методика создания конечной модели процесса сверления для труднообрабатываемого материала – титанового сплава. Получена модель, которая способна оценить влияние ультразвуковых колебаний на силы резания.

Следует отметить, что при моделировании процесса резания методом конечных элементов в качестве оценки влияния факторов приняты величины максимальных значений результирующей силы.

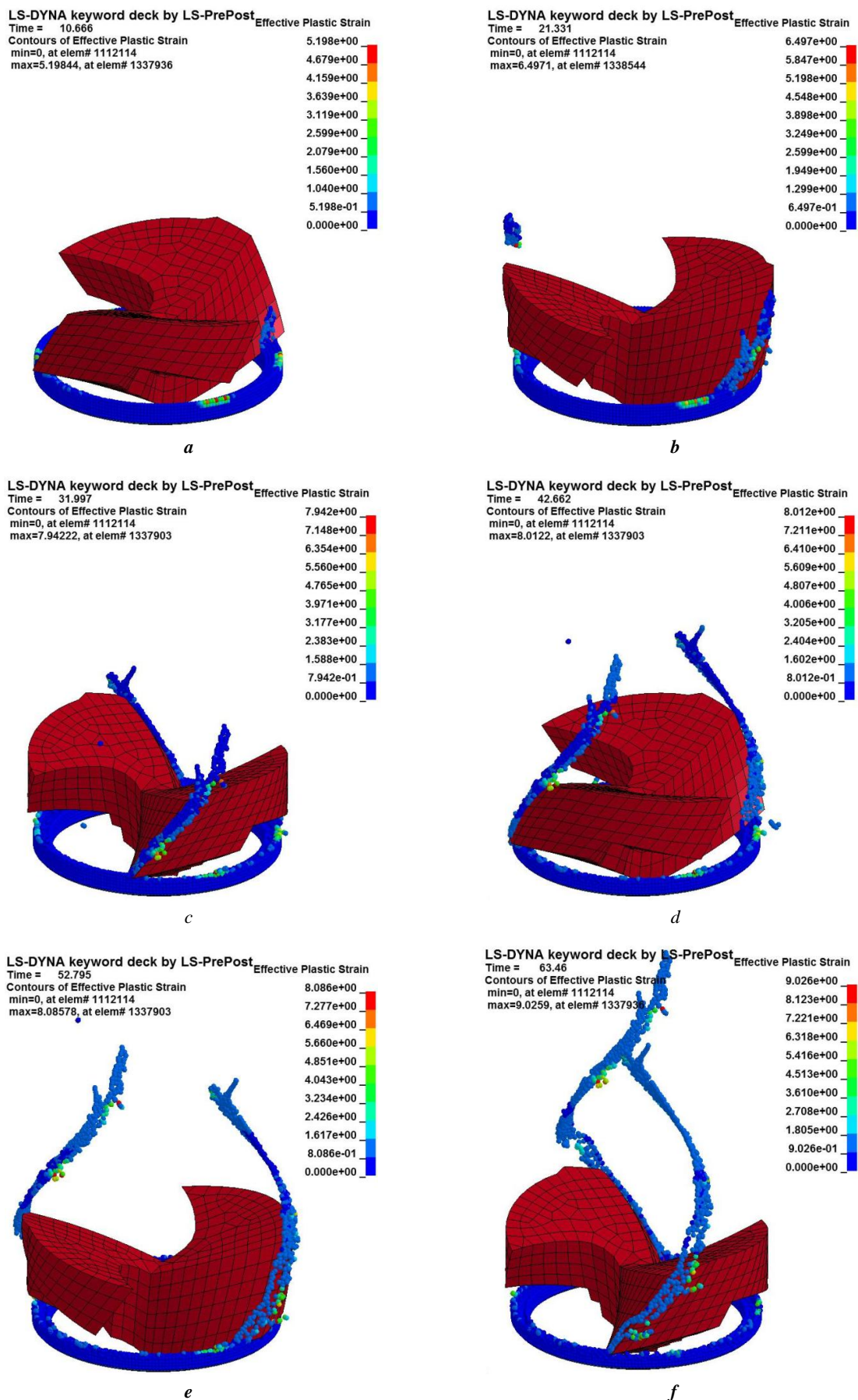


Рис. 6. Результаты сверления трубной заготовки по пластической деформации. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (a, b, c, d, e, f)
Fig. 6. The results of drilling of a tubular blank according to plastic deformation. The figure shows the time-successive results of modeling (a, b, c, d, e, f)

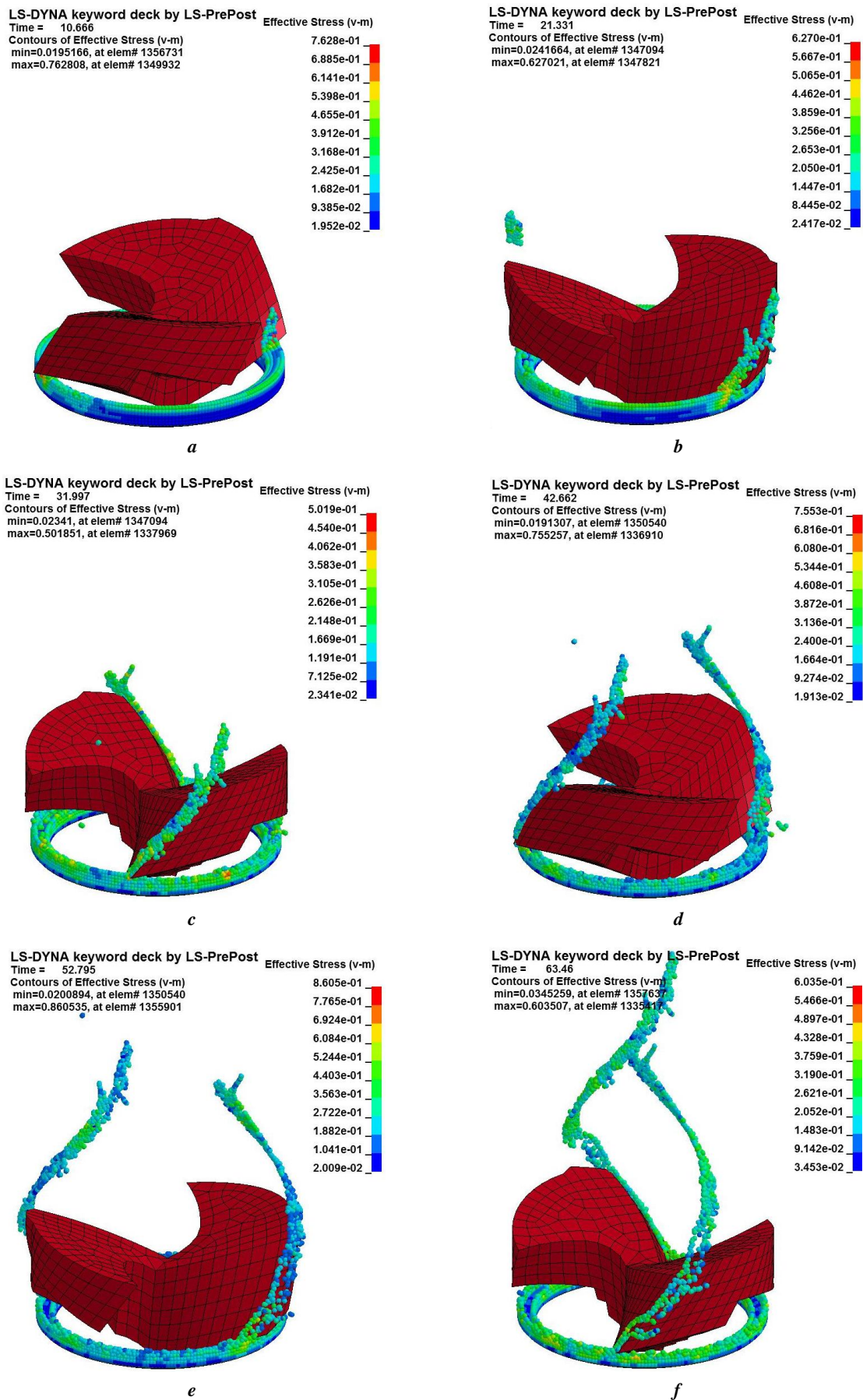
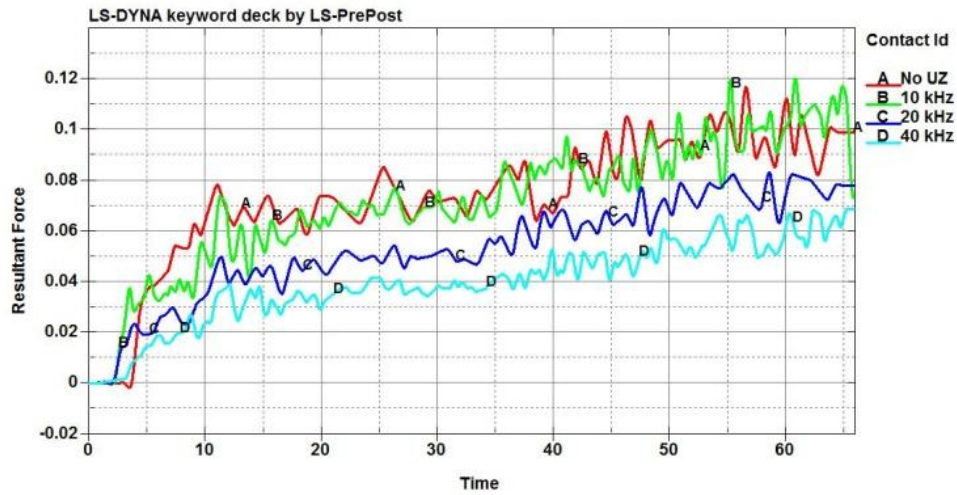
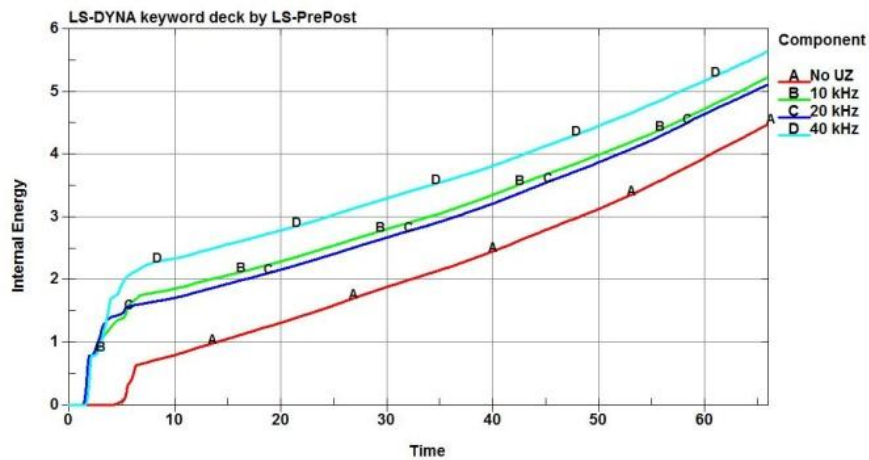


Рис. 7. Результаты сверления трубной заготовки по напряжению Von Mises. Показаны последовательные во времени результаты моделирования (a, b, c, d, e, f)
Fig. 7. The results of drilling of a tubular blank according to Von Mises stress. The figure shows the time-successive results of modeling (a, b, c, d, e, f)



a



b

Рис. 8. Сравнение по усредненному усилию (фильтр на частоте 400 мс), кН (a) и энергии деформирования, Дж (b) при различной частоте УЗК (A – без УЗК; B – 10 кГц; C – 20 кГц; D – 40 кГц)

Fig. 8. The comparison according to averaged force (the filter is on a frequency of 400 ms), kN (a) and deformation energy, J (b) at various frequencies of ultrasonic vibrations (A – without ultrasonic vibrations; B – 10 kHz; C – 20 kHz; D – 40 kHz)

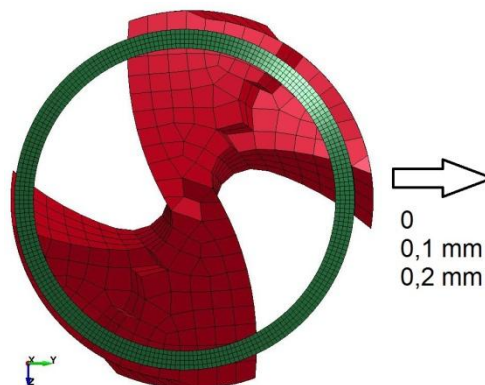


Рис. 9. Смещение продольной оси сверла относительно оси заготовки на 0,1 и 0,2 мм
Fig. 9. 0.1 mm and 0.2 mm displacements of the spiral drill long axis against the blank axis

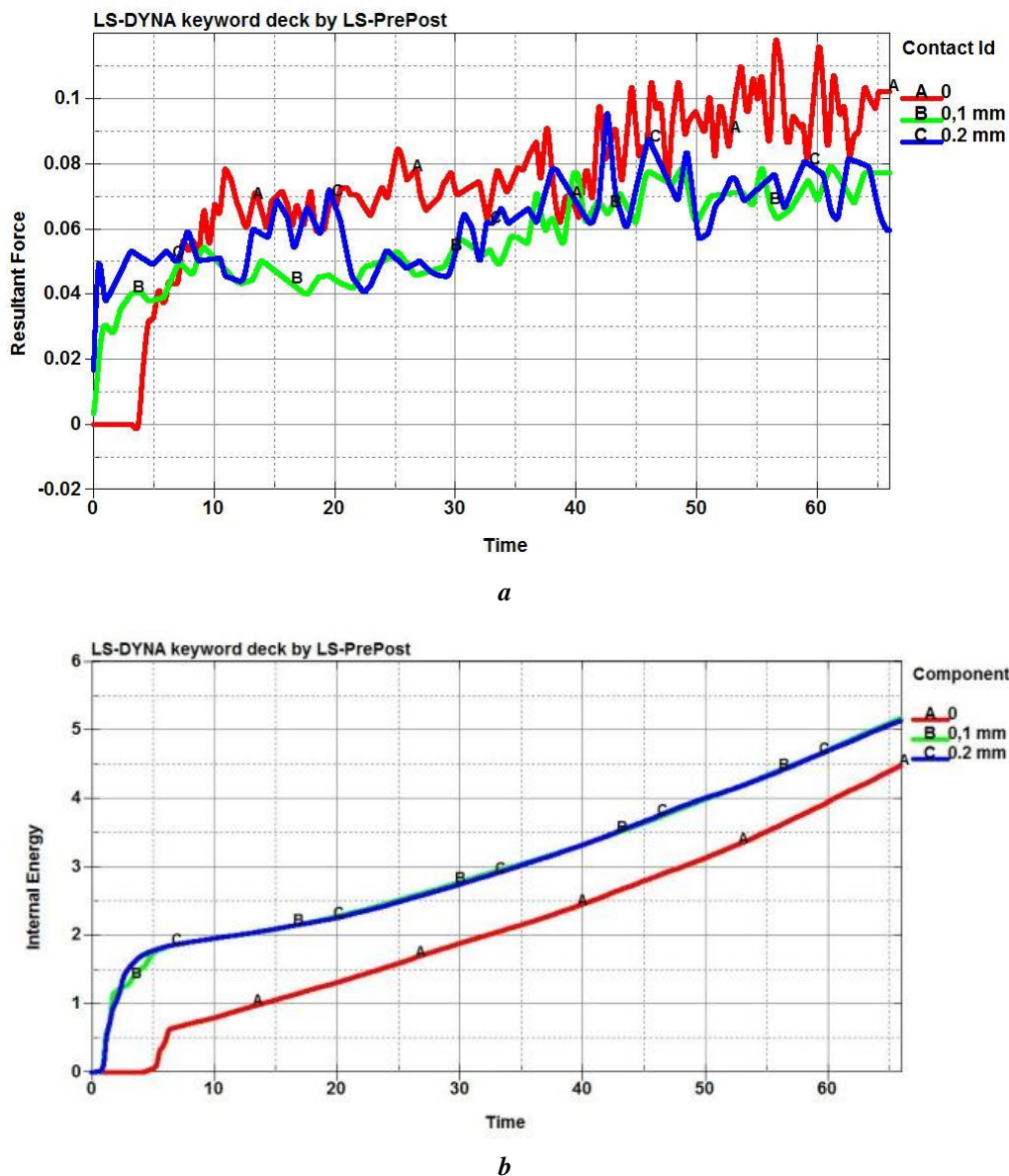


Рис. 10. Сравнение по усредненному усилию (фильтр на частоте 400 мс), кН (а) и энергии деформирования, Дж (б) при различном смещении сверла (А – без смещения; В – 0,1 мм; С – 0,2 мм)

