

ВЕКТОР НАУКИ

Тольяттинского
государственного
университета

Основан в 2008 г.

№ 2 (44)
2018

16+

Ежеквартальный
научный журнал

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

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора по общим вопросам:

Коростелев Александр Алексеевич, д.п.н.

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

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

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

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

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

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

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

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

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание»:

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

Муранова Екатерина Валентиновна – ответственный секретарь

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

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

Компьютерная верстка:

Н.А. Никитенко

Ответственный/технический редактор:

Н.А. Никитенко

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

Подписано в печать 29.06.2018.

Выход в свет 12.10.2018.

Формат 60×84 1/8.

Печать оперативная.

Усл. п. л. 7,4.

Тираж 50 экз. Заказ 3-464-18.

Цена свободная.

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

СВЕДЕНИЯ О ЧЛЕНАХ РЕДКОЛЛЕГИИ

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора по общим вопросам

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Заместитель главного редактора по гуманитарному направлению, секция «Языкознание»

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

Редколлегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ Д.А. Башмаков, Г.А. Туричин.....	6
СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК ПРОЧНОСТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Cu/Mg-КОМПОЗИТОВ С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОМПОНЕНТОВ А.Ю. Волков, А.А. Калонов.....	14
РАЗРУШАЮЩИЕ ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ИЗ-ЗА ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ Е.М. Волокобинский.....	21
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛО-, УГЛЕПЛАСТИКОВ И МАТЕРИАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ ZDP И FDM И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, С.П. Павлов.....	26
ПОРИСТОСТЬ ПРИ РЕМОНТЕ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ И МЕРЫ ПО ЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ А.И. Ковтунов, Н.Г. Пудовкина, А.А. Пудовкин, А.М. Масляев.....	34
ВТОРИЧНОЕ ВСКРЫТИЕ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ СВЕРЛЯЩИМ ПЕРФОРАТОРОМ С ПОВОРОТНЫМ МЕХАНИЗМОМ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ А.В. Месропян, М.Р. Рахматуллина.....	41
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ЗАГОТОВКОЙ ПРИ НАЛОЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ А.Н. Унянин, А.В. Хазов.....	47
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ П.Н. Шенбергер.....	53
НАШИ АВТОРЫ.....	61

CONTENT

THE INFLUENCE OF THE ELECTROSTATIC FIELD ON THE LASER THERMO-PROCESSING OF METALS D.A. Bashmakov, G.A. Turichin.....	6
THE COMPARISON OF THE EXPERIMENTAL DATA AND THE EDUCATED ESTIMATES OF STRENGTH AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Cu/Mg COMPOSITES WITH VARIOUS PROPORTIONS OF THE COMPONENTS A.Yu. Volkov, A.A. Kalonov.....	14
THE DESTRUCTIVE THERMOELASTIC STRESSES CAUSED BY HEAT OUTPUT IN GAZ INCLUSIONS IN COMPOSITE MATERIALS E.M. Volokobinsky.....	21
THE STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF GLASS-, CARBON FIBER MATERIALS AND MATERIALS PRODUCED BASING ON THE ADDITIVE TECHNOLOGIES USING 3DP AND FDM TECHNOLOGIES I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, S.P. Pavlov.....	26
POROSITY DURING THE REPAIR WORK OF TANKS AND PIPELINES FOR TRANSPORTATION OF OIL AND OIL PRODUCTS AND THE MEASURES FOR ITS PREVENTION A.I. Kovtunov, N.G. Pudovkina, A.A. Pudovkin, A.M. Maslyayev.....	34
THE PRODUCTIVE STRATUM COMPLETION USING THE ELECTROHYDRAULIC DRILLING PERFORATOR WITH THE STINGER ROTATING MECHANISM A.V. Mesropyayn, M.R. Rakhmatullina.....	41
THE STUDY OF KINEMATICS OF INTERACTION OF A GRINDING WHELL WITH A WORKPIECE WHEN APPLYING ULTRASONIC VIBRATIONS A.N. Unyanin, A.V. Khazov.....	47
SPECIAL CHARACTERISTICS OF THE DEFORMING MECHANISM DURING STAMPING SHEARING OPERATIONS P.N. Shenberger.....	53
OUR AUTHORS.....	61

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

© 2018

Д.А. Башмаков, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов
Набережночелнинский институт (филиал)

Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны (Россия)

Г.А. Турчин, доктор технических наук, исполняющий обязанности ректора
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова: лазерное излучение; лазерно-полевая обработка; упрочнение; электростатическое поле.

Аннотация: Современные методы лазерной обработки материалов активно внедряются в производство. Однако широкое их применение в машиностроении сдерживается высокой энергоемкостью процессов и неизученностью сложных быстропротекающих процессов таких технологий обработки. Статья посвящена гибридным лазерным технологиям обработки материалов, в частности лазерно-полевой закалке металлов. Проведено теоретическое исследование процесса лазерного взаимодействия с металлом; показано, что коэффициент отражения лазерного излучения и глубина его проникновения зависят от электропроводности скин-слоя. Выявлены основные взаимосвязи показателей качества обработанного слоя с параметрами лазерно-полевого технологического комплекса. Приведены результаты исследований по гибридной лазерно-полевой закалке в электростатическом поле широко используемых в машиностроении сталей (Сталь 10, Сталь 45, Сталь 65Г). Показано, что наложение электростатического поля на зону обработки приводит к увеличению глубины и твердости закаленного слоя за счет направленного движения электронов в глубь металла. Предложена математическая модель распределения температурного поля в металле под воздействием лазерного излучения, учитывающая наложение электростатического поля и позволяющая исследовать динамику технологического процесса закалки. Математически обосновано ограничение увеличения скорости охлаждения материала путем направленного движения электронов в электростатическом поле. Рассчитаны конкретные значения коэффициента влияния электростатического поля. Показано, что при наложении внешнего поля пороговое, критическое значение плотности мощности лазерного излучения, вызывающего оплавление обрабатываемой поверхности, увеличивается. Предложены конкретные математические модели для использования при подготовке производства для определения требуемой мощности лазерного излучения и напряженности электростатического поля. На основании полученных результатов предложена принципиальная технологическая схема, разработана и изготовлена установка лазерно-полевого технологического комплекса.

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении возможности использования лазерного излучения (ЛИ), как универсального инструмента при обработке различных материалов, определяются законами протекания таких процессов и явлений, как поглощение ЛИ, поверхностный и объемный нагрев материала, плавление материала, его эрозия, образование зон термического влияния (ЗТВ) [1; 2], изменение напряженно-деформированного состояния, диффузия элементов в условиях тепловых воздействий и т. п. [3; 4]. Гибридные лазерные технологии в мировой практике в основном представлены лазерно-дуговой обработкой [5; 6], что связано с наличием большого количества экспериментальных данных и разработанными технологиями [7; 8]. Другие гибридные методы обработки: двухлучевая лазерная, лазерно-индукционная, лазерно-плазменная, лазерно-светолучевая – также находят применение в промышленности и достаточно хорошо исследованы [8]. Однако научные труды по лазерно-полевой обработке практически не представлены. Отсутствует полная теория совместного воздействия ЛИ и различных полей на обрабатываемый материал.

В мировой науке работы по совместному воздействию различных полей и ЛИ в основном сконцентрированы в Японии. Работы по лазерно-электростатической и лазерно-электромагнитной технологии в области механического давления ведутся в Tokai University в Японии [9; 10]. Стоит отметить и исследования по лазерно-

электростатической технологии модификации графена в Shahid Beheshti University, Иран [11].

Из проведенного краткого обзора понятно, что исследования по лазерно-полевой технологии в РФ практически отсутствуют. В этой связи для решения повышения производительности лазерной обработки и расширения области использования ЛИ необходимо дальнейшее развитие теории взаимодействия ЛИ с материалом, учитывающей влияние внешних возмущающих факторов, таких как электромагнитные, магнитные и электростатические поля.

Цель работы – изучение совместного воздействия ЛИ и электростатического поля на обрабатываемый металл, используемый в машиностроении, с выявлением особенностей ЗТВ и создание математической модели такого комбинированного влияния для дальнейшей разработки технологии лазерно-полевого воздействия.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Лазерное упрочнение рабочей поверхности металлического изделия при мощностях, близких к критическим, не допускающим оплавления, не дают стабильных и требуемых на производстве показателей качества поверхности [12]. Поэтому помимо параметров лазерно-полевого технологического комплекса (ЛПТК), играющих основную роль в достижении требуемого технологического процесса (ТП), рассматриваемых в виде совокупности взаимодействующих между собой звеньев

сложной системы и напрямую влияющих на физику процесса взаимодействия ЛИ с металлом, требуется учитывать и электропроводность металла, от которой напрямую зависит коэффициент поглощения.

Взаимосвязь коэффициента поглощения с проводимостью материалов, в частности металлов, показывает, что свободные электроны в кристаллической решетке металла увеличивают долю отраженного ЛИ. Глубина скин-слоя δ для ЛИ определяется по формуле

$$\delta = 2(2\mu_0\sigma\omega)^{-0,5},$$

где μ – магнитная проницаемость материала, при частотах оптического диапазона для металлов равна 1;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

σ – удельная электропроводность обрабатываемого материала;

ω – циклическая частота излучения.

Материалы отражают излучение поверхностью в зависимости от диэлектрической проницаемости среды, что видно в следующей зависимости:

$$R = \frac{Q_{отр}}{Q_{пад}} = \left| \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right|^2,$$

где $Q_{отр}$, $Q_{пад}$ – энергия ЛИ, отраженная от поверхности металла и попадающая на него соответственно;

ε – диэлектрическая проницаемость среды.

В металле электроны проводимости можно считать полностью свободными, тогда коэффициент отражения будет рассчитываться в соответствии с формулой

$$R = 1 - \sqrt{\frac{2\omega}{\pi\sigma}}.$$

Исследования, проведенные по лазерной термообработке металлов, в т. ч. и других авторов, отражают нестабильность показателей качества ТП. К таким показателям качества ТП относятся: глубина зоны лазерного воздействия, микротвердость, шероховатость обработанной поверхности, химический состав и однородность микроструктуры [1].

Анализ взаимосвязи параметров ЛПТК, процесса лазерной закалки и показателей качества обработанного изделия показал, что сам ЛПТК основное влияние оказывает на температуру в зоне гибридной обработки, а от нее, в свою очередь, зависят все показатели качества ТП (рис. 1).

Данные рассуждения приводят к логическому заключению: для увеличения глубины ЗТВ при неизменной мощности ЛИ необходимо уменьшить проводимость скин-слоя. Используя внешние воздействия на заряженные частицы в материале, в частности электростатическое поле, возможно перераспределить электроны в металлах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

На основании теоретических данных разработан экспериментальный ЛПТК (рис. 2).

Лазерно-полевая технологическая установка включает в себя такие элементы, как лазерный технологический комплекс на базе волоконного лазера ЛС-2; фокусирующая система Precitec; микропроцессорная система; управляемый источник электростатического поля, связанный с дополнительным электродом.

Электроны, под действием силы со стороны положительно заряженного электрода скапливаясь на поверхности металла со стороны, противоположной зоне лазерной закалки, снижают проводимость скин-слоя детали в требуемой ЗТВ, что приведет к увеличению глубины проникновения ЛИ и повышению коэффициента его поглощения.