Fig. 10. The comparison according to averaged force (the filter is on a frequency of 400 ms), kN (a) and deformation energy, J (b) at various displacements of a spiral drill (A – without displacement; B – 0.1 mm; C – 0.2 mm)

Для более подробного анализа и учета всех технологических параметров (механические свойства теплофизические характеристики титанового сплава, режимы резания, инструмент, СОЖ) на процесс сверления, очевидно, требуется большее число экспериментов с уменьшением шага по скорости движения осевой подачи, на разных частотах вращения шпинделя, с использованием энергии ультразвукового поля.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, выполненные численные исследования показывают, что их использование позволяет существенно сократить длительность проведения экспериментальных

исследований и оценить влияние элементов режима резания и конструктивных параметров инструмента на силовые и энергетические аспекты формообразования новых поверхностей деталей машин. Однако для полной верификации результатов численных исследований необходимо осуществить их экспериментальную проверку и выполнить внесение полученных корректив в расчетные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев В.И. Становление и развитие науки о резании материалов. Тольятти: ТГУ, 2015. 508 с.
2. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1974. 252 с.

3. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 362 с.
4. Vijayabaskar P., Hynes N.R.J. Simulation of Friction Stir Drilling Process // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1953. Article number 140109. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5033284>.
5. Кирсанов А.Р. Методика оценки повреждаемости ГТД на этапах его создания, изготовления и эксплуатации от поражающего воздействия птиц : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 205 с.
6. Wang P., Wang D. Study on ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V using 3-flute drill in the finite element simulation // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2020. Vol. 234. № 7. P. 1298–1310. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219893001>.
7. Su Y., Chen D.D., Gong L. 3D Finite Element Analysis of Drilling of Ti-6Al-4V Alloy // Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. 2015. P. 907–911. DOI: <https://doi.org/10.2991/cisia-15.2015.245>.
8. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspinwall D., Dowson A., Arnold D. A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys // SAE International Journal of Aerospace. 2016. Vol. 9. № 1. P. 198–207. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-2126>.
9. Дударев А.С., Илюшкин М.В., Николаев И.Ф. Моделирование процесса сверления слоистого материала в LS-DYNA // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2020. Т. 22. № 2. С. 64–74.
10. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. 2017. Vol. 3. № 1. Article number 17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40759-017-0033-1>.
11. Коттрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургиздат, 1958. 390 с.
12. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
13. Киселев Е.С., Малышев В.И., Ковальногов В.Н. Новые ультразвуковые технологии изготовления деталей машин. Тольятти: ТГУ, 2014. 327 с.
14. Киселёв Е.С., Благовский О.В. Управление формированием остаточных напряжений при изготовлении ответственных деталей. СПб.: Лань, 2020. 140 с.
15. Percin M., Aslantas K., Uzun I., Kaynak Y., Cicek A. Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: the effects of cooling/lubricating // Precision Engineering. 2016. Vol. 45. P. 450–462. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.02.015](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.02.015).
16. Li Z., Zhang D., Jiang X., Qin W., Geng D. Study on rotary ultrasonic-assisted drilling of titanium alloys (Ti6Al4V) using 8-facet drill under no cooling condition // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 90. № 9-12. P. 3249–3264. DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9593-1>.
17. Wang T., Liu Z., Qiu Y., Feng Y., Han X. Removal Mechanism of Titanium Alloy Material in Ultrasound Vibration Drilling // Materials Science Forum. 2020. Vol. 993. P. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.3>.
18. Lu Danni. Study on Ultrasonic Vibration Boring Technology of Difficult-to-machine Materials (TC4). Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2018. 241 p.
19. Wang T., Liu X., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Wang Z. ANSYS is used on drilling Inner Blind Hole on Deep Hole // Wireless Personal Communications. 2018. Vol. 103. № 1. P. 1077–1088. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5497-8>.
20. Liang W., Xu J., Ren W., Yu Z., Liu Q., Yu H. Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Drilling of Ti-6Al-4V at Different Amplitudes // 2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO. 2019. P. 20–23. DOI: [10.1109/3M-NANO46308.2019.8947411](https://doi.org/10.1109/3M-NANO46308.2019.8947411).

REFERENCES

1. Malyshev V.I. *Stanovlenie i razvitie nauki o rezanii materialov* [The formation and development of the materials cutting science]. Tolyatti, TGU Publ., 2015. 508 p.
2. Poduraev V.N. *Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Cutting of hard-processing materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 252 p.
3. Tsvikker U. *Titan i ego splavy* [Titanium and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 362 p.
4. Vijayabaskar P., Hynes N.R.J. Simulation of Friction Stir Drilling Process. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1953, article number 140109. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5033284>.
5. Kirsanov A.R. *Metodika otsenki povrezhdaemosti GTD na etapakh ego so-zdaniya, izgotovleniya i ekspluatatsii ot porazhayushchego vozdeystviya ptits* [The technique to evaluate damaging of a gas-turbine engine by the bird destructive effect at the stages of its creation, production and operation]. Diss. kand. tekhn. nauk. Moscow, 2016. 205 p.
6. Wang P., Wang D. Study on ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V using 3-flute drill in the finite element simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, vol. 234, no. 7, pp. 1298–1310. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219893001>.
7. Su Y., Chen D.D., Gong L. 3D Finite Element Analysis of Drilling of Ti-6Al-4V Alloy. *Proceedings of the International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications*, 2015, pp. 907–911. DOI: <https://doi.org/10.2991/cisia-15.2015.245>.
8. Abdelhafeez A.M., Soo S.L., Aspinwall D., Dowson A., Arnold D. A Coupled Eulerian Lagrangian Finite Element Model of Drilling Titanium and Aluminium Alloys. *SAE International Journal of Aerospace*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 198–207. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-2126>.
9. Dudarev A.S., Ilyushkin M.V., Nikolaev I.F. Modeling the drilling process of layered material in program LS-DYNA. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2020, vol. 22, no. 2, pp. 64–74.
10. Dudarev A., Volegov K., Kurzanov G. Rheonomic phenomenon shrinkage of holes drilled in fibreglass and

- carbon fibre-reinforced polymer composites. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes*, 2017, vol. 3, no. 1, article number 17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40759-017-0033-1>.
11. Kottrell A.X. *Dislokatsii i plasticheskoe techenie v kristallakh* [Dislocations and plastic flow in crystals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1958. 390 p.
 12. Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p.
 13. Kiselev E.S., Malyshev V.I., Kovalnogov V.N. *Novyye ultrazvukovyye tekhnologii izgotovleniya detaley mashin* [New ultrasonic technologies of machine parts production]. Tolyatti, TGU Publ., 2014. 327 p.
 14. Kiselev E.S., Blagovskiy O.V. *Upravlenie formirovaniem ostatochnykh napryazheniy pri izgotovlenii otvetstvennykh detaley* [The control of formation of residual stresses when producing essential parts]. Sankt Petersburg, Lan Publ., 2020. 140 p.
 15. Percin M., Aslantas K., Uzun I., Kaynak Y., Cicek A. Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: the effects of cooling/lubricating. *Precision Engineering*, 2016, vol. 45, pp. 450–462. DOI: [10.1016/j.precisioneng.2016.02.015](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.02.015).
 16. Li Z., Zhang D., Jiang X., Qin W., Geng D. Study on rotary ultrasonic-assisted drilling of titanium alloys (Ti6Al4V) using 8-facet drill under no cooling condition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, no. 9-12, pp. 3249–3264. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9593-1>.
 17. Wang T., Liu Z., Qiu Y., Feng Y., Han X. Removal Mechanism of Titanium Alloy Material in Ultrasound Vibration Drilling. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 993, pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.3>.
 18. Lu Danni. *Study on Ultrasonic Vibration Boring Technology of Difficult-to-machine Materials (TC4)* [D]. Xi'an, Xi'an Shiyou University Publ., 2018. 241 p.
 19. Wang T., Liu X., Liu Z., Liu Y., Zhang Y., Wang Z. ANSYS is used on drilling Inner Blind Hole on Deep Hole. *Wireless Personal Communications*, 2018, vol. 103, no. 1, pp. 1077–1088. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5497-8>.
 20. Liang W., Xu J., Ren W., Yu Z., Liu Q., Yu H. Experimental Study on Ultrasonic Vibration Assisted Drilling of Ti-6Al-4V at Different Amplitudes. *2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO*, 2019, pp. 20–23. DOI: [10.1109/3M-NANO.46308.2019.8947411](https://doi.org/10.1109/3M-NANO.46308.2019.8947411).

Use of digital twins for mathematical modeling of ultrasonic drilling of titanium blanks

© 2021

Kirill S. Savelyev^{1,3}, postgraduate student of Chair “Innovative Technologies in Mechanical Engineering”

Maksim V. Ilyushkin^{2,4}, PhD (Engineering), Deputy Director

Evgeniy S. Kiselev^{*1,5}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,

Director of Regional Technological Center for Industrial Internet in Mechanical Engineering

¹*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)*

²*Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization, Ulyanovsk (Russia)*

*E-mail: kec.ulstu@mail.ru³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0473-4699>⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3335-728X>⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1745-9016>

Abstract: The paper considers the creation and research of a virtual prototype of titanium blanks drilling using the Lagrange and Galerkin method. The developed finite-element models are designed to study the process of mechanical treatment and optimize technological cutting parameters. The paper presents the results of computational investigation of titanium blanks drilling using mathematical modeling programs, which allow complete simulating operating procedures in a computer (digital twin). As a program to simulate the process of removing the allowance from a titanium workpiece, the authors used a multipurpose software product of finite-element modeling and analysis of highly-linear dynamic processes using various Ls-DYNA time integration schemes. The application of the Galerkin method allows adequately describing the drilling process with the introduction of the ultrasonic field energy into a treatment zone, can significantly reduce the duration of experimental research and evaluates the influence of the cutting mode elements and the tool design parameters on the power and energy aspects of the formation of new machine parts surfaces. Both methods are applicable to create various processes of mechanical treatment, however, the Lagrange method is less sensitive to the ultrasonic field energy. The introduction of the ultrasonic field energy into the drilling zone of workpieces made of hard-processing titanium alloys can significantly reduce energy costs. As a result of the simulation, the authors obtained a calculation file containing the simulation process, the solution of which visually reflects the drilling process of a titanium workpiece in a real-life setting with the removal of chips. However, for complete verification of numerical study results, it is necessary to carry out an experimental check and make adjustments to the calculated data.

Keywords: digital twin; modeling; cutting; ultrasound; titanium; drilling; strain energy.

Acknowledgements: The research is carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Ulyanovsk region within the scientific project No. 18-47-730005.

For citation: Savelyev K.S., Ilyushkin M.V., Kiselev E.S. Use of digital twins for mathematical modeling of ultrasonic drilling of titanium blanks. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 42–54. DOI: [10.18323/2073-5073-2021-1-42-54](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2021-1-42-54).

Повышение режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных сталей наложением ультразвуковых колебаний на заготовку

© 2021

Хазов Александр Васильевич¹, главный инженер
Унянин Александр Николаевич^{*2,3}, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология машиностроения»

¹АО «Ульяновский механический завод», Ульяновск (Россия)

²Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)

*E-mail: a_un@mail.ru

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

Аннотация: Целью исследования стало выявление связи интенсивности налипания с ультразвуковыми колебаниями (УЗК), используемыми в процессе обработки, и оценка работоспособности кругов при шлифовании заготовок из пластичных материалов. Выполнено численное моделирование локальных температур и температуры заготовки из стали 3Х3М3Ф в процессе шлифования с наложением УЗК. Установлено, что применение УЗК амплитудой 3 мкм приводит к снижению локальных температур на 13...40 %, температур заготовки – до 20 %. Расчетом установлено, что наложение УЗК амплитудой 3 мкм способствует снижению коэффициента засаливания на 33 % для режущего и на 7 % для пластически деформирующего зерна. При увеличении скорости продольной подачи или глубины шлифования коэффициент засаливания при использовании УЗК увеличивается в меньшей степени, чем в случае, когда колебания не накладываются. Выполнено численное моделирование локальных температур при царапании образцов из стали 3Х3М3Ф единичными абразивными зёрнами с наложением УЗК. Рассчитана деформация налипа, а также напряжения, являющиеся следствием этой деформации, действующие на соединение налипа с зёрнами без наложения и с наложением УЗК. В процессе экспериментальных исследований осуществляли микрорезание образцов единичными абразивными зёрнами. Установлено, что в меньшей степени изнашиваются и засаливаются абразивные зёрна при микрорезании с наложением на заготовку УЗК. Снижение коэффициента засаливания при наложении УЗК является следствием снижения интенсивности налипания частиц материала заготовки на абразивные зёрна за счет схватывания. Рассмотрена возможность повышения эффективности плоского шлифования за счет использования энергии УЗК, накладываемых на заготовку в направлении, совпадающем с осью шлифовального круга. Заготовка закрепляется в устройстве между излучателем колебаний и опорой, т. е. является одним из звеньев колебательной системы. Экспериментальные исследования выполнили при шлифовании периферией круга заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т. При шлифовании с УЗК коэффициент шлифования увеличивается до 70 %, а период стойкости круга – в 2...3 раза.

Ключевые слова: шлифование; ультразвуковые колебания; УЗК; абразивное зерно; заготовка; налипание; засаливание; пластичный материал; 3Х3М3Ф; 12Х18Н10Т.

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 19-48-730002.

Для цитирования: Хазов А.В., Унянин А.Н. Повышение режущей способности шлифовального круга при обработке заготовок из пластичных сталей наложением ультразвуковых колебаний на заготовку // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 55–62. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-55-62.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении операций окончательного и тонкого шлифования, когда круг работает в режиме затупления или частичного самозатачивания, с увеличением наработки режущая способность круга снижается. Причинами являются образование на абразивных зёрнах площадок изнашивания (затупление абразивных зёрен) и засаливание рабочей поверхности круга. Засаливание связано с появлением на рабочей поверхности круга частиц шлама, состоящего из материалов зёрен и связки шлифовального круга и материала обрабатываемой заготовки.

В большинстве случаев режущая способность в процессе шлифования снижается не вследствие проникновения частиц шлама в пространство между зёрнами

и в поры круга, а вследствие налипания на абразивные зёрна материала (металла) обрабатываемой заготовки [1].

На процесс образования соединения керамического материала с металлами влияет ряд факторов, прежде всего давление и температура в зоне контакта соединяемых поверхностей и продолжительность контакта [2]. Давление в зоне контакта режущих и пластически деформирующих зёрен с заготовкой, локальные (мгновенные) температуры и время действия этих факторов для большей части условий и режимов шлифования достаточны для образования налипа на зёрне за счет схватывания [1]. Установлено, что если температура в зоне контакта не превышает $(0,80...0,85) \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления соединяемого металла, то процесс образования соединения металлического и керамического объектов не происходит. Температура

плавления большинства сталей равна около 1400 °С, а локальные (мгновенные) температуры при наиболее часто используемых на практике условиях и режимах шлифования превышают это значение [1; 3]. Поэтому изыскание путей и средств уменьшения локальных температур актуально для снижения интенсивности засаливания круга.

Для расчета коэффициента трения абразивного зерна, покрытого налипами, о поверхность обрабатываемой заготовки предложена зависимость [1], аргументами которой являются коэффициенты трения налива и абразивного зерна по поверхности заготовки и коэффициент засаливания зерна. Коэффициент трения абразивного зерна по металлу значительно ниже коэффициента трения в зоне контакта металлических поверхностей, поэтому при шлифовании кругами с налипами на поверхностях абразивных зерен коэффициент трения в зоне контакта зерна с заготовкой увеличивается. Шлам, находящийся в пространстве между зернами круга и в его порах, также способствует увеличению коэффициента трения и силы трения в зоне контакта «шлифовальный круг – заготовка». Увеличение коэффициента трения при обработке засаленными кругами приводит к увеличению силы шлифования, а следовательно, и к росту температуры в зоне шлифования. В результате снижается качество деталей: в их поверхностном слое происходят нежелательные структурные и фазовые превращения, увеличивается вероятность появления прижогов и микротрещин, возникают значительные растягивающие напряжения [4; 5].

Адгезионное взаимодействие материала заготовки с налипами в процессе шлифования является причиной развития усталостных трещин в абразивных зернах, в результате чего интенсифицируется процесс адгезионного изнашивания зерен [6; 7]. При увеличении площадки износа на зерне увеличиваются и локальные температуры, что приводит к интенсификации процесса образования налипов.

Одним из путей снижения степени засаливания рабочей поверхности круга является выбор материалов зерна и связки круга, в меньшей степени предрасположенных к образованию соединения с материалом заготовки за счет схватывания. Другим направлением является рациональное применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), способствующее интенсификации их смазочного и моющего действий [8; 9]. При образовании на поверхностях заготовки и абразивных зерен экранирующих пленок вследствие реализации смазочного действия СОТС предотвращается непосредственный контакт этих поверхностей, что затрудняет процесс схватывания контактирующих поверхностей зерна и заготовки.

Для восстановления режущей способности кругов используют пути и средства, направленные на удаление частиц шлама с их рабочих поверхностей.

Интенсифицировать смазочное и моющее действия смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) при шлифовании возможно за счет применения струйно-напорно-внезонного способа подачи СОЖ, подачи СОЖ к торцу круга через клиновые насадки с наложением на них ультразвуковых колебаний (УЗК) и ультразвуковой очистки рабочей поверхности круга [10; 11].

Непрерывная правка шлифовального круга обеспечивает стабильную режущую способность его рабочей поверхности. Этот способ правки кругов широко используется на операциях глубинного шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов [11; 12], в том числе при многокоординатном глубинном шлифовании [13].

Одним из средств снижения локальной температуры, оказывающей доминирующее влияние на образование соединения материалов заготовки и абразивного зерна с образованием налипов, является наложение УЗК на заготовку [14; 15]. Однако влияние УЗК на процесс налипания материала заготовки на абразивные зерна не выявлено.

Цель исследования – установление влияния ультразвуковых колебаний, накладываемых на обрабатываемую заготовку в процессе шлифования, на процесс налипания частиц материала заготовки на абразивные зерна и оценка работоспособности кругов при шлифовании заготовок из пластичных материалов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для расчета коэффициента засаливания зерна, представляющего отношение площади налипов металла к площади площадки износа на зерне, использовали регрессионные модели, полученные в работе [1]. Аргументами этих моделей являются локальные температуры в зоне контакта абразивного зерна с заготовкой.

Расчет температурного поля с наложением колебаний на заготовку выполнен для схемы плоского маятникового шлифования периферией круга заготовок из конструкционной легированной стали 3Х3М3Ф, обладающей высокими пластическими свойствами (относительным удлинением и относительным сужением образцов из этой стали) и вязкостью [16]. В качестве материала абразивного зерна шлифовального круга применили электрокорунд белый зернистостью F100. Использовали следующие элементы режима шлифования: рабочая скорость круга $V_k=35$ м/с; глубина шлифования $t=0,01$ мм; скорость продольной подачи $V_{sm}=10$ м/мин. Высокие пластические свойства и вязкость стали 3Х3М3Ф обуславливают интенсивное образование налипов на зернах круга при шлифовании заготовок из этой стали [1; 7]. Для расчета сил диспергирования материала заготовки режущими и пластически деформирующими абразивными зернами и мощности источников тепловыделения (принимали во внимание три источника) использовали аналитические зависимости [17; 18]. Теплофизические характеристики абразивных материалов приведены в работе [19]; теплофизические и механические характеристики стали 3Х3М3Ф приведены в справочнике [16].

Для численного моделирования температурного поля процесса шлифования с УЗК использовали программное обеспечение, представленное в работе [20]. Моделировали наложение на заготовку колебаний частотой 22000 Гц. Амплитуда колебаний заготовки в направлении, перпендикулярном ее обрабатываемой поверхности, составляла 3 мкм. Фиксировали температуру заготовки на различных расстояниях от ее обрабатываемой поверхности и локальные (мгновенные) температуры

в зонах контакта режущих зерен с заготовкой и со стружкой и в зонах контакта пластически деформирующих зерен с заготовкой. Локальные температуры определяли в нескольких точках, расположенных в зонах контакта зерна с заготовкой и со стружкой на различных расстояниях от вершины зерна, а затем рассчитывали среднее значение температур.

Для расчета напряжений, способствующих отрыву налипа от поверхности абразивного зерна, использовали аналитические зависимости, представленные в работе [1].

Экспериментальное определение коэффициента засаливания зерна выполнили на установке, позволяющей осуществлять царапание образца единичным абразивным зерном. Глубина внедрения зерен в образец составляла 3 и 6 мкм. В первом случае реализуется процесс пластического деформирования, во втором – микрорезание материала образца.

Коэффициент засаливания определяли как отношение площади налипов, образовавшихся на площадке затупления зерна, к площади этой площадки. При помощи микроскопа РМЕ площадку затупления фотографировали, затем сканировали полученное изображение и, используя программный продукт FOTOSHOP, оценивали площадь налипов. На заготовку накладывали УЗК с помощью устройства, описанного в работах [15; 18].

Экспериментальная установка для исследования процесса засаливания единичных абразивных зерен при

царапании с наложением колебаний создана на базе плоскошлифовального станка (рис. 1). Зерна закрепляли в держателе 1, жестко связанном с планшайбой, установленной на шпинделе плоскошлифовального станка.

Оценку работоспособности шлифовального круга при наложении на шлифуемую заготовку УЗК производили в процессе плоского маятникового шлифования заготовок из стали 3Х3М3Ф и коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т. Эти стали относятся к 1-й и 3-й группам обрабатываемости материалов шлифованием. Рабочая скорость круга 25А25(F60)ПСМ1(К)6К6(V) составляла 35 м/с; врезная подача – 0,01 мм/дв. ход; скорость продольной подачи стола станка 3Е710В-1 – 10 м/мин. На заготовку накладывали колебания частотой $f=22000$ Гц в направлении, совпадающем с осью круга. Амплитуду колебаний изменяли в пределах 3...12 мкм. При этом за счет распространения в заготовке сдвиговых волн ее частицы колебались и в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Моделирование температур при шлифовании показало, что колебания заготовки с амплитудой 3 мкм в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, позволяют уменьшить температуры заготовки на глубине 2 и 50 мкм на 21 и 15 % соответственно. Средние по зонам контакта режущего зерна

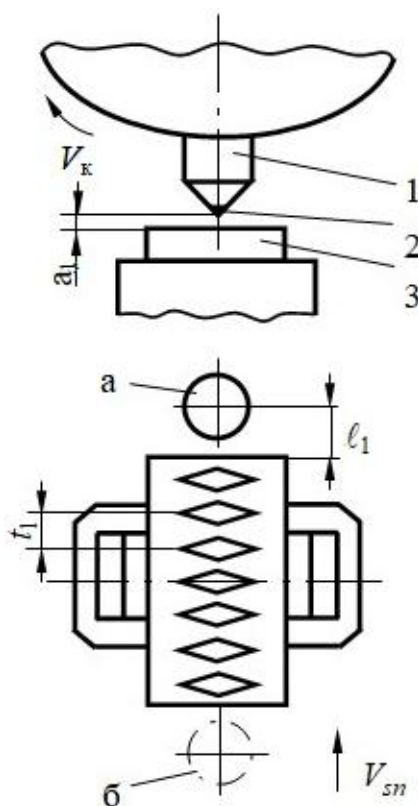


Рис. 1. Схема царапания образца единичным зерном:

1 – держатель; 2 – абразивное зерно; 3 – образец

Fig. 1. The scheme of specimen scratching with a single grain:

1 – a carrier; 2 – an abrasive grain; 3 – a specimen

с заготовкой T_2 и со стружкой T_2' температуры при наложении колебаний снизились в среднем на 40 %. Средняя температура в зоне контакта пластически деформирующего зерна с заготовкой $T_{2п}$ уменьшилась на 13 % (таблица 1). Математические модели для расчета коэффициента засаливания K_3 зерна в зависимости от локальной температуры T_2 в зоне контакта зерна с заготовкой приведены в работе [1].

Для образцов из стали 3Х3М3Ф регрессионные модели имеют следующий вид:

– при глубине внедрения зерна в материал заготовки $a_z=3$ мкм (пластически деформирующее зерно)
 $K_3 = 0,016 \cdot n_g + 0,027 \cdot T_2 - 42$;

– при $a_z=6$ мкм (режущее зерно)
 $K_3 = 0,019 \cdot n_g + 0,024 \cdot T_2 - 42,3$.

Из этих зависимостей следует, что интенсивность засаливания зерна увеличивается с ростом локальной температуры и числа взаимодействий зерна с заготовкой.

Результаты расчета по вышеприведенным зависимостям коэффициентов K_3 с использованием результатов моделирования локальных температур (таблица 1) представлены в таблице 2.

Коэффициент засаливания пластически деформирующего зерна при шлифовании без УЗК на 40 % ниже, чем режущего, что связано с меньшими значениями локальной температуры на этом зерне. Наложение УЗК амплитудой $A_y=3$ мкм способствует снижению K_3 на 33 % для режущего и на 7 % для пластически деформирующего зерна. Меньшая степень снижения ко-

эффициента засаливания для пластически деформирующего зерна связана с меньшим влиянием УЗК на температуру T_2 этих зерен.

При увеличении скорости продольной подачи с 10 до 20 м/мин коэффициент засаливания K_3 увеличивается на 23 % при шлифовании без УЗК ($A_y=0$) и на 9 % при наложении колебаний амплитудой $A_y=3$ мкм (таблица 3).

Увеличение глубины шлифования с 0,01 до 0,03 мм приводит к незначительному увеличению K_3 – на 5 и 2 % при диспергировании без УЗК и с применением УЗК соответственно. Следовательно, при интенсификации режима шлифования (увеличении скорости продольной подачи или глубины шлифования) коэффициент засаливания K_3 увеличивается в меньшей степени при шлифовании с УЗК.

При шлифовании с использованием УЗК со скоростью продольной подачи 20 м/мин и глубиной шлифования 0,03 мм коэффициент K_3 ниже на 17 и 23 % соответственно, чем при шлифовании со скоростью подачи 10 м/мин и глубиной 0,01 мм без применения УЗК. Следовательно, применение УЗК может позволить значительно интенсифицировать режим и увеличить производительность шлифования.

После выхода зерна из зоны контакта с заготовкой в процессе остывания в налипках появляются напряжения, обусловленные разностью коэффициентов линейного расширения материалов налива (заготовки) и абразивного зерна. На эти напряжения значительное влияние оказывает локальная температура в зоне

Таблица 1. Результаты расчета температур для процесса шлифования заготовок из стали 3Х3М3Ф
Table 1. The results of calculation of temperatures for the process of grinding of 3H3M3F steel workpieces

Амплитуда УЗК A_y , мкм	Средняя температура заготовки T_1 , К		Температура T_2 , К	Температура T_2' , К	Температура $T_{2п}$, К
	на глубине 2 мкм	на глубине 50 мкм			
0	1466	1276	3472	3032	1830
3	1158	1081	2120	1817	1585

Таблица 2. Коэффициент засаливания K_3 режущих и пластически деформирующих абразивных зерен из электрокорунда нормального при диспергировании заготовок из стали 3Х3М3Ф
Table 2. Glazing coefficient K_3 of cutting and plastic deforming abrasive grains of fused aluminum oxide when grinding 3H3M3F steel workpieces

Амплитуда УЗК A_y , мкм	Вид диспергирования материала заготовки	Средняя локальная температура на площадке контакта зерна с заготовкой T_2 , К	Коэффициент засаливания K_3 , %
0	Пластическое деформирование	1830	39,4
	Микрорезание	3472	78,7
3	Пластическое деформирование	1585	32,8
	Микрорезание	2120	45,7

контакта зерна с образцом (заготовкой), поскольку образование налипа происходит именно при этой температуре.

Локальная температура в зоне контакта с образцом режущих зерен (глубина внедрения $a_z=6$ мкм) на 70–80 % выше, чем в зоне контакта зерен, производящих пластическое деформирование ($a_z=3$ мкм) (таблица 4). Наложение на образец колебаний привело к уменьшению локальных температур в среднем на 14 %, поэтому сжимающие напряжения в зоне контакта налипа с абразивным зерном, рассчитанные по аналитической зависимости, при использовании УЗК оказались выше на 90 %.

С увеличением значения этих напряжений вероятность разрушения налипа уменьшается. Следовательно, снижение коэффициента засаливания при наложении УЗК на заготовку (образец) происходит главным образом вследствие снижения интенсивности процесса налипания частиц шлифовального шлама на абразивные зерна за счет схватывания.

С целью определения экспериментальных значений коэффициента засаливания K_3 , осуществляли царапание образца единичными абразивными зёрнами. При наложении на образец УЗК коэффициент засаливания снижается на 15...20 %, что объясняется уменьшением локальной температуры.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований, в процессе которых оценивали работоспособность шлифовальных кругов при наложении на заготовку УЗК.

При шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т с наложением на заготовку колебаний коэффициент шлифования $K_{ш}$ увеличивается на 70 и 37 % соответственно за счет снижения интенсивности изнашивания и засаливания рабочей поверхности круга (рис. 2). При обработке заготовок из более труднообрабатываемой стали 12Х18Н10Т (3-я группа обрабатываемости шлифованием) коэффициент шлифования без наложения и с наложением колебаний ниже в 2...2,5 раза, чем при обработке заготовок из стали 3Х3М3Ф.

Использование колебаний позволяет в большей степени повысить коэффициент шлифования заготовок из стали 3Х3М3Ф (на 70 %), относящейся к 1-й группе обрабатываемости. Максимальное увеличение коэффициента $K_{ш}$ зафиксировано при амплитудах колебаний в направлении, совпадающем с осью круга, равных 6 и 9 мкм при обработке заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т соответственно. Период стойкости круга при использовании колебаний увеличивается в 2...3 раза.

Таблица 3. Коэффициент засаливания K_3 режущих абразивных зерен из электрокорунда нормального при шлифовании с различным режимом заготовок из стали 3Х3М3Ф

Table 3. Glazing coefficient K_3 of cutting and plastic deforming abrasive grains of fused aluminum oxide when grinding 3H3M3F steel workpieces under various modes

Глубина шлифования t , мм	Скорость продольной подачи $V_{s_{пр}}$, м/мин	Амплитуда УЗК			
		$A_y=0$ мкм		$A_y=3$ мкм	
		Локальная температура T_2 , К	Коэффициент засаливания K_3 , %	Локальная температура T_2 , К	Коэффициент засаливания K_3 , %
0,01	10	2778	62,4	1696	36,4
0,01	15	3063	69,2	1870	40,6
0,01	20	3767	86	2086	45,7
0,02	10	2875	64,7	1760	37,9
0,03	10	2984	67,3	1825	39,5

Таблица 4. Результаты численного моделирования локальных температур на площадке контакта зерна с образцом в процессе микрорезания и напряжений $\sigma_{нт}$ в налипе

Table 4. The results of numerical simulation of local temperatures in the grain-specimen contact area in the process of micro-cutting and the stresses $\sigma_{нт}$ in the sticking area

Глубина внедрения зерна в материал образца a_z , мкм	Средняя локальная температура, К	Напряжения $\sigma_{нт}$, МПа
3	710 / 610*	380 / 720*
6	1250 / 1075	60 / 115

* В числителе приведены результаты, полученные без наложения на образец колебаний, в знаменателе – с наложением

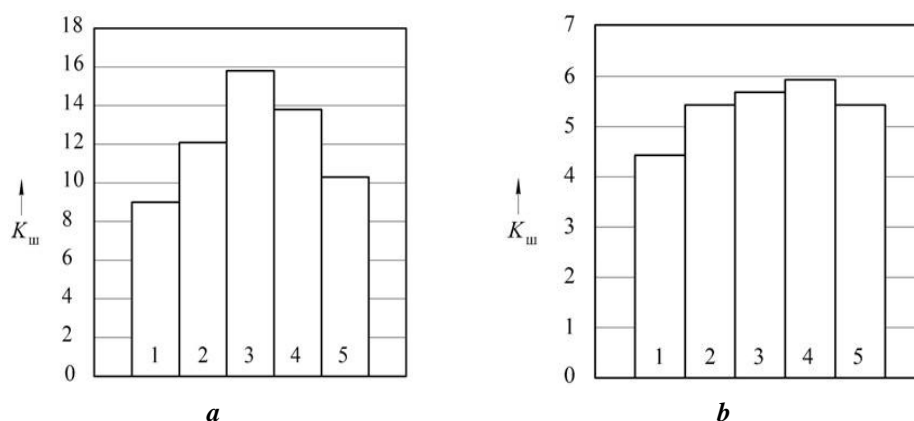


Рис. 2. Влияние амплитуды УЗК на коэффициент шлифования $K_{ш}$:
a – материал заготовки – сталь 3Х3М3Ф; **b** – сталь 12Х18Н10Т.
 1, 2, 3, 4, 5 – амплитуда колебаний $A_z=0, 3, 6, 9, 12$ мкм соответственно
Fig. 2. The influence of UV amplitude on the grinding coefficient $K_{ш}$:
a – workpiece material – 3H3M3F steel; **b** – 12H18N10T steel.
 1, 2, 3, 4, 5 – vibrations amplitude $A_z=0, 3, 6, 9, 12$ μm respectively

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение степеней снижения коэффициента засаливания K_3 при шлифовании с УЗК, полученных расчетным (до 33 %) и экспериментальным путем (до 20 %), показывает возможность использования полученных моделей для расчета коэффициента K_3 .

Выполненные исследования позволяют установить, что при наложении на заготовку УЗК налипание частиц материала заготовки на абразивные зерна снижается за счет уменьшения интенсивности процесса схватывания контактирующих объектов (материалов заготовки и абразивного зерна) вследствие снижения локальной температуры. Увеличение сжимающих напряжений в зоне контакта налива с абразивным зерном при снижении локальной температуры оказывает незначительное влияние на коэффициент засаливания.

Численным моделированием температур и коэффициента K_3 при различных режимах шлифования установлено, что если при шлифовании с применением колебаний увеличить производительность шлифования в 2...3 раза, то локальные температуры и коэффициент K_3 окажутся ниже, чем при шлифовании с меньшей производительностью без УЗК. Однако при оценке возможности увеличения производительности шлифования следует учитывать и другие технологические ограничения, связанные с формированием параметров качества деталей (погрешность размера, параметры микро- и макрогеометрии и др.).

Теоретико-экспериментальные исследования процесса засаливания подтвердились результатами экспериментальных исследований, в процессе которых производили шлифование заготовок из пластичных материалов. При использовании колебаний вследствие уменьшения интенсивностей изнашивания и засаливания рабочей поверхности шлифовального круга существенно увеличиваются коэффициент шлифования и период стойкости круга. Следовательно, наложение УЗК на заготовку в процессе шлифования позволяет повысить производительность обработки

или (и) период стойкости круга при обеспечении заданных параметров качества деталей.

ВЫВОДЫ

1. Использование ультразвуковых колебаний (УЗК) амплитудой 3 мкм приводит к снижению: локальных температур процесса шлифования на 13...40 %; коэффициента засаливания абразивного зерна, полученного расчетным путем, на 33 % для режущего и на 7 % для пластически деформирующего зерна.
2. При увеличении продольной подачи и глубины шлифования коэффициент засаливания при обработке с использованием УЗК увеличивается в меньшей степени, чем без его применения.
3. Наложение УЗК на образец при микрорезании единичным зерном обеспечивает снижение коэффициента засаливания, полученного экспериментальным путем, на 15...20 %.
4. Наложение на заготовку УЗК с помощью приспособления, в котором она является одним из звеньев колебательной системы, обеспечивает увеличение коэффициента шлифования до 70 % и периода стойкости круга в 2...3 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 298 с.
2. Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Василик Н.Я., Ковалева М.Г., Прозорова М.С., Арсеенко М.Ю. Нанесение керамических покрытий с помощью многокамерного газодинамического ускорителя // Сварщик. 2015. № 3. С. 20–24.
3. Евсеев Д.Г., Сальников А.Н. Модели шлифования: теория и эксперимент. М.: Известия, 2018. 311 с.
4. Медведева О.И., Янюшкин С.А. Исследование качества поверхности твердого сплава после комбиниро-

- рованного электроалмазного шлифования // Механика XXI века. 2016. № 15. С. 189–194.
5. Thanedar A., Dongre G.G., Joshi S.S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. Vol. 20. № 1. P. 13–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00037-9>.
 6. Носенко В.А. Влияние контактного взаимодействия на износ абразивного инструмента при шлифовании // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 1. С. 73–77.
 7. Носенко В.А., Фетисов А.В., Носенко С.В. Интенсивность контактного взаимодействия и переноса материалов при шлифовании и микроцарапании тугоплавких металлов // *Научные технологии в машиностроении*. 2017. № 10. С. 9–17. DOI: https://doi.org/10.12737/article_59d496eb7ba532.91441180.
 8. Stachurski W., Sawicki J., Krupanek K., Nadolny K. Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 104. № 5-8. P. 1999–2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03966-x>.
 9. Носенко В.А., Сердюков Н.Д., Шкода О.М., Самарский П.И. Испытание СОЖ на операции плоского врезного шлифования титанового сплава // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020. № 8. С. 40–43.
 10. Казанцев В.Ф., Калачев Ю.Н., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Инструменты для ультразвуковой очистки. М.: Техполиграфцентр, 2017. 181 с.
 11. Справочник технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
 12. Toth M., Sims N.D., Curti D. An analytical study of wheel regeneration in surface grinding // *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 82. P. 214–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.046>.
 13. Коряжкин А.А., Носенко С.В., Носенко В.А. Повышение эффективности обработки рабочих лопаток компрессора из титанового сплава методом многокоординатного глубинного шлифования // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2019. № 1. С. 17–21.
 14. Li D., Tang J., Chen H., Shao W. Study on grinding force model in ultrasonic vibration-assisted grinding of alloy structural steel // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 101. № 5-8. P. 1467–1479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2929-2>.
 15. Унянин А.Н., Сарайнов Н.Е. Моделирование температурного поля при шлифовании кругами из эльбора с наложением ультразвуковых колебаний // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 8-2. С. 112–120.
 16. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. 2-е изд., доп. и испр. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
 17. Yu T., Su H., Dai J., Zhou W. Grinding Force and Specific Grinding Energy in Process of Grinding SiC with Single Grit // *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2018. Vol. 50. № 1. P. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.16356/j.1005-2615.2018.01.017>.
 18. Унянин А.Н. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38. № 3. P. 193–197. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1803022X>.
 19. Бокучава Г.В. Трибология процесса шлифования. Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1984. 238 с.
 20. Унянин А.Н. Исследование температурного поля при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2-2. С. 191–195.

REFERENCES

1. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifovalnykh krugov* [Minimizing brining grinding wheels]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p.
2. Tyurin Yu.N., Kolisnichenko O.V., Vasilik N.Ya., Kovaleva M.G., Prozorova M.S., Arsenko M.Yu. Application of ceramic coatings using multiple-cavity gas-dynamic accelerator. *Svarshchik*, 2015, no. 3, pp. 20–24.
3. Evseev D.G., Salnikov A.N. *Modeli shlifovaniya: teoriya i eksperiment* [Grinding models: theory and experiment]. Moscow, Izvestiya Publ., 2018. 311 p.
4. Medvedeva O.I., Yanyushkin S.A. Studing of quality of the surface carbide after combined electro diamond grinding. *Mekhaniki XXI veku*, 2016, no. 15, pp. 189–194.
5. Thanedar A., Dongre G.G., Joshi S.S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2019, vol. 20, no. 1, pp. 13–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00037-9>.
6. Nosenko V.A. Contact interaction impact upon abrasive tool wear at grinding. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2005, no. 1, pp. 73–77.
7. Nosenko V.A., Fetisov A.V., Nosenko S.V. Contact interaction intensity and material transfer at grinding and refractory metal micro-scratching. *Nauchnye tekhnologii v mashinostroenii*, 2017, no. 10, pp. 9–17. DOI: https://doi.org/10.12737/article_59d496eb7ba532.91441180.
8. Stachurski W., Sawicki J., Krupanek K., Nadolny K. Numerical analysis of coolant flow in the grinding zone. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 104, no. 5-8, pp. 1999–2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03966-x>.
9. Nosenko V.A., Serdyukov N.D., Shkoda O.M., Samarskiy P.I. Coolant test at the process of flat infeed grinding of titanium alloy. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, no. 8, pp. 40–43.
10. Kazantsev V.F., Kalachev Yu.N., Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. *Instrumenty dlya ultrazvukovoy ochistki* [Instruments for Ultrasonic Cleaning]. Moscow, Tekhpolygonpubl., 2017. 181 p.
11. Suslov A.G., ed. *Spravochnik tekhnologa* [The technologist's reference book]. Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie Publ., 2019. 800 p.

12. Toth M., Sims N.D., Curti D. An analytical study of wheel regeneration in surface grinding. *Procedia CIRP*, 2019, vol. 82, pp. 214–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.046>.
13. Koryazhkin A.A., Nosenko S.V., Nosenko V.A. Improving of efficiency of the processing of working compressor blades made of titanium alloy by method of multi-axis creep-feed grinding. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 17–21.
14. Li D., Tang J., Chen H., Shao W. Study on grinding force model in ultrasonic vibration-assisted grinding of alloy structural steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 101, no. 5-8, pp. 1467–1479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2929-2>.
15. Unyanin A.N., Saraynov N.E. The simulation of local temperatures during grinding CBN circles superimposed ultrasonic vibrations. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 8-2, pp. 112–120.
16. Zubchenko A.S., ed. *Marochnik staley i splavov* [Grinding of steels and alloys]. 2nd ed., dop. i ispr. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 784 p.
17. Yu T., Su H., Dai J., Zhou W. Grinding Force and Specific Grinding Energy in Process of Grinding SiC with Single Grit. *Nanjing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao/Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, vol. 50, no. 1, pp. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.16356/j.1005-2615.2018.01.017>.
18. Unyanin A.N. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 3, pp. 193–197. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X1803022X>.
19. Bokuchava G.V. *Tribologiya protsessa shlifovaniya* [Tribology of Grinding]. Tbilisi, Sabchota Sakartvelo Publ., 1984. 238 p.
20. Unyanin A.N. The study of temperature field when grinding with ultrasonic activation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2-2, pp. 191–195.

The enhancement of cutting capacity of a grinding wheel when processing ductile steel blank parts by ultrasonic activation

© 2021

*Aleksandr V. Khazov*¹, chief engineer*Aleksandr N. Unyanin*^{*2,3}, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Technology of Mechanical Engineering”¹*JSC Ulyanovsk Mechanical Plant, Ulyanovsk (Russia)*²*Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)**E-mail: a_un@mail.ru³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

Abstract: The study aimed to identify the relations between the sticking intensity and ultrasonic vibrations (UV) used for processing and evaluate the wheels' performance when grinding ductile materials blank parts. The authors carried out the numerical simulation of local temperatures and the 3H3M3F steel workpiece temperature when grinding by ultrasonic activation. The study determined that the application of ultrasonic vibrations with the amplitude of 3 μm causes the decrease in local temperatures by 13...40 %, and in blank part temperature – up to 20 %. The calculation identified that the activation of ultrasonic vibrations with the amplitude of 3 μm causes the decrease in the glazing coefficient by 33 % for cutting grain and by 7 % for deforming grain. When increasing the longitudinal feed rate or the grinding depth, the glazing coefficient increases to a lesser degree when using the ultrasonic vibration than in the case without ultrasonic activation. The authors carried out the numerical simulation of local temperatures when scratching the 3H3M3F steel specimens by single abrasive grains with ultrasonic activation. The sticking deformation and the stresses resulted from this deformation and affecting the junction points of sticking with grains with and without ultrasonic vibrations application are calculated. The experimental research included the micro-cutting of specimens with single abrasive grains. The experiments identified that the abrasive grains wear out and glaze to a lesser degree when micro-cutting a workpiece with ultrasonic vibrations activation. The lowering of the intensity of sticking of the workpiece material particles to the abrasive grains due to the adhesion causes the decrease in the glazing coefficient when using ultrasonic activation. The study considered the possibility to enhance the efficiency of flat grinding through the use of the energy of ultrasonic vibrations applied to a blank part in the direction with the grinding wheel axis. A workpiece fixed in the device between the vibration transducer and the support is one of the components of a vibration system. The authors performed the experiment when grinding 3H3M3F and 12H18N10T steel workpieces with the wheel face. When grinding with ultrasonic vibrations, the grinding coefficient increases up to 70 %, and the redress life increases twice or thrice.