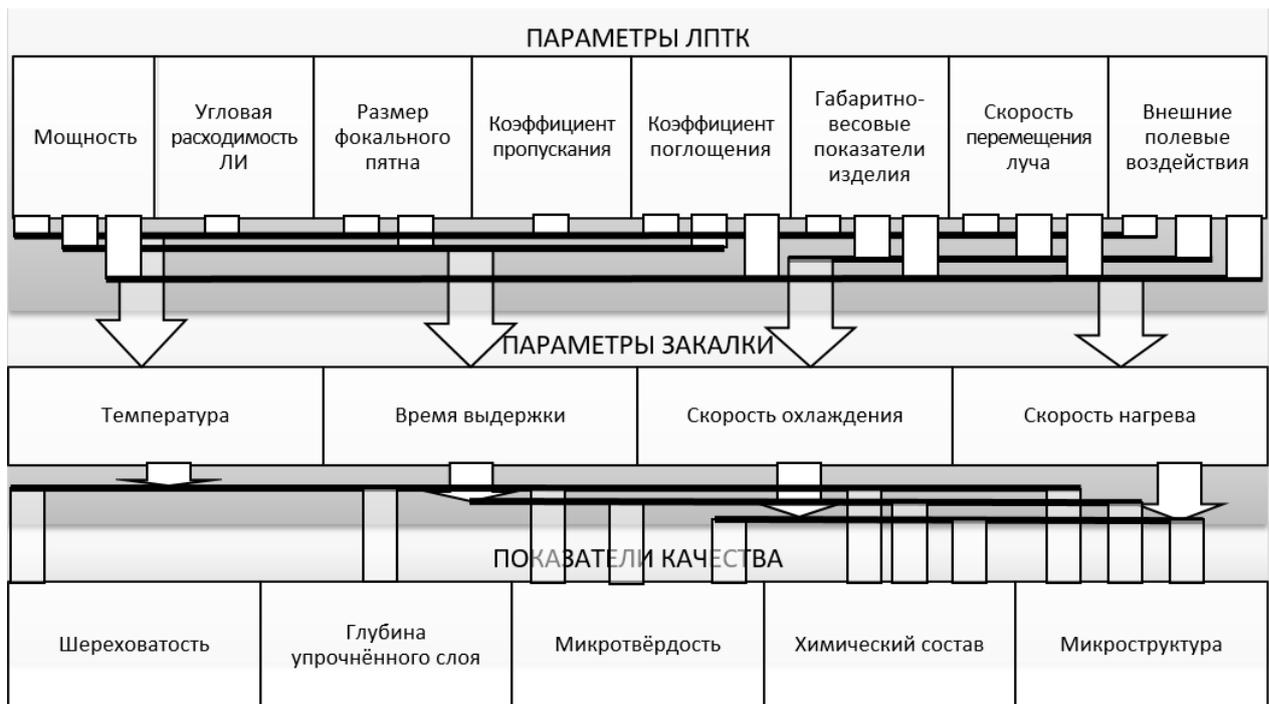


Рис. 1. Зависимость показателей качества обработанного слоя от параметров ЛПТК

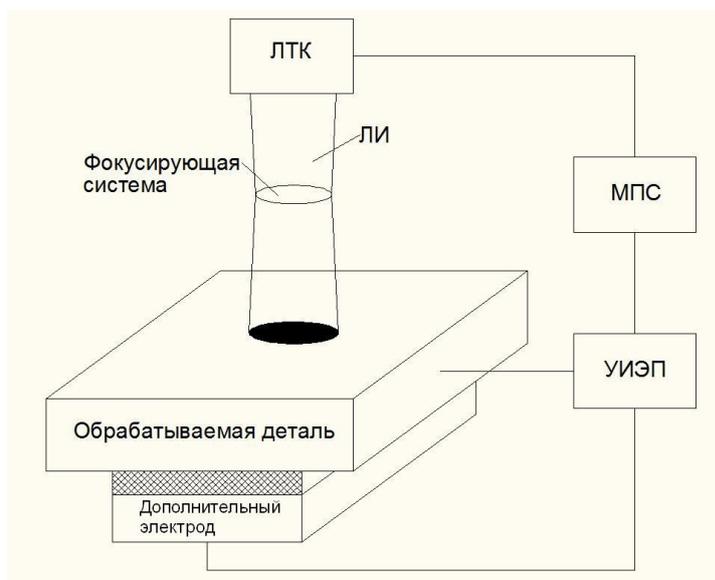


Рис. 2. Схема лазерно-полевой технологической установки

Для разработки ТП и отработки режимов лазерно-полевого воздействия необходимо контролировать основные параметры процесса и их влияние на показатели качества ТП (глубину упрочненного слоя, микроструктуру, химический состав, микротвердость, шероховатость поверхности и т. д.) [13; 14].

Плотность мощности ЛИ, время воздействия, точность позиционирования лазерного луча, напряженность электростатического поля и т. д. являются основными параметрами ЛПТК, оказывающими прямое влияние на показатели качества ТП. Микроструктурный анализ сталей, подвергшихся обработке концентрированными потоками энергии, в режимах, близких к критическим, без использования дополнительных внешних воздействий, показывает существенный рост микротвердости и глубины закаленной области материала, но при этом повышается вероятность недостижения требуемого качества поверхности в виде ее оплавления, что приводит к изменению геометрических параметров, а также к возможному увеличению шероховатости на 3–5 классов [15].

Путем регулирования мощности ЛИ, фокусного расстояния и напряженности электростатического поля устанавливаются необходимые для достижения требуемых показателей качества ТП параметры ЛПТК. Экспериментальная отработка ТП проводилась на образцах из стали 10, 45 и 65Г. Такой выбор материалов обусловлен проведенным анализом использования марок сталей при производстве автомобиля КамАЗ [1].

Анализ зоны термической обработки ЛПТК (рис. 3) указывает на увеличение глубины упрочненной зоны для всех металлических образцов при неизменной мощности ЛИ, что актуально для деталей, работающих на истирание. На полученных графических зависимостях заметно нелинейное увеличение глубины ЗТВ от напряженности электростатического поля. При рассмотрении областей графика с напряженностью поля от 4 МВ/м и выше отмечено уменьшение интенсивности прироста глубины ЗТВ при аналогичном увеличении прикладываемого напряжения к дополнительному электроду для всех рассматриваемых материалов.