Keywords: grinding; ultrasonic vibrations; UV; abrasive grain; blank part; sticking; glazing; ductile material; 3H3M3F steel; 12H18N10T steel.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Ulyanovsk Region Government within the scientific project No. 19-48-730002.

For citation: Khazov A.V., Unyanin A.N. The enhancement of cutting capacity of a grinding wheel when processing ductile steel blank parts by ultrasonic activation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 55–62. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-55-62.

Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных МУНТ при постоянном электрическом напряжении

© 2021

Щегольков Александр Викторович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»
Тамбовский государственный технический университет, Тамбов (Россия)

E-mail: Energynano@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4317-0689>

Аннотация: Проведен сравнительный анализ эластомеров – полиуретана (НПК) и кремнийорганического компаунда (НКОК), модифицированных углеродными нанотрубками (МУНТ) с массовым содержанием от 1 до 9 %. МУНТ синтезированы по CVD-технологии с применением катализаторов Co-Mo/Al₂O₃-MgO (МУНТ1) и Fe-Co/2,1Al₂O₃ (МУНТ2). Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что самая низкая удельная объемная электропроводность (5×10^{-10} См \times см⁻¹) характерна для полиуретанового эластомера (1 мас.% МУНТ, синтезированных на катализаторе Fe-Co/2,1Al₂O₃). Для кремнийорганического эластомера, модифицированного 9 мас.% МУНТ1, удельная объемная электропроводность составила 4×10^{-1} См \times см⁻¹. Определены параметры перколяционной модели электропроводности для НПК, НКОК с МУНТ1 и МУНТ2 с учетом коэффициента упаковки МУНТ и критического индекса электропроводности. Наибольшая равномерность температурного поля характерна для кремнийорганического эластомера с 7 мас.% МУНТ2. Неоднородное температурное поле в модифицированных эластомерах, изготовленных на основе полиуретана, может быть вызвано локальной спутанностью МУНТ, выраженной в образовании агломератов, или более плотной упаковкой электропроводящих сетей, которая, в свою очередь, приводит к снижению тепловой мощности. Температура нагрева наномодифицированных композитов, изготовленных из НКОК 1 и НКОК 2, может варьироваться от 32,9 до 102 °С. Исследованы режимы тепловыделений наномодифицированных эластомеров в диапазоне от 6 до 30 В постоянного электрического тока. Проведено сравнение тепловыделений в образцах на основе эластомеров и керамики. Исследование позволило выявить наилучшее сочетание полимерной матрицы и типа МУНТ. Для электронагревателей наиболее рационально применять кремнийорганический компаунд при концентрации МУНТ 7 % и в зависимости от уровня питающего напряжения 12 или 24 В использовать МУНТ1 или МУНТ2.

Ключевые слова: многослойные углеродные нанотрубки; катализатор; кремнийорганический компаунд; полиуретановый компаунд; нагрев; перколяция; модифицирование.

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

Для цитирования: Щегольков А.В. Сравнительный анализ тепловых эффектов в эластомерах, модифицированных МУНТ при постоянном электрическом напряжении // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 63–73. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.

ВВЕДЕНИЕ

Новые технологии создания электропроводящих полимерных композитных материалов основаны на двух различных принципах, при которых электропроводность может быть обеспечена непосредственно полимерными цепочками, которые могут модифицироваться, или внешними дисперсными проводящими структурами [1]. Эти способы не позволяют достигнуть значительной электропроводности таких материалов, как медь, алюминий или серебро, но в то же время с помощью проводящих полимеров можно добиваться разнообразных функциональных свойств, к которым относится зависимое от температуры или внешнего давления электрическое сопротивление.

Несмотря на то, что в качестве материалов с саморегулированием температуры в основном применяют керамические композиты [2–4], для которых разработаны различные технологии изготовления, в том числе и 3D-технология, позволяющая формировать в нагревателе различные типы отверстий [5], существует явная проблема, связанная с механической прочностью

и устойчивостью электрических контактов таких нагревателей.

Полимеры, модифицированные углеродными нанотрубками (УНТ), могут быть использованы в качестве функционального материала нагревателей, обладающих свойствами саморегулирования температуры [6]. При этом большое значение приобретают исследования различных полимерных матриц и дисперсных наноразмерных наполнителей, к которым относятся УНТ [7]. Применение в качестве полимеров эластомеров открывает возможности, связанные с гибкостью, эластичностью и возможностью создания эффективного теплового контакта с различными по геометрии поверхностями [8]. Следует учитывать высокую термическую стабильность (до +200 °С) эластомеров как при высоких, так и при низких температурах, что делает целый ряд эластомеров эффективными материалами для создания нагревательных элементов. Такие материалы в качестве электронагревателей могут быть использованы для борьбы с наледью в авиационной технике – за счет тепловыделений в результате преобразования электрической энергии в тепловую под действием

подводимого электрического напряжения и тока [9; 10]. Дисперсная электропроводящая фаза в таких нагревателях может быть либо на основе смеси УНТ и графена [10], либо с одним графеновым наполнителем [11], либо с применением обработанных УНТ [12], что позволяет улучшить характеристики антиобледенительных систем.

В то же время распространение получили различные типы тепловых вентиляторов, которые обеспечивают подогрев воздушных потоков. Энергетическая эффективность тепловых вентиляторов связана с точностью поддержания температурных режимов нагревателей и возможностью оптимизации геометрических параметров нагревателей [13]. Эластичная полимерная матрица хорошо поддается механической обработке и может эффективно использоваться для подогрева газообразных потоков.

Особую роль в механизмах стабилизированного тепловыделения играют УНТ [14; 15], которые обеспечивают нужные уровни перколяции электропроводящей фазы в полимерной матрице.

В целом ряде научных работ [15–17] были получены противоречивые результаты относительно зависимости порога перколяции от аспектного отношения в УНТ. Согласно анализу исключенного объема [15], порог перколяции суспензии с углеродными структурами должен уменьшаться с увеличением соотношения сторон в углеродных структурах. Из результатов, представленных в работе [16], следует, что уменьшение порога перколяции связано с увеличением длины УНТ, в то время как в [17] показан возрастающий порог перколяции, связанный с увеличением длины УНТ.

В работе [18] проведены теоретические исследования и показано, что самая высокая электрическая проводимость может быть реализована в том случае, когда УНТ частично, а не идеально или случайно выровнены. Исследования показывают, что агломерация УНТ усиливает электрическую проводимость для более низких фракций УНТ, в то время как эффект менее выражен для более высоких фракций. Это согласуется с существующими экспериментальными данными [19].

Электрофизические свойства наномодифицированных полимерных матриц связаны напрямую с морфологическими особенностями как полимерных матриц, так и углеродных наноструктур, что в конечном счете оказывает влияние на процесс тепловыделения в условиях протекания электрического тока. В ряде случаев большое влияние на формирование электропроводности могут оказывать морфологические свойства не только отдельных многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ), но и агломератов, образованных пучками МУНТ [18].

Исследование и анализ равномерности тепловыделений на поверхности наномодифицированных эластомеров может использоваться как косвенный фактор оценки гомогенности распределения МУНТ. Это следует из того, что качественная картина температурного поля может быть связана с распределением электрического поля. Формирование электрического поля определяется электропроводящими частицами МУНТ в полимерной матрице [20].

Для понимания механизма распределения МУНТ в полимерной матрице и его влияния на процесс тепловыделения необходимы исследования с различными типами эластомеров для введения МУНТ, обладающих

разными морфологическими характеристиками и концентрациями, позволяющими оценить порог перколяции [21; 22].

Цель работы – исследование влияния морфологии МУНТ с различной концентрацией на объемную удельную электропроводность и тепловыделения наномодифицированных эластомеров.

Задачами исследования являются:

1) разработка методики изготовления и получения электропроводящих наномодифицированных эластомеров на основе кремнийорганической и полиуретановой эластомерных матриц и МУНТ, синтезированных по CVD-технологии с применением Co-Mo/Al₂O₃-MgO и Fe-Co/2,1Al₂O₃ катализаторов;

2) изучение влияния различных концентраций МУНТ в двух различных типах эластомеров на значение удельного поверхностного электрического сопротивления, значения питающего напряжения, а также на тепловыделения при работе на постоянном электрическом токе.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве полимерной матрицы использовали два типа эластомера: полиуретановый компаунд «Силагерм 6030» и кремнийорганический компаунд «Силагерм 8030» (ООО «ЭЛЕМЕНТ 14», Москва, Россия). Для модифицирования двух типов эластомеров были использованы МУНТ, синтезированные по CVD-технологии с каталитическими системами Co-Mo/Al₂O₃-MgO (МУНТ1) и Fe-Co/2,1Al₂O₃ (МУНТ2). Морфологию МУНТ исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), микроскоп Hitachi H-800 (Hitachi, Япония).

С целью снижения доли микроразмерных агломератов, входящих в состав порошка МУНТ, проводили механическую обработку на установке с лопастной мешалкой WF-20B (Китай). Механическая обработка порошков МУНТ1 и МУНТ2 происходила при частоте вращения ротора 25000 об/мин с дискретизацией по времени в течение 10 мин с 5-минутными перерывами после каждых 2 мин обработки. Для удаления влаги МУНТ помещали в вакуумный термошкаф «ВТШ-К52-250» при 120 °С на 1 ч.

Компонент (А) – кремнийорганический компаунд (силикон) или полиуретан и наполнитель МУНТ (МУНТ1 или МУНТ2) смешивали на верхнеприводной механической мешалке WiseStir HT 120DX (Корея) при 200 об/мин в течение 20 мин.

Далее в смесь вводили второй компонент, обеспечивающий полимеризацию (компонент В), с последующим перемешиванием в течение 10 мин при температуре 22 °С. Затем полученные образцы помещали в вакуумный шкаф и после этого формовали в виде плоских пластин по технологии, показанной на рис. 1. Внешний вид нагревательного элемента приведен на рис. 2.

Эластомеры, модифицированные МУНТ, получили собственные обозначения (таблица 1).

Методика определения объемной электропроводности

Измерение удельной объемной электропроводности проводили по методике ГОСТ Р 50499-93 (МЭК 93-80). В качестве измерительного прибора использовали

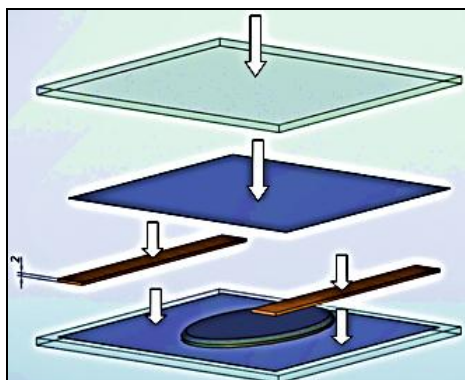


Рис. 1. Схема формования образцов нагревателей
Fig. 1. The diagram of formation of heater samples

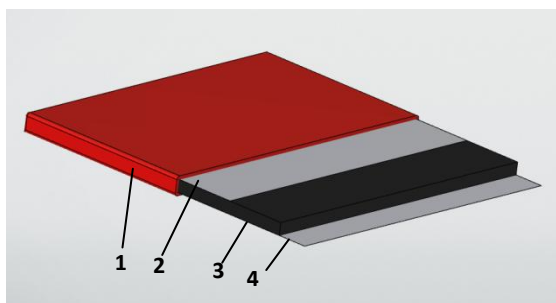


Рис. 2. Внешний вид нагревательного элемента:
1 – электроизоляционный слой; 2 – верхний электрод; 3 – эластомер с МУНТ; 4 – нижний электрод
Fig. 2. Physical form of a heating component:
1 – electrically insulating layer; 2 – upper electrode; 3 – elastomer with MCNT; 4 – bottom electrode

Таблица 1. Обозначение композитов на основе эластомеров, модифицированных МУНТ
Table 1. The marking of elastomer-based composites modified with MCNT

Тип катализатора МУНТ	Массовое содержание МУНТ в композите, %	Обозначение эластомера на основе полиуретана	Обозначение эластомера на основе кремнийорганического компаунда
МУНТ1 Co-Mo/Al ₂ O ₃ -MgO	1	НПК 1.1	НКОК 1.1
	3	НПК 1.3	НКОК 1.3
	5	НПК 1.5	НКОК 1.5
	7	НПК 1.7	НКОК 1.7
	9	НПК 1.9	НКОК 1.9
МУНТ2 Fe-Co/2,1Al ₂ O ₃	1	НПК 2.1	НКОК 2.1
	3	НПК 2.3	НКОК 2.3
	5	НПК 2.5	НКОК 2.5
	7	НПК 2.7	НКОК 2.7
	9	НПК 2.9	НКОК 2.9

«Тераомметр Е6-3» с диапазоном измерения электрического сопротивления от 10 кОм до 10 ГОм. Метод измерения основан на двухпроводной схеме измерения на постоянном токе. Для других диапазонов измерения использовали мультиметр UNIT 61E (Китай).

Систематическая погрешность измерения сопротивлений тераомметра Е6-3, выраженная в % от максимального значения шкалы, составила:

- до 1 ГОм – не более $\pm 1,5\%$ (1 ГОм);
- на пределе 10 ГОм – не более $\pm 2,5\%$ (до 10 ГОм);
- до 1 ТОм – не более $\pm 10\%$;
- на пределе 10 ТОм – не более $\pm 20\%$.

Методика исследования температурного поля на поверхности образцов нагревателей

Исследование распределения температурного поля проводилось с помощью бесконтактного метода измерения с применением тепловизора Testo-875-1 с объективом $32 \times 23^\circ$ (Германия). Температура предварительно измерялась двухканальным термометром Testo 992, определялась температура поверхности и на основании полученных данных производилось сравнение с температурой, фиксируемой тепловизором, после чего подбирался коэффициент излучения, используемый при дальнейших измерениях. Полученные термограммы обрабатывались в программе IRsoft 4.6.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты СЭМ и ПЭМ для образцов МУНТ (МУНТ1 и МУНТ2) представлены на рис. 3 и рис. 4.

МУНТ, синтезированные на различных катализаторах, отличаются друг от друга морфологией как локальных образований массивов МУНТ (рис. 3 а и 3 б), так и отдельных МУНТ, что следует из данных, представленных на рис. 4 а и 4 б. Морфология МУНТ на рис. 3 а и 3 б (разрешение $2,0 \mu\text{m}$) представляет собой спутанные МУНТ в виде отдельных пучков, при этом

данное образование характерно и для макроуровня. В случае МУНТ2 (рис. 3 б) неоднородное распределение пучков выражено в менее плотной упаковке отдельных нанотрубок, поэтому видно острые выступы массивов МУНТ, в то время как МУНТ1 (рис. 3 а) характеризуется более плотным и развитым переплетением. Следует учитывать, что в обоих случаях наблюдаются нитевидные образования, состоящие из нескольких графеновых слоев длиной около $2 \mu\text{m}$ и более, которые объединены в пучки или жгуты (рис. 4 а и 4 б). Характер сплетения пучков разный: МУНТ1 – более плотное сплетение с отдельно выступающими МУНТ; МУНТ2 – пучки плотно собраны и состоят из нескольких МУНТ, имеющих больший диаметр, чем МУНТ1.

Особенности переплетения в пучках МУНТ1 и МУНТ2 повлияли на электропроводность эластомеров НПК и НККОК (рис. 5). В ходе проведенных исследований установлено, что образцы эластомеров НККОК 1 имеют более высокую электропроводность в сравнении с НККОК 2, в частности, для НККОК 1.5 и НККОК 1.7 электропроводность составляет $0,1$ и $1,8 \text{ См} \times \text{см}^{-1}$ соответственно, что выше в сравнении с образцами эластомеров НККОК 2.5 и НККОК 2.7 – $0,04$ и $0,08 \text{ См} \times \text{см}^{-1}$ соответственно.

Низкой удельной объемной электропроводностью обладали эластомеры на основе полиуретана НПК, модифицированные МУНТ1, полученные на катализаторе $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, при этом максимальное значение электропроводности демонстрировал образец НПК 1.7 – $7,14 \times 10^{-8} \text{ См} \times \text{см}^{-1}$. Значения электропроводности НПК 2.3 и НПК 2.5 при повышении концентрации МУНТ2 в кремнийорганическом компаунде с 3 до 5 мас.% приводили к увеличению электропроводности с $0,5 \times 10^{-2}$ до $0,04 \times 10^{-1} \text{ См} \times \text{см}^{-1}$. Для образца НПК 1.9 электропроводность составляет $4 \times 10^{-6} \text{ См} \times \text{см}^{-1}$. Электропроводность образца НПК 2.7 соответствует значению $10 \times 10^{-5} \text{ См} \times \text{см}^{-1}$. При этом наибольшая электропроводность характерна для образца НПК 2.9, который имел значение $0,04 \times 10^{-1} \text{ См} \times \text{см}^{-1}$.

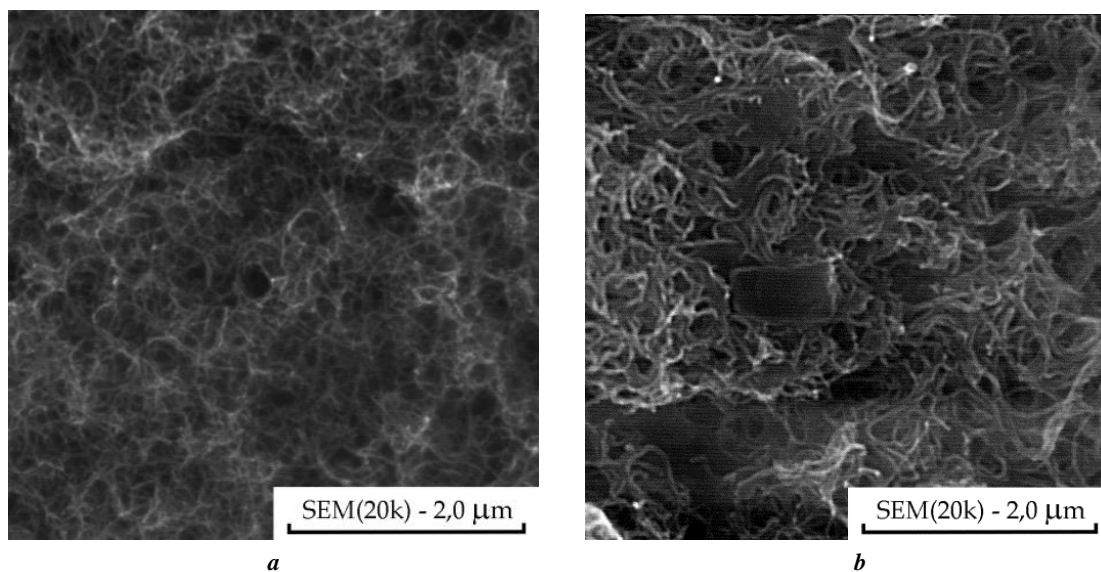


Рис. 3. СЭМ изображения МУНТ: а – МУНТ1; б – МУНТ2
Fig. 3. SEM images of MCNT: a – MCNT1; b – MCNT2

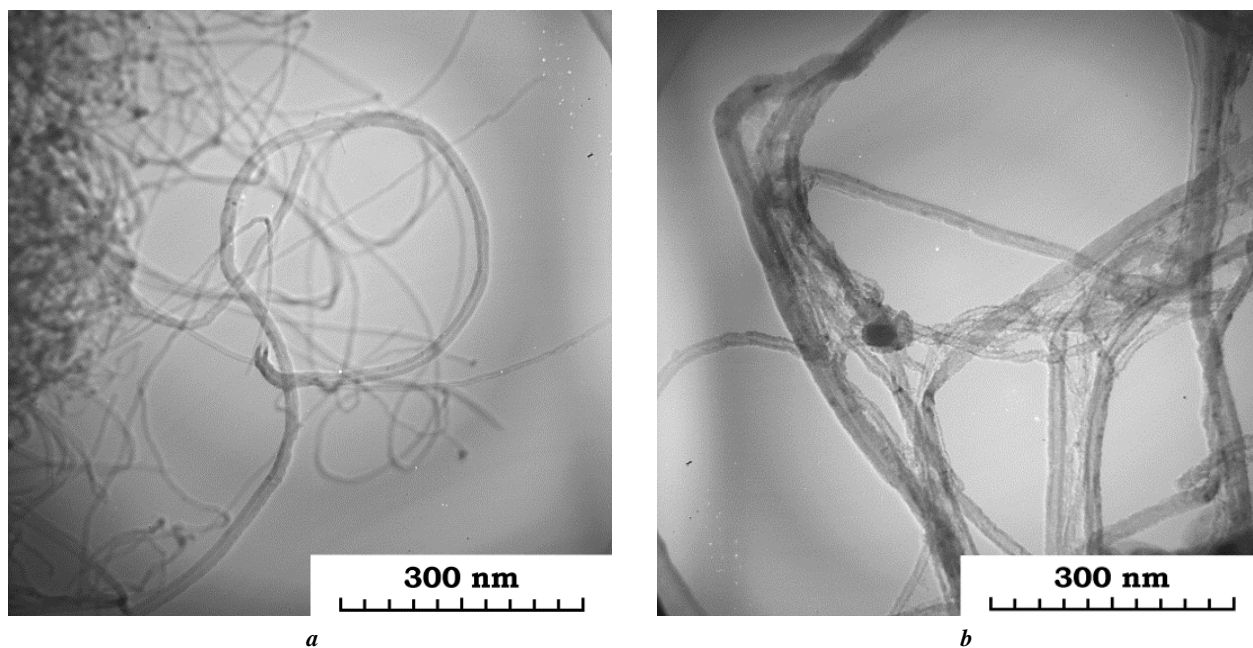


Рис. 4. ПЭМ изображения МУНТ: а – МУНТ1; б – МУНТ2
 Fig. 4. TEM images of MCNT: a – MCNT1; b – MCNT2

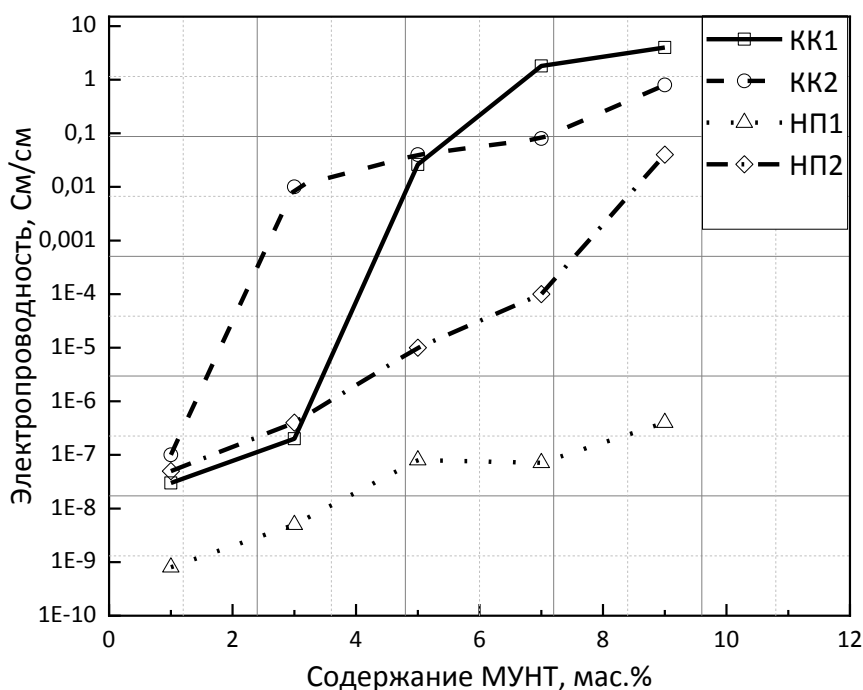


Рис. 5. Удельная объемная электропроводность эластомеров
 Fig. 5. Specific bulk electrical conductivity of elastomers

Сравнительный анализ результатов измерения удельной объемной электропроводности можно провести на основании уравнения перколяции, предложенного в работе [23]:

$$\sigma = \sigma_c + (\sigma_m - \sigma_c) \left(\frac{\varphi - \varphi_c}{F - \varphi_c} \right)^t,$$

где σ – удельная объемная электропроводность наномодифицированного эластомера, См/см;
 σ_m – удельная объемная электропроводность эластомера при максимальном массовом содержании МУНТ, См/см;
 σ_c – удельная объемная электропроводность композита на пороге перколяции, См/см;
 φ – объемная доля МУНТ;

φ_c – объемная доля МУНТ на пороге перколяции;
 F – коэффициент упаковки МУНТ;
 t – критический показатель электропроводности.
 Коэффициент упаковки МУНТ

$$F = \frac{m}{V\rho},$$

где m – масса, кг;
 V – объем, м³;
 ρ – плотность МУНТ, кг/м³.

В таблице 2 приведены параметры, полученные на основе уравнения перколяции.

На рис. 6 представлены термограммы нагревателей на основе НКОК, модифицированных МУНТ1 и МУНТ2 с различными концентрациями от 1 до 7%. Температуры нагрева наномодифицированных эластомеров, изготовленных из НКОК 1 и НКОК 2, может варьироваться от 32,9 (рис. 6 е) до 102 °С (рис. 6 с).

Максимальная температура нагрева для образцов, изготовленных из НПК 1 и НПК 2, составила 100 °С (рис. 6 с, рис. 6 f), а минимальная – 32,9 °С при напряжении 15 В. Наиболее равномерное температурное поле характерно для образца эластомера НПК 1.5 (рис. 6 b), наименьшее значение температурного поля для образца НПК 2.3 (рис. 6 d). В случае остальных образцов выявлены локальные области с незначительным превышением температуры относительно среднего значения по площади, причем эти области могут наблюдаться в центральной части образца (рис. 6 b и 6 е), на краях образца (рис. 6 с и 6 f) и в произвольных частях образца (рис. 6 а и 6 d). Это можно объяснить неравномерным распределением МУНТ в матрице эластомера или некоторым разбросом характеристик самих МУНТ в объеме.

Таблица 2. Параметры, характеризующие электропроводность наномодифицированных эластомеров
Table 2. Parameters characterizing electrical conductivity of nanomodified elastomers

Композит	σ_c	σ_m	φ_c	F	t
НКОК1 (КК1)	$2,63 \cdot 10^{-2}$	4,0	0,58	0,3	2,0
НКОК2 (КК2)	$1 \cdot 10^{-2}$	0,8	0,47	0,3	1,5
НПК1 (НП1)	$4 \cdot 10^{-7}$	–	–	0,5	3,0
НПК2 (НП2)	$4 \cdot 10^{-2}$	–	–	0,2	0,5

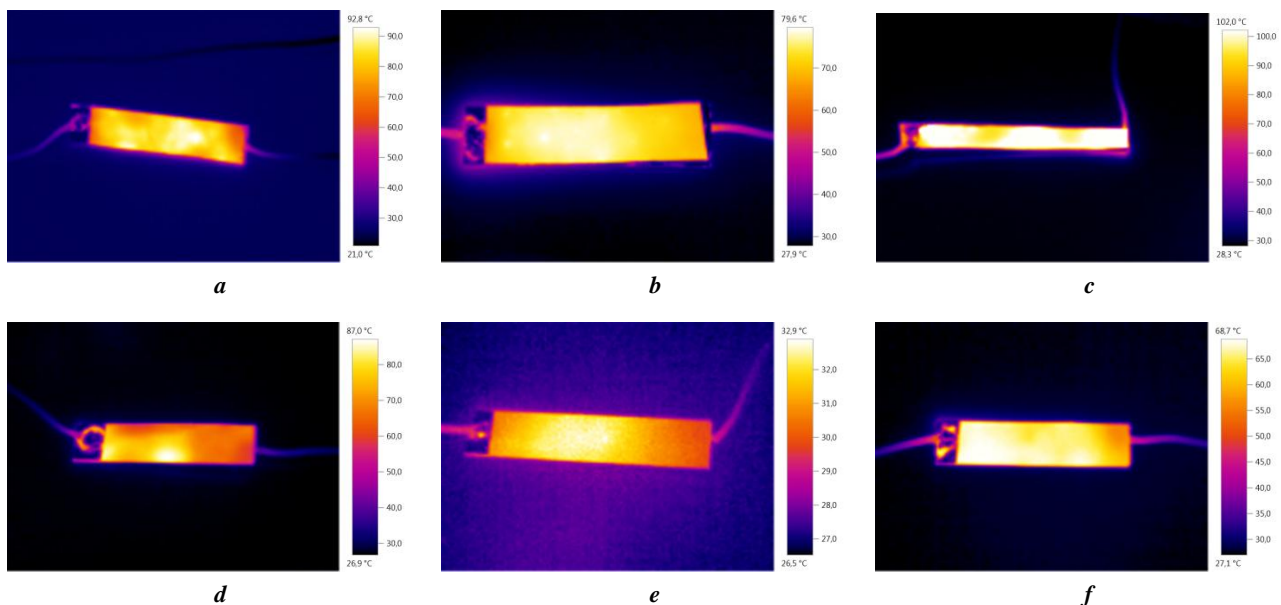


Рис. 6. Термограммы нагревателей на основе НКОК:
a – НКОК 1.3 (12 В); **b** – НКОК 1.5 (9 В); **c** – НКОК 1.7 (6 В);
d – НКОК 2.3 (24 В); **e** – НКОК 2.5 (15 В); **f** – НКОК 2.7 (10 В)

Fig. 6. Heat patterns of NCOC-based heaters:
a – NCOC 1.3 (12 V); **b** – NCOC 1.5 (9 V); **c** – NCOC 1.7 (6 V);
d – NCOC 2.3 (24 V); **e** – NCOC 2.5 (15 V); **f** – NCOC 2.7 (10 V)

На рис. 7 представлены термограммы нагревателей на основе НПК, модифицированных МУНТ1 и МУНТ2 с различными концентрациями от 1 до 7 %.