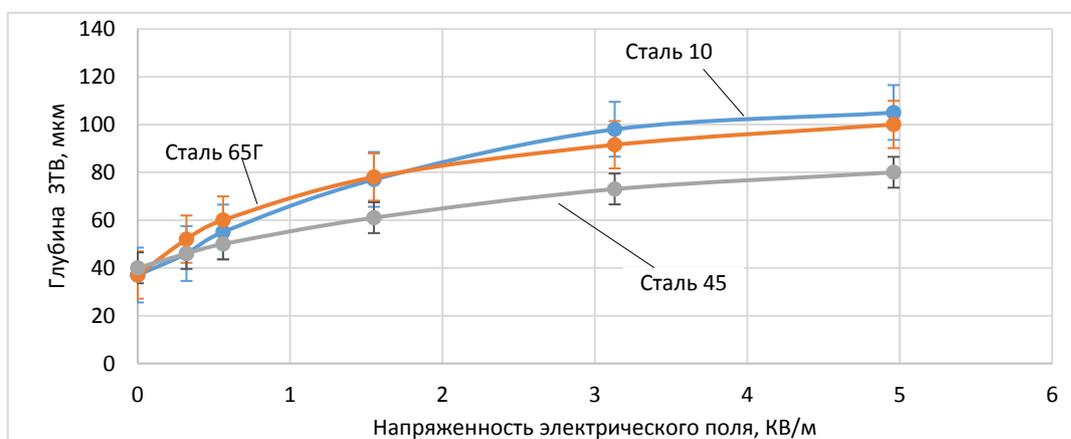


Рис. 3. Зависимость глубины упрочненной зоны от напряженности электростатического поля (1 – Сталь 10, $W=3$ КДж; 2 – Сталь 65Г, $W=4,5$ КДж; 3 – Сталь 45, $W=3,8$ КДж)

Дополнительным эффектом при обработке под воздействием внешнего поля является увеличение твердости упрочненного слоя от 100 HV_{0,05} для Стали 65Г и до 240 HV_{0,05} для Стали 10 (металлографические исследования проводились в лаборатории ОАО «КАМАЗ-Дизель», протокол исследования № 1322 от 22.03.2007). Средние значения полученных данных позволяют сделать вывод: чем тверже закаленный простым ЛИ металл, тем ниже прирост твердости при гибридной лазерно-полевой обработке. Данный эффект объясняется более интенсивным отводом тепловой энергии при охлаждении в глубь материала за счет направленного движения электронов; при этом стоит отметить, что присутствует критическая скорость движения электронов в материале под действием внешнего электростатического поля, которая и ограничивает интенсивность данного вида охлаждения. Закаливаемость Стали 10 объясняется изменением химического состава обработанного слоя при лазерном воздействии [16].

Экспериментальные исследования показывают, что показатели качества обработанных изделий и их стабильность зависят от параметров ТП и типа обрабатываемого материала [6; 8; 17]. Гибридная лазерная обработка с электростатическим полем прямой полярности приводит к повышению микротвердости и глубины ЗТВ одновременно с уменьшением вероятности оплавления обработанной зоны изделия, а при предельных значениях напряженности поля, равных 5 кВ/м, – к практически полному ее отсутствию [10; 11].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЗОНУ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ

Расчет температурного поля в металле под воздействием ЛИ без наложения электростатического поля производился согласно математической модели [18]:

$$T = AP \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{4(\pi a(t-t'))^{3/2}} \times \frac{-((x+vt'-x')+(y-y')^2+(z-z')^2)}{4a(t-t')} dx' dy' dt' \quad (1)$$

где A – коэффициент поглощения ЛИ поверхностью;
 P – мощность ЛИ;

I – распределение интенсивности в пятне фокуса ЛИ;

a – температуропроводность, $a = \frac{\lambda}{\rho c}$;

c – удельная теплоемкость;

ρ – плотность материала;

λ – теплопроводность.

На рис. 4 отражены расчеты по приведенной выше модели. По температурным кривым заметно, что в пределах $0 \pm 0,3$ мм отклонение температуры не превышает 30°C . Проведенные исследования однозначно показывают, что данные отклонения температурного поля на поверхности образца не могут оказать ощутимого воздействия на показатели качества ТП [19].

В отсутствии внешнего электрического поля электронный газ в проводнике, в частности в металле, покоится по отношению к положительным ионам решетки, так как все направления движения электронов равновероятны [20]. Средняя плотность тока будет равна нулю, как и средняя скорость электронов относительно решетки [13]. Под воздействием электростатического поля свободные электроны приобретают дополнительную к основной скорости u , направленную вдоль вектора напряженности электрического поля. Увеличение скорости движения u может происходить лишь во время свободного полета электрона между двумя последовательными столкновениями его с ионами решетки [13]. Непосредственно перед столкновением скорость электрона равна

$$u = \frac{eE}{m} \tau,$$

где e – заряд электрона;

E – напряженность электростатического поля;

m – масса электрона;

τ – время между столкновениями электрона, рассчитываемое по формуле $\tau = \frac{l}{v}$;

l – средняя длина пробега электрона;

v – средняя скорость беспорядочного движения электронов в отсутствие электростатического поля.

Среднее значение u можно будет рассчитать:

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau.$$

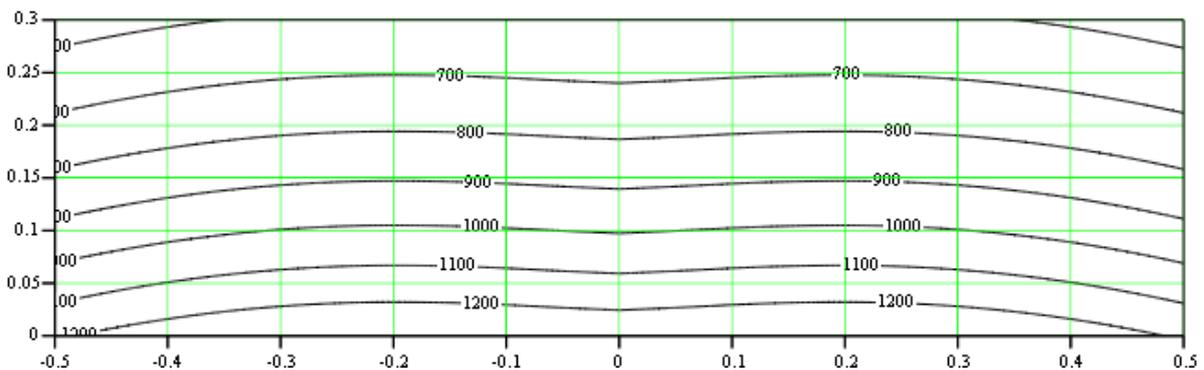


Рис. 4. Температурные кривые расчетного воздействия ЛИ (TEM₁₀)

Данные рассуждения позволяют получить плотность электрического тока в проводнике под действием электростатического поля:

$$j = \frac{e^2 n l}{2 m v} E,$$

где n – количество электронов, находящихся в единице объема металла [1].