Для образцов на основе полиуретановой матрицы характерна явно выраженная неравномерность распределения температурного поля. В случае НПК 1.5 (рис. 7 б) при напряжении 9 В наблюдается тепловыделение с локацией в виде окружности с диаметром 5 мм на фоне краевого тепловыделения. НПК 1.3 (рис. 7 а) и НПК 1.5 (рис. 7 б) обладают различной тепловой мощностью с краевым тепловыделением, НПК 2.7 (рис. 7 г) и НПК 1.7 (рис. 7 с) выделяют тепло в центральной части образца. Наиболее равномерное распределение температурного поля, при сопоставимом уровне рабочего напряжения, у НПК 2.5 (рис. 7 е) и НПК 2.7 (рис. 7 ф) с незначительной неоднородностью в левой (рис. 7 е) и правой (рис. 7 ф) части образца. Для образца НПК 2.3 (рис. 7 д) характерна работа при наибольшем питающем напряжении 30 В, при котором наблюдается неравномерное краевое тепловыделение. Причиной неравномерности тепловыделений является технология механического перемешивания МУНТ, при которой морфологические особенности сказываются на распределении МУНТ в НПК с формированием неравномерной электропроводящей сети.

Из сравнительного анализа термограмм (рис. 6 и 7) следует, что для нагревателей, изготовленных на основе НККОК 1 и НККОК 2 с различной концентрацией МУНТ1 и МУНТ2, температурное поле более равномерно (рис. 6), чем для нагревателей, изготовленных из НПК 1 и НПК 2 (рис. 7). Например, нагреватели на основе НПК 1.3 и НПК 1.5 демонстрируют локальный перегрев на краю пластины.

Следует отметить, что для всех нагревателей изменение концентрации МУНТ влияло на значение верхне-

го порога питающего напряжения. Увеличение концентрации МУНТ в эластомере приводило к увеличению температуры при более низких значениях питающего напряжения (до 24 В – кремнийорганический эластомер и 30 В – полиуретановый). Нагреватели с НККОК 1 и НПК 1 работают на меньших уровнях напряжения по сравнению с НПК 2 и НККОК 2. В первую очередь это связано с тем, что МУНТ1 имеет большую насыпную плотность, чем МУНТ2. Следовательно, модификация НККОК и НПК МУНТ1 способствует образованию более плотной электропроводящей сети в НККОК 1 и НПК 1, чем модификация НККОК и НПК МУНТ2.

Все образцы НККОК демонстрировали эффект стабилизированного тепловыделения, а у образцов НПК данный эффект был замечен у образца НПК 2.5, работающего под напряжением 12 В постоянного электрического тока.

Увеличение концентрации МУНТ1 приводит к росту удельной электропроводности и позволяет формировать электропроводящую сеть такой структуры, которая способствует тепловыделениям с увеличенной температурой на более низком значении питающего напряжения.

Проведенные исследования позволили выявить наилучшее сочетание полимерной матрицы и типа МУНТ. Для электронагревателей наиболее рационально использовать кремнийорганический компаунд при концентрации 7 % и в зависимости от уровня питающего напряжения 12 или 24 В применять в качестве модификатора МУНТ1 или МУНТ2.

На рис. 8 а показана термограмма нагревателей, изготовленных методом робокастинга [5] из нитраттетрагидрата марганца, гексагидрата нитрата лантана и титаната бария спеканием, имеющих различную форму ячеек. На рис. 8 б представлен образец нагревательного

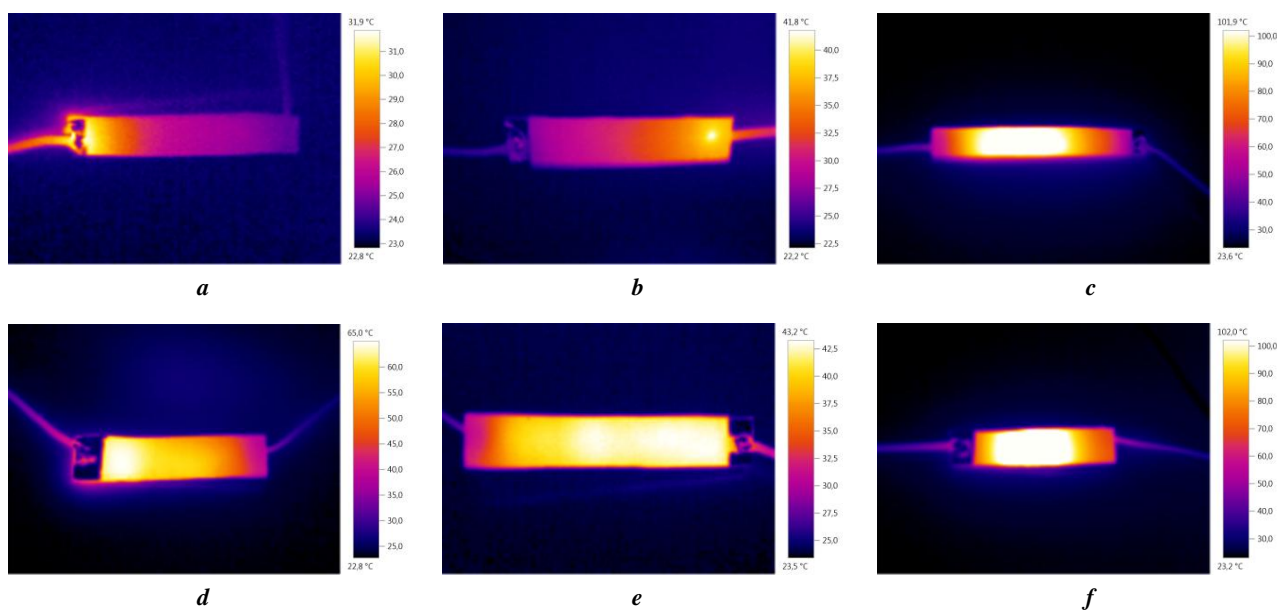


Рис. 7. Термограммы нагревателей на основе НПК:
а – НПК 1.3 (14 В); б – НПК 1.5 (9 В); в – НПК 1.7 (6 В);
д – НПК 2.3 (30 В); е – НПК 2.5 (12 В); ф – НПК 2.7 (10 В)

Fig. 7. Heat patterns of NPC-based heaters:
а – NPC 1.3 (14 V); б – NPC 1.5 (9 V); в – NPC 1.7 (6 V);
д – NPC 2.3 (30 V); е – NPC 2.5 (12 V); ф – NPC 2.7 (10 V)

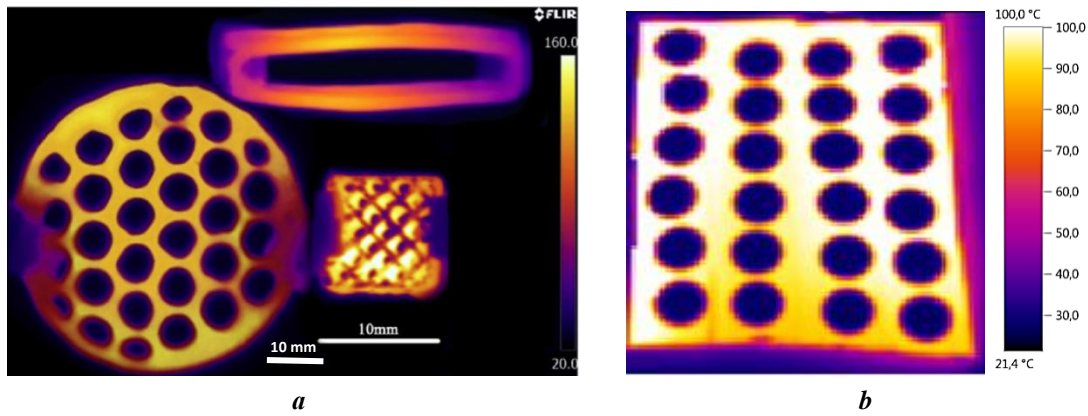


Рис. 8. Термограммы нагревателей:
a – изготовленных методом робокастинга [5];
b – на основе наномодифицированного эластомера НККОК 1.7
Fig. 8. Heat patterns of heaters:
a – produced by the robocasting method [5];
b – based on NCOC 1.7 nanomodified elastomer

элемента, изготовленного из композита НККОК 1.7 со сквозными отверстиями, схожими с отверстиями в образце нагревателя, представленного на рис. 8 а, работающего под напряжением 12 В постоянного электрического тока. Образец нагревателя (рис. 8 б) имеет равномерное распределение температурного поля на всей поверхности. Нагрев прекращается при температуре, равной 100 °С, и эта температура поддерживается при напряжении 12 В, что свидетельствует о процессе саморегулирования температуры.

На рис. 9 представлено температурное поле изогнутого образца нагревателя на основе НККОК 1.7.

Применение гибкого нагревателя позволяет создавать эффективные системы электронагрева для сложных

с геометрической точки зрения поверхностей и с наилучшим тепловым контактом, к которым относятся элементы авиационной и автотранспортной техники.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования эластомеров, модифицированных МУНТ, синтезированных на различных катализаторах, показали, что самая высокая электропроводность наблюдалась у композита, изготовленного на основе кремний-органического эластомера, модифицированного 9 мас.% МУНТ, синтезированного на Co-Mo/Al₂O₃-MgO катализаторе. Низкую электропроводность (6×10^{-10} См×см⁻¹) продемонстрировал эластомер, изготовленный из полиуретана,

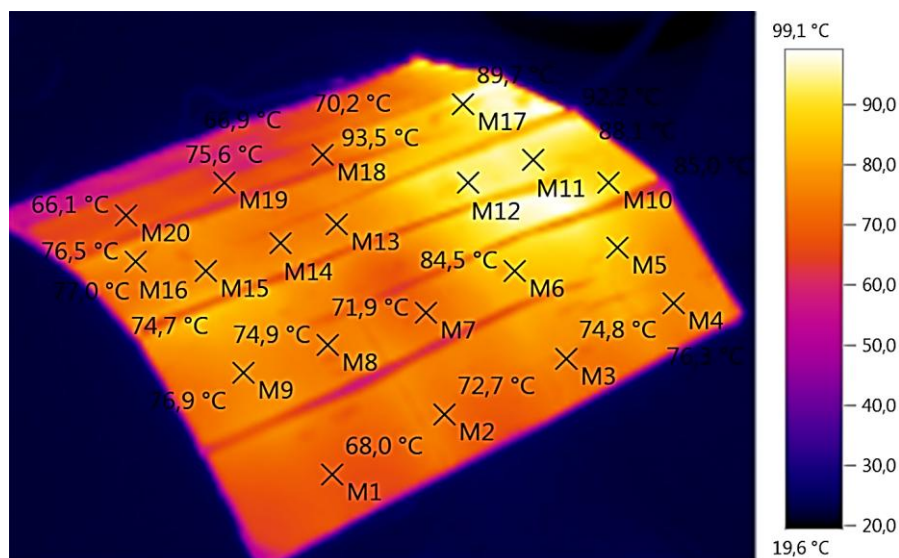


Рис. 9. Термограмма гибкого нагревателя на основе наномодифицированного эластомера
Fig. 9. Heat pattern of a flexible heater based on a nanomodified elastomer

модифицированного 1 мас.% МУНТ, синтезированного по технологии CVD на Fe-Co/ $_{2,1}$ Al $_2$ O $_3$ катализаторе.

Исследовано распределение температурного поля в эластомерах с концентрацией МУНТ от 1 до 7 % при постоянном электрическом токе в диапазоне от 6 до 30 В. Максимальная температура нагрева для кремнийорганических эластомеров с МУНТ на основе Co-Mo/Al $_2$ O $_3$ -MgO и Fe-Co/ $_{2,1}$ Al $_2$ O $_3$ составила 102 и 87 °С при 14 и 30 В соответственно. Максимальная температура нагрева эластомеров на основе полиуретана с МУНТ на основе Co-Mo/Al $_2$ O $_3$ -MgO и Fe-Co/ $_{2,1}$ Al $_2$ O $_3$ составляла 100 °С при 8 и 10 В.

Для всех образцов модифицированных эластомеров температура прекращает расти спустя некоторое время и стабилизируется на некотором постоянном значении (эффект саморегулирования), которое зависит от значения электрического напряжения, типа матрицы и МУНТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nizamuddin S., Maryam S., Baloch H.A., Siddiqui M.T.H., Takkalkar P., Mubarak N.M., Jatoi A.S., Abbasi S.A., Griffin G.J., Qureshi K., Kao N. Electrical Properties of Sustainable Nano-Composites Containing Nano-Fillers: Dielectric Properties and Electrical Conductivity // Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites. 2019. P. 899–914. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05399-4_30.
- Mächler D., Schmidt R., Töpfer J. Synthesis, doping and electrical bulk response of (Bi 1/2 Na 1/2) x Ba 1-x TiO 3 + CaO – based ceramics with positive temperature coefficient of resistivity (PTCR) // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 762. P. 209–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.049>.
- Paunović V., Mitić V., Pavlović V., Miljković M., Živković L. Microstructure evolution and phase transition in La/Mn doped barium titanate ceramics // Processing and Application of Ceramics. 2010. Vol. 4. № 4. P. 253–258. DOI: <https://doi.org/10.2298/PAC1004253P>.
- Petrović M.M.V., Bobić J.D., Grigalaitis R., Stojanović B.D., Banys J. La-doped and La/Mn-co-doped barium titanate ceramics // Acta Physica Polonica A. 2013. Vol. 124. № 1. P. 155–160. DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.124.155>.
- Rowlands W., Vaidhyanathan B. Additive manufacturing of barium titanate based ceramic heaters with positive temperature coefficient of resistance (PTCR) // Journal of the European Ceramic Society. 2019. Vol. 39. № 12. P. 3475–3483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.024>.
- Ali, I., AlGarni T.S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S.-H., Galunin E., Komarov F., Borovskikh P., Imanova G.T. Temperature self-regulating flat electric heaters based on MWCNTs-modified polymers // Polymer Bulletin. 2021. Article in press. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03483-y>.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.016>.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16250>.
- Cheng Y., Zhang H., Wang R., Wang X., Zhai H., Wang T., Jin Q., Sun J. Highly Stretchable and Conductive Copper Nanowire Based Fibers with Hierarchical Structure for Wearable Heaters // ACS Applied Materials and Interfaces. 2016. Vol. 8. № 48. P. 32925–32933. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b09293>.
- Vertuccio L., Foglia F., Pantani R., Romero-Sánchez M.D., Calderón B., Guadagno L. Carbon nanotubes and expanded graphite based bulk nanocomposites for de-icing applications // Composites Part B: Engineering. 2021. Vol. 207. Article number 108583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108583>.
- Vertuccio L., De Santis F., Pantani R., Lafdi K., Guadagno L. Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 162. P. 600–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.045>.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.039>.
- Redondo O., Prolongo S.G., Campo M., Sbarufatti C., Giglio M. Anti-icing and de-icing coatings based Joule's heating of graphene nanoplatelets // Composites Science and Technology. 2018. Vol. 164. P. 65–73.
- Jain S.K., Tadesse Y. Fabrication of polylactide/carbon nanopowder filament using melt extrusion and filament characterization for 3D printing // International Journal of Nanoscience. 2018. Vol. 18. № 5. Article number 1850026.
- Baloch K.H., Voskanian N., Bronsgeest M., Cumings J. Remote Joule heating by a carbon nanotube // Nature Nanotechnology. 2012. Vol. 7. № 5. P. 316–319. DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.39>.
- Celzard A., McRae E., Deleuze C., Dufort M., Furdin G., Mareche J.F. Critical concentration in percolating systems containing a high-aspect-ratio filler // Physical Review B – Condensed matter and materials physics. 1996. Vol. 53. № 10. P. 6209–6214. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.6209>.
- Bai J.B., Allaoui A. Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites – experimental investigation // Composites Part A – Applied science and manufacturing. 2003. Vol. 34. № 8. P. 689–694. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00140-4).
- Martin C.A., Sandler J.K.W., Shaffer M.S.P., Schwarz M.-K., Bauhofer W., Schulte K., Windle A.H. Formation of percolating networks in multi-wall carbon-nanotube-epoxy composites // Composites Science and Technology. 2004. Vol. 64. № 15. P. 2309–2316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.01.025>.
- Bao W.S., Meguid S.A., Zhu Z.H., Pan Y., Weng G.J. A novel approach to predict the electrical conductivity of multifunctional nanocomposites // Mechanics of Materials. 2012. Vol. 46. P. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.12.006>.
- Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д. Применение эластомеров, моди-