Ограниченность количества свободных электронов, электронов проводимости,двигающихся к необрабатываемой кромке детали для компенсации напряженности электрического поля, подтверждается экспериментальными данными [1]. Таким образом, во взаимодействии с электростатическим и другими электрическими полями принимает участие ограниченно-небольшая часть Δn электронов, которые расположены в узком ($\Delta E \ll E_F$) энергетическом слое ΔE , ограниченном поверхностью Ферми, поскольку только для них существуют возможные свободные энергетические состояния с большей энергией [21].

Электроны, расположенные ниже уровня Ферми на расстояниях больше ΔE , в отдельности не могут взаимодействовать с внешним электростатическим полем, так как все энергетические уровни, в которые они могли бы перейти после взаимодействия, заполнены другими электронами. Однако стоит учитывать вероятность одновременного изменения энергии электронами на одну и ту же величину. Распределение электронов проводимости в элементарном объеме проводника (стали) под воздействием электростатического поля можно рассчитывать по формуле

$$dn_s(E) = 2 \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3} = \frac{\sqrt{2}m_0^{\frac{3}{2}}}{\pi^2\hbar^3} \sqrt{E} dE.$$

Стоит уточнить, что число электронных состояний $dn_s(E)$ с заданными значениями энергий в интервале от E до $(E+dE)$ равно удвоенному числу элементарных квантовых ячеек в p -пространстве в сферическом слое радиуса $p = (2mE)^{\frac{1}{2}}$ и толщины $dp = d(2mE)^{\frac{1}{2}}$. Данная система при определенных условиях под воздействием внешнего поля может смещаться как единое целое [14].

Преобразуем исходную математическую модель распространения температурного поля (1) в следующей форме:

$$T = P \sqrt{\frac{2\omega}{\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{4(\pi a(t-t'))^{3/2}} \times e^{-\left(\frac{(x+vt'-x')+(y-y')^2}{4a(t-t')} + \frac{(z-z')^2}{4a(t-t')}\right)} dx' dy' dt'$$

Далее, глубину ЗТВ, если ЛИ воздействует в точке $x'=0, y'=0$ и $z'=0$ и если считать начальным моментом времени момент начала взаимодействия ЛИ с металлом, возможно записать:

$$h_{3ак}^2(x, y, t) = 4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega}} \times \frac{T_{3ак}(\pi at)^{3/2}}{PI} - (x^2 + y^2)$$

Для учета изменения глубины заковки при помощи гибридного лазерно-полевого воздействия введем коэффициент влияния электростатического поля (K_E):

$$h_{3ак}(x, y, t) = K_E \sqrt{4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega}}} \times \sqrt[4]{\frac{T_{3ак}(\pi at)^{3/2}}{PI} - (x^2 + y^2)}$$

Обратные преобразования позволяют дополнить и уточнить исходную модель распределения температурного поля в металле для требований лазерно-полевой технологии:

$$T = P \sqrt{\frac{2\omega}{\pi\sigma}} \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{4(\pi a(t-t'))^{3/2}} \times e^{-\left(\frac{(x+vt'-x')+(y-y')^2}{4a(t-t')} + \frac{(z-z')^2}{4K_E^2 a(t-t')}\right)} dx' dy' dt'$$

На основе полученных экспериментальных данных [1] (таблица 1) составим зависимости K_E для выбранных нами марок сталей. Если взять за основу результаты экспериментальных данных, возможно вычислить и значение коэффициента K_E в опорных точках (таблица 2).

Чаще всего при решении задач на производстве возникает необходимость вычисления максимальной глубины закаленного слоя, т. е. непосредственно под пятном воздействия ЛИ:

Таблица 1. Взаимосвязь глубины закаленного слоя и напряженности электростатического поля

Напряженность электростатического поля, МВ/м	Глубина зоны заковки для Стали 10, W=3 КДж, мм	Глубина зоны заковки для Стали 65Г, W=4,5 КДж, мм	Глубина зоны заковки для Стали 45, W=3,8 КДж, мм
4,69	0,110	0,1000	0,080
3,13	0,100	0,0915	0,073
1,55	0,080	0,0780	0,061
0,56	0,057	0,0600	0,050
0,32	0,050	0,0520	0,046
0,00	0,040	0,0370	0,040

Таблица 2. Значения K_E для отдельных марок сталей

Напряженность электростатического поля, МВ/м	K_E , Сталь 10, $W=3$ КДж	K_E , Сталь 65Г, $W=4,5$ КДж	K_E , Сталь 45, $W=3,8$ КДж
4,69	2,750	2,7027	2,000
3,13	2,500	2,4730	1,825
1,55	2,000	2,1081	1,525
0,56	1,425	1,6216	1,250
0,32	1,250	1,4054	1,150
0,00	1,000	1,0000	1,000

$$h_{зак}^2(t, E) = K_E^2 4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{зак}(\pi at)^{3/2}}{PI}}$$

$$\sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{зак}(\pi at)^{3/2}}{PI}} = e^{\frac{h_{зак}^2}{K_E^2 4at}}$$

При расчете требуемой мощности ЛИ для достижения заданной глубины ЗТВ в ЛПТК возможно использовать следующую модель:

$$P(t, E, h_{зак}) = \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{зак}(\pi at)^{3/2}}{I}} e^{-\frac{h_{зак}^2}{K_E^2 4at}}$$