- фицированных углеродными нанотрубками при создании саморегулируемых электронагревателей и материалов для защиты от электромагнитного излучения // Российский химический журнал. 2020. Т. 64. № 4. С. 39–45.
21. Aguilar J.O., Bautista-Quijano J.R., Avilés F. Influence of carbon nanotube clustering on the electrical conductivity of polymer composite films // *Express Polymer Letters*. 2010. Vol. 4. № 5. P. 292–299. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2010.37>.
 22. Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф., Парфимович И.Д., Мильчанин О.В., Щегольков А.В., Хробак А.В., Семенкова А.В. Влияние углеродных нанотрубок на электропроводность реактопластов и эластомеров // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 3. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-3-65-72>.
 23. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders // *European Polymer Journal*. 2002. Vol. 38. № 9. P. 1887–1897. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0014-3057\(02\)00064-2](https://doi.org/10.1016/s0014-3057(02)00064-2).
- ### REFERENCES
1. Nizamuddin S., Maryam S., Baloch H.A., Siddiqui M.T.H., Takkalkar P., Mubarak N.M., Jatoi A.S., Abbasi S.A., Griffin G.J., Qureshi K., Kao N. Electrical Properties of Sustainable Nano-Composites Containing Nano-Fillers: Dielectric Properties and Electrical Conductivity. *Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites*, 2019, pp. 899–914. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05399-4_30.
 2. Mächler D., Schmidt R., Töpfer J. Synthesis, doping and electrical bulk response of $(\text{Bi } 1/2 \text{ Na } 1/2) \times \text{Ba } 1-x \text{ TiO}_3 + \text{CaO}$ – based ceramics with positive temperature coefficient of resistivity (PTCR). *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 762, pp. 209–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.049>.
 3. Paunović V., Mitić V., Pavlović V., Miljković M., Živković L. Microstructure evolution and phase transition in La/Mn doped barium titanate ceramics. *Processing and Application of Ceramics*, 2010, vol. 4, no. 4, pp. 253–258. DOI: <https://doi.org/10.2298/PAC1004253P>.
 4. Petrović M.M.V., Bobić J.D., Grigalaitis R., Stojanović B.D., Banyš J. La-doped and La/Mn-co-doped barium titanate ceramics. *Acta Physica Polonica A*, 2013, vol. 124, no. 1, pp. 155–160. DOI: <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.124.155>.
 5. Rowlands W., Vaidhyanathan B. Additive manufacturing of barium titanate based ceramic heaters with positive temperature coefficient of resistance (PTCR). *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, vol. 39, no. 12, pp. 3475–3483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.024>.
 6. Ali, I., AlGarni T.S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S.-H., Galunin E., Komarov F., Borovskikh P., Imanova G.T. Temperature self-regulating flat electric heaters based on MWCNTs-modified polymers. *Polymer Bulletin*, 2021, article in press. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03483-y>.
 7. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.09.016>.
 8. 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. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16250>.
 9. Cheng Y., Zhang H., Wang R., Wang X., Zhai H., Wang T., Jin Q., Sun J. Highly Stretchable and Conductive Copper Nanowire Based Fibers with Hierarchical Structure for Wearable Heaters. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2016, vol. 8, no. 48, pp. 32925–32933. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b09293>.
 10. Vertuccio L., Foglia F., Pantani R., Romero-Sánchez M.D., Calderón B., Guadagno L. Carbon nanotubes and expanded graphite based bulk nanocomposites for de-icing applications. *Composites Part B: Engineering*, 2021, vol. 207, article number 108583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108583>.
 11. Vertuccio L., De Santis F., Pantani R., Lafdi K., Guadagno L. Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 162, pp. 600–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.045>.
 12. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.039>.
 13. Redondo O., Prolongo S.G., Campo M., Sbarufatti C., Giglio M. Anti-icing and de-icing coatings based Joule’s heating of graphene nanoplatelets. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 164, pp. 65–73.
 14. Jain S.K., Tadesse Y. Fabrication of polylactide/carbon nanopowder filament using melt extrusion and filament characterization for 3D printing. *International Journal of Nanoscience*, 2018, vol. 18, no. 5, article number 1850026.
 15. Baloch K.H., Voskanian N., Bronsgeest M., Cumings J. Remote Joule heating by a carbon nanotube. *Nature Nanotechnology*, 2012, vol. 7, no. 5, pp. 316–319. DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.39>.
 16. Celzard A., McRae E., Deleuze C., Dufort M., Furdin G., Mareche J.F. Critical concentration in percolating systems containing a high-aspect-ratio filler. *Physical Review B – Condensed matter and materials physics*, 1996, vol. 53, no. 10, pp. 6209–6214. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.53.6209>.
 17. Bai J.B., Allaoui A. Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites – experimental investigation. *Composites Part A – Applied science and manufacturing*, 2003, vol. 34, no. 8, pp. 689–694. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(03\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(03)00140-4).
 18. Martin C.A., Sandler J.K.W., Shaffer M.S.P., Schwarz M.-K., Bauhofer W., Schulte K., Windle A.H. Formation of percolating networks in multi-wall carbon-nanotube-epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 2004, vol. 64, no. 15, pp. 2309–2316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.01.025>.
 19. Bao W.S., Meguid S.A., Zhu Z.H., Pan Y., Weng G.J. A novel approach to predict the electrical conductivity

- of multifunctional nanocomposites. *Mechanics of Materials*, 2012, vol. 46, pp. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.12.006>.
20. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich I.D. The use of elastomers modified with carbon nanotubes when creating self-regulating electric heaters and materials for protection against electromagnetic radiation. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 39–45.
21. Aguilar J.O., Bautista-Quijano J.R., Avilés F. Influence of carbon nanotube clustering on the electrical conductivity of polymer composite films. *Express Polymer Letters*, 2010, vol. 4, no. 5, pp. 292–299. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2010.37>.
22. Shchegolkov A.V., Komarov F.F., Parfimovich I.D., Milchanin O.V., Shchegolkov A.V., Khrobak A.V., Semenkova A.V. The influence of carbon nanotubes on the electric conductivity of thermosetting plastics and elastomers. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 3, pp. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-3-65-72>.
23. Mamunya Y.P., Davydenko V.V., Pissis P., Lebedev E.V. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *European Polymer Journal*, 2002, vol. 38, no. 9, pp. 1887–1897. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0014-3057\(02\)00064-2](https://doi.org/10.1016/s0014-3057(02)00064-2).

The comparative analysis of thermal effects in elastomers modified with MCNT at constant DC voltage

© 2021

Aleksandr V. Shchegolkov, PhD (Engineering),

assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”

Tambov State Technical University, Tambov (Russia)

E-mail: Energynano@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4317-0689>

Abstract: The author carried out the comparative analysis of elastomers – polyurethane (NPC) and silicone compound (NCOC) modified with carbon nanotubes (MCNT) with a mass content of 1 to 9 %. MCNTs were synthetically produced by the CVD technology using Co-Mo/Al₂O₃-MgO (MCNT1) and Fe-Co/_{2,1}Al₂O₃ (MCNT2) catalysts. The analysis of experimental study results showed that the lowest specific bulk electrical conductivity (5×10^{-10} Cm \times cm⁻¹) was typical for polyurethane elastomer (1 mass. % MCNT synthetically produced using Fe-Co/_{2,1}Al₂O₃ catalyst). For the silicone elastomer modified with 9 mass. % MCNT1, the specific bulk electrical conductivity was 4×10^{-1} Cm \times cm⁻¹. The author identified the parameters of percolation of electrical conductivity model for NPC, NCOC with MCNT1 and MCNT2, taking into account the MCNT packing factor and electrical conductivity critical index. The maximum temperature field uniformity is typical for silicone elastomer with 7 mass. % MCNT2. Nonuniform temperature field in modified polyurethane-based elastomers can be caused by the local MCNT entanglement manifested in the creation of agglomerates or more dense electrically-conductive circuit packing, which, in its turn, results in the decrease in heat power. The heating temperature of nanomodified composites produced from NCOC 1 and NCOC 2 can vary from 32.9 to 102 °C. The author studied the modes of nanomodified elastomers heat generation in the range of 6 to 30 V, compared heat generation in the elastomer-based and ceramics-based samples. The study allowed identifying the best combination of the polymeric matrix and MCNT type. For the electric heater, it is the most efficient to apply silicone compound at the 7 % MCNT concentration and, depending on the feeding voltage level of 12 or 24 V, to use MCNT1 or MCNT2.

Keywords: multiwall carbon nanotubes; catalyst; silicone compound; polyurethane compound; heating; percolation; modification.

Acknowledgements: The research is carried out under the financial support of the RFBR within the scientific project No. 18-53-00032 Bel_a.

For citation: Shchegolkov A.V. The comparative analysis of thermal effects in elastomers modified with MCNT at constant dc voltage. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 63–73. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-63-73.

НАШИ АВТОРЫ

Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник.
Адрес: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4.
E-mail: a.glezer@mail.ru

Дьяконов Дмитрий Львович, старший научный сотрудник.
Адрес: Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина,
105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 23/9, стр. 2.
E-mail: aberkas@yandex.ru

Ермаков Сергей Борисович, директор научно-образовательного центра «Северсталь-Политех».
Адрес: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

Илюшкин Максим Валерьевич, кандидат технических наук, заместитель директора.
Адрес: Ульяновский научно-исследовательский институт авиационной технологии и организации производства,
432057, Россия, г. Ульяновск, ул. Врача Михайлова, д. 34.
E-mail: fzbm@mail.ru

Киселев Евгений Степанович, доктор технических наук, профессор, директор Регионального технологического центра промышленного интернета в машиностроении.
Адрес: Ульяновский государственный технический университет,
432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.
E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Костин Никита Павлович, магистр.
Адрес: Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Ладягин Роман Владимирович, магистр.
Адрес: Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Мурадинова Ляйсан Фанисовна, аспирант.
Адрес: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4.
E-mail: tikabyuu@mail.ru

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор.
Адрес: Самарский государственный технический университет,
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244.
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Расторгуев Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».
Адрес: Тольяттинский государственный университет,
445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.
Тел.: 8 927 787-60-95
E-mail: rast_73@mail.ru

Савельев Кирилл Сергеевич, аспирант кафедры «Инновационные технологии в машиностроении».
Адрес: Ульяновский государственный технический университет,
432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.
E-mail: kirillsavelev73@gmail.com

Севастьянов Александр Александрович, студент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства».

Адрес: Тольяттинский государственный университет,

445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14.

Тел.: 8 927 891-47-43

E-mail: alex-119977@yandex.ru

Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения».

Адрес: Ульяновский государственный технический университет,

432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32.

E-mail: a_un@mail.ru

Хазов Александр Васильевич, главный инженер.

Адрес: АО «Ульяновский механический завод»,

432008, Россия, г. Ульяновск, Московское шоссе, д. 43.

E-mail: umz_73@mail.ru

Ширшиков Станислав Олегович, аспирант.

Адрес: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4.

E-mail: keller1250@gmail.com

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

Адрес: Тамбовский государственный технический университет,

392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106.

E-mail: energynano@yandex.ru

Щетинин Игорь Викторович, кандидат технических наук, доцент.

Адрес: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 4.

E-mail: ingvar@misis.ru

OUR AUTHORS

Dyakonov Dmitriy Lvovich, senior researcher.

Address: I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy,
105005, Russia, Moscow, Radio Street, 23/9, building 2.
E-mail: aberkas@yandex.ru

Ermakov Sergey Borisovich, Director of the Research and Education Center “Severstal-Polytech”.

Address: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytekhnicheskaya Street, 29.
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

Glezer Aleksandr Markovich, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, leading researcher.

Address: National University of Science and Technology MISIS,
119049, Russia, Moscow, Leninskiy Prospekt, 4.
E-mail: a.glezer@mail.ru

Ilyushkin Maksim Valerievich, PhD (Engineering), Deputy Director.

Address: Ulyanovsk Research Institute of Aviation Technology and Production Organization,
432057, Russia, Ulyanovsk, Doctor Mikhailov Street, 34.
E-mail: fzbm@mail.ru

Khazov Aleksandr Vasilievich, chief engineer.

Address: JSC Ulyanovsk Mechanical Plant,
432008, Russia, Ulyanovsk, Moskovskoye Shosse, 43.
E-mail: umz_73@mail.ru

Kiselev Evgeniy Stepanovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Director of Regional Technological Center for Industrial Internet in Mechanical Engineering.

Address: Ulyanovsk State Technical University, 4
32027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
E-mail: kec.ulstu@mail.ru

Kostin Nikita Pavlovich, graduate student.

Address: Samara State Technical University,
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 244.
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Ladyagin Roman Vladimirovich, graduate student.

Address: Samara State Technical University,
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 244.
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Muradimova Lyaisan Fanisovna, postgraduate student.

Address: National University of Science and Technology MISIS,
119049, Russia, Moscow, Leninskiy Prospekt, 4.
E-mail: tikabyyy@mail.ru

Nosov Nikolay Vasilievich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor.

Address: Samara State Technical University,
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya Street, 244.
E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

Rastorguev Dmitriy Aleksandrovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”.

Address: Togliatti State University,
445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 8 927 787-60-95
E-mail: rast_73@mail.ru

Savelyev Kirill Sergeevich, postgraduate student of Chair “Innovative Technologies in Mechanical Engineering”.
Address: Ulyanovsk State Technical University,
432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
E-mail: kirillsavelev73@gmail.com

Sevastyanov Aleksandr Aleksandrovich, student of Chair “Equipment and Technologies of Machine Building Production”.
Address: Togliatti State University,
445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: 8 927 891-47-43
E-mail: alex-119977@yandex.ru

Shchegolkov Aleksandr Viktorovich, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing”.
Address: Tambov State Technical University,
392000, Russia, Tambov, Sovetskaya Street, 106.
E-mail: Energynano@yandex.ru

Shchetinin Igor Viktorovich, PhD (Engineering), Associate Professor.
Address: National University of Science and Technology MISIS,
119049, Russia, Moscow, Leninskiy Prospekt, 4.
E-mail: ingvar@misis.ru

Shirshikov Stanislav Olegovich, postgraduate student.
Address: National University of Science and Technology MISIS,
119049, Russia, Moscow, Leninskiy Prospekt, 4.
E-mail: keller1250@gmail.com

Unyanin Aleksandr Nikolaevich, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, professor of Chair “Technology of Mechanical Engineering”.
Address: Ulyanovsk State Technical University,
432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.
E-mail: a_un@mail.ru