В случае же жестко заданной мощности ЛИ напряженность электростатического поля легко определяется при помощи известных коэффициентов K_E , а далее по зависимостям для различных металлов [1]:

$$K_E = h_{зак} \left(4at \ln \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{\omega} \frac{T_{зак}(\pi at)^{3/2}}{PI}} - (x^2 + y^2) \right)^{-\frac{1}{2}}$$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Исследуя динамику температурного поля в металле по времени на основе полученной математической модели, возможно определить скорости нагрева и охлаждения, предельные возникающие температуры. Систематизируя узлы управляющей системы ЛПТК по родственным признакам (достижение требуемой температуры, время нахождения объема в требуемом диапазоне температур и т. д.), возможно на стадии подготовки к производству определить не только глубину ЗТВ, но и форму, и размеры различных структурных зон, возникающих при лазерно-полевой обработке металлов. Результаты решения моделей могут быть представлены в виде изотермических поверхностей распределений температур в пространстве и во времени, очертаний различных структурных зон, возникающих при лазерно-полевой обработке.

Анализ зоны лазерно-полевой закалки показал, что наложение электростатического поля прямой полярности приводит к увеличению такого параметра, как глубина закаленного слоя, при всех режимах обработки металлов, одновременно и с увеличением твердости. Ширина закаленного при помощи лазерно-полевой технологии слоя металла остается неизменной при всех режимах обработки. Разработанная технологическая

схема реализации технологии лазерно-полевой обработки и созданная математическая модель закалки поверхности металлов позволяет исследовать динамику процесса упрочнения и повысить ее эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Башмаков Д.А. Управление процессом лазерного термоупрочнения металлов в электрическом поле: дис. ... канд. тех. наук. Набережные Челны, 2010. 151 с.
2. Kuznetsov I.N., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Portnov S.M. Automatic control system of high precision welding of workpieces in mechanical engineering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2014. Vol. 69. № 1. P. 012029.
3. Шлякова Е.В., Мозговой И.В., Соловьев А.А. Исследование влияния лазерного облучения на стойкость к электрохимической коррозии материала гильз цилиндров двигателя внутреннего сгорания // Омский научный вестник. 2008. № 2 (68). С. 22–25.
4. Песошин В.А., Звездин В.В., Портнов С.М., Кисаев Р.А., Кузнецов И.Н. Исследование процесса влияния изменения мощности при газолазерной резке металлов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2010. № 2. С. 43–46.
5. Турчин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Ахметов А.Д., Величко О.В. Лазерно-дуговая сварка в различных пространственных положениях // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2013. № 183-1. С. 218–225.
6. Турчин Г.А., Цибульский И.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В. Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2010. № 110. С. 181–187.
7. Турчин Г.А., Цибульский И.А., Валдайцева Е.А., Карасев М.В. Теория и технология гибридной сварки металлов больших толщин // Лучевые технологии и применение лазеров: 6-я междунар. конф. СПб., 2009. С. 11–18.
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Чирков А.М. Гибридные технологии лазерной сварки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 52 с.
9. O'Brian A.S., Gupta S.B., Vasu S.S. Review: laser ignition for aerospace propulsion // Propulsion and Power Research. 2016. Vol. 5. № 1. P. 1–21.
10. Akashi N., Oigawa Y., Hosokawa H., Horisawa H. Plasma Acceleration Characteristic of a Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Thruster // 50th AIAA

- ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2014. Cleveland, 2014. P. 1585–1594.
11. Yadi M., Karimzadeh R., Abbasi A. Effect of treatment by electrostatic field and 532-nm laser irradiation on optical and thermo-optical properties of graphene oxide colloids // *Journal of Materials Science*. 2017. Vol. 52. № 8. P. 4532–4542.
 12. Khisamutdinov R.M., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Saubanov R.R., Rakhimov R.R., Spirin A.A. Study of processes of steels surfaces modification with highly concentrated energy flows // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 669. № 1. P. 012024.
 13. Паркин А.А. Технология обработки концентрированными потоками энергии. Самара: СГТУ, 2004. 494 с.
 14. Зvezdin V.V., Bashmakov D.A. Повышение энергоэффективности при лазерной закалке // *Энергоресурсоэффективность и энергосбережение: труды IX Междунар. симпозиума. Казань, 2008. С. 369–371.*
 15. Заморский В.В. Повышение качества системы управления лазерным технологическим комплексом сварки ответственных деталей: дис. ... канд. тех. наук. Набережные Челны, 2003. 126 с.
 16. Башмаков Д.А., Ибрафилов И.Х., Ибрафилов Д.И. Исследование влияния лазерной обработки на химический состав металлов // *Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XXI междунар. науч.-тех. конф. Донецк: МСМ, 2014. С. 107–108.*
 17. Валиахметов Р.Р. Совершенствование системы управления лазерного технологического комплекса по критериям качества: дис. ... канд. тех. наук. Набережные Челны, 2004. 152 с.
 18. Башмаков Д.А. Модель расчета параметров лазерного термоупрочнения, учитывающая влияние электростатического поля // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2010. № 2. С. 10–14.*
 19. Зvezdin V.V., Karimov R.B., Hamadeev A.V. Модель формирования микроструктур в металлах при лазерной обработке // *Проектирование и исследование технических систем: межвуз. науч. сб. Набережные Челны, 2007. С. 150–154.*
 20. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит, 2003. 615 с.
 21. Миронова Г.А. Зонная структура электронного энергетического спектра в твердых телах. Модели свободных и сильно связанных электронов. М.: Физический факультет МГУ, 2001.
URL: nature.web.ru/db/msg.html?mid=1174320&uri=page14.html.
- REFERENCES**
1. Bashmakov D.A. *Upravlenie protsessom lazernogo termouprochneniya metallov v elektricheskom pole*. Diss. kand. tekhn. nauk [Controlling the process of laser thermal hardening of metals in an electric field]. Naberezhnye Chelny, 2010. 151 p.
 2. Kuznetsov I.N., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Portnov S.M. Automatic control system of high precision welding of workpieces in mechanical engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 69, no. 1, p. 012029.
 3. Shlyakova E.V., Mozgovoi I.V., Solovyov A.A. Analysis of laser exposure impact on resistance to electrochemical corrosion of material of cylinder sleeves of internal-combustion engine. *Omskiy nauchniy vestnik*, 2008, no. 2 (68), pp. 22–25.
 4. Pesoshin V.A., Zvezdin V.V., Portnov S.M., Kisaev R.A., Kuznetsov I.N. Investigation of the process of the influence of power variation in gas-laser cutting of metals. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, 2010, no. 2, pp. 43–46.
 5. Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Akhmetov A.D., Velichko O.V. Laser-arc welding in different attitude position. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2013, no. 183-1, pp. 218–225.
 6. Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Kuznetsov M.V., Somonov V.V. Hybrid laser-arc welding of metals of large thickness. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2010, no. 110, pp. 181–187.
 7. Turichin G.A., Tsibulskiy I.A., Valdaytseva E.A., Karasev M.V. Theory and technology of hybrid welding of large metals. *6-ya mezhdunarodnaya konferentsiya "Luchevye tekhnologii i primeneniye lazerov"*. Sankt Petersburg, 2009, pp. 11–18.
 8. Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Chirkov A.M. *Gibridnye tekhnologii lazernoy svarki* [Hybrid technologies for laser welding]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 2004. 52 p.
 9. O'Brian A.S., Gupta S.B., Vasu S.S. Review: laser ignition for aerospace propulsion. *Propulsion and Power Research*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 1–21.
 10. Akashi N., Oigawa Y., Hosokawa H., Horisawa H. Plasma Acceleration Characteristic of a Rectangular Laser-Electromagnetic Hybrid Thruster. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference 2014*. Cleveland, 2014, pp. 1585–1594.
 11. Yadi M., Karimzadeh R., Abbasi A. Effect of treatment by electrostatic field and 532-nm laser irradiation on optical and thermo-optical properties of graphene oxide colloids. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, no. 8, pp. 4532–4542.
 12. Khisamutdinov R.M., Zvezdin V.V., Israfilov I.H., Saubanov R.R., Rakhimov R.R., Spirin A.A. Study of processes of steels surfaces modification with highly concentrated energy flows. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 669, no. 1, p. 012024.
 13. Parkin A.A. *Tekhnologiya obrabotki kontsentrirovannymi potokami energii* [Technology of processing by concentrated flows of energy]. Samara, SGTU Publ., 2004. 494 p.
 14. Zvezdin V.V., Bashmakov D.A. Energy efficiency enhancement in laser hardening. *Trudy IX Mezhdunar. simpoziuma "Energoeffektivnost' i energosberezhenie"*. Kazan', 2008, pp. 369–371.
 15. Zamorskiy V.V. *Povysheniye kachestva sistemy upravleniya lazernym tekhnologicheskim kompleksom svarki otvetstvennykh detaley*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the quality of the control system for the laser technological complex for welding critical parts]. Naberezhnye Chelny, 2003. 126 p.
 16. Bashmakov D.A., Israfilov I.Kh., Israfilov D.I. Investigation of the effect of laser treatment on the chemical

- composition of metals. *Sbornik trudov XXI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka"*. Donetsk, MSM Publ., 2014, pp. 107–108.
17. Valiakhmetov R.R. *Sovershenstvovanie sistemy upravleniya lazernogo tekhnologicheskogo kompleksa po kriteriyam kachestva*. Diss. kand. tekhn. nauk [Perfection of a control system of a laser technological complex by quality criteria]. Naberezhnye Chelny, 2004. 152 p.
 18. Bashmakov D.A. Model for calculating the parameters of laser thermal hardening, taking into account the influence of the electrostatic field. *Sotsialno-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*, 2010, no. 2, pp. 10–14.
 19. Zvezdin V.V., Karimov R.B., Khamadeev A.V. Model of formation of microstructures in metals during laser processing. *Mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik "Proektirovanie i issledovanie tekhnicheskikh sistem"*. Naberezhnye Chelny, 2007, pp. 150–154.
 20. Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* [Fundamentals of the theory of electricity]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 615 p.
 21. Mironova G.A. *Zonnaya struktura elektronogo energeticheskogo spectra v tverdykh telakh. Modeli svobodnykh i silno svyazannykh elektronov* [Zone structure of the electron energy spectrum in solids. Models of free and strongly coupled electrons]. Moscow, Fizicheskii fakultet MGU Publ., 2001. URL: nature.web.ru/db/msg.html?mid=1174320&uri=page14.html.

THE INFLUENCE OF THE ELECTROSTATIC FIELD ON THE LASER THERMO-PROCESSING OF METALS

© 2018

D.A. Bashmakov, PhD (Engineering), Associate Professor,
assistant professor of Chair of High-Energy Processes and Aggregates

Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga region) Federal University, Naberezhnye Chelny (Russia)

G.A. Turichin, Doctor of Sciences (Engineering), Acting Rector
Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg (Russia)

Keywords: laser radiation; laser-field processing; hardening; electrostatic field.

Abstract: Modern methods of laser processing of the materials are actively introduced into production. However, their wide application in engineering is hampered by the high energy intensity of the processes and the unexplored complex high-speed processes of such processing technologies. This paper covers the hybrid laser technologies for processing materials, in particular, laser-field hardening of metals. The theoretical study of laser interaction with metal is carried out; it is shown that the laser radiation reflection index and the depth of its penetration depend on the electrical conductivity of a skin layer. The study determined the main interrelations between the quality parameters of a treated layer and the parameters of the laser-field technological complex. The paper gives the results of the study on hybrid laser-field hardening of steels widely used in engineering (Steel 10, Steel 45, and Steel 65G) in the electrostatic field. It is shown, that the electrostatic field superposition on a treatment zone leads to the increase in the depth and hardness of a hardened layer through the directed motion of electrons deep into metals. The authors offer a mathematical model for the temperature field distribution in metal under the influence of laser radiation that considers the electrostatic field superposition and allows investigating the dynamics of the hybrid laser hardening. The limitation of the increase in the rate of material cooling by the electrons directional motion in the electrostatic field is mathematically substantiated. The specific values of the electrostatic field influence coefficient are calculated. It is shown, that when superposing the external field, the threshold, critical value of the density of the laser radiation power causing the melting of the treated surface increases. The authors offer the specific mathematical models to be used when preparing a production for determining the required laser radiation power and the strength of the electrostatic field. Based on the results of the study, the principal process scheme is offered, and the laser-field technological complex facility is designed and manufactured.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РАСЧЕТНЫХ ОЦЕНОК ПРОЧНОСТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Cu/Mg-КОМПОЗИТОВ С РАЗНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОМПОНЕНТОВ

© 2018

А.Ю. Волков, доктор технических наук, заведующий лабораторией прочности
А.А. Калонов, аспирант, инженер-исследователь лаборатории прочности
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

Ключевые слова: металлические композиты; сплавы медь-магний; прочностные свойства композитов; резистометрия; Cu/Mg-композит.

Аннотация: Существующие модельные представления позволяют с той или иной точностью оценить физико-механические свойства материалов еще на стадии их обсуждения, без длительных процедур получения и проведения испытаний. К примеру, при оценке свойств композитов в настоящее время все шире используется «правило смесей», позволяющее вычислить прочностные свойства и электросопротивление композитных материалов на основе вкладов, которые определяются объемными долями компонентов. Очевидно, что «правило смесей», как и все модельные подходы, имеет свои ограничения, которые хотелось бы оценить на одном композите с разными объемными долями компонентов.

Методом гидроэкструзии получены три Cu/Mg-композитных прутка, в медной матрице которых содержится 1, 7 и 49 тонких магниевых волокон. Выполнены оценочные расчеты прочностных свойств и электросопротивления деформированных композитов с использованием «правила смесей». Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами. Показано, что наиболее полное соответствие результатов расчета и экспериментальных данных наблюдается в композитах с 7 и 49 магниевыми волокнами. В свою очередь, расчетные прочностные свойства сильно отклоняются от эксперимента в случае практически одинаковых объемов компонентов в однофазном композите. Это вызвано различием механизмов деформации медной матрицы с ГЦК-решеткой и ГПУ-волокна из магния. Результаты, полученные для композита с 49 магниевыми волокнами, наводят на мысль о начальных стадиях формирования новых фаз на Cu/Mg-интерфейсе вследствие процессов механосплавления при ИПД.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведется активный поиск и создание металлических композитов, в медной матрице которых содержится большое количество наноразмерных частиц или тонких волокон упрочняющей фазы. Такие проводниковые материалы часто демонстрируют уникальные механические и физические свойства и поэтому представляют большой интерес с практической точки зрения [1]. В качестве примера можно привести высокопрочные проводники на основе Cu-Nb [2], Cu-V [3] или Cu-Ag-композитов [4]. Перечисленные выше композиты имеют интерфейсы с практически несмешивающимися слоями, поскольку их компоненты или практически не имеют взаимной растворимости (Cu-Nb и Cu-V), или имеют весьма ограниченную растворимость (Cu-Ag). Очевидно, что прочностные свойства композитов с несмешивающимися компонентами в основном зависят от объемной доли более прочной фазы, а их проводящие свойства определяются медной матрицей. В то же время вклад как в прочностные свойства, так и в электросопротивление многоволоконных композитов вносят многочисленные поверхности раздела компонентов, поскольку они тормозят движение дислокаций и выступают как препятствия для носителей заряда [5]. Однако работ по рассмотрению влияния объемной доли интерфейса на физико-механические свойства композитов с медной матрицей явно недостаточно.

В качестве модельного материала в данной работе были взяты образцы Cu/Mg-композитов с разным количеством магниевых волокон в медной матрице. Такие композиты ранее практически не исследовались. Вероятно, основной причиной, которая останавливает ис-

следователей от работ в этом направлении, является неочевидность достижения высоких прочностных свойств в таком композите. Действительно, трудно надеяться на упрочнение меди за счет введения в нее значительно менее прочных магниевых волокон. В настоящее время основной подход при создании композитов состоит в упрочнении мягкой матрицы введением в нее волокон из более прочного материала. К примеру, медь упрочняют углеродными нанотрубками [6], ниобиевыми волокнами [2], наноразмерными частицами хрома [7] или железа [8]. Как правило, высокотемпературные отжиги таких композитов не планируются, поскольку приводят к коагуляции волокон и, как следствие, к деградации свойств [2].

Однако упрочнить Cu/Mg-композит вполне возможно с помощью термообработок, в ходе которых на границе раздела будут формироваться новые фазы на основе интерметаллидов Cu_2Mg и CuMg_2 . Аналогичный подход уже используется, к примеру, для упрочнения Ti/Al-композитов за счет формирования различных алюминидов титана на интерфейсе разнородных слоев [9].

Цель работы – изучение прочностных свойств и электросопротивления сильно деформированных образцов Cu/Mg-композитов, а также сопоставление результатов экспериментов с теоретической оценкой на основе известных представлений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе были получены и исследовались образцы трех композитов. В первом композите магниевая сердцевина была окружена медной оболочкой; в медной матрице другого композита находилось 7 магниевых

волокон. Третий композит содержал 49 магниевых волокон. Далее для упрощения записи, количество магниевых волокон в исследуемых композитах будет указываться в обозначении, к примеру: Cu/49Mg-композит.

Схематическое изображение процесса получения композитов представлено на рис. 1. Пруток из магния диаметром 12 мм плотно вставлялся в медный стакан с наружным диаметром 18 мм, который вытачивали на токарном станке из меди марки М0. Эта сборка помещалась в рабочий контейнер установки высокого давления. Гидроэкструзия осуществлялась при комнатной температуре: сначала – через матрицу диаметром 10 мм, затем – последовательно через матрицы 6 мм и 3 мм. Таким образом был получен Cu/1Mg-композит (левая часть рис. 1).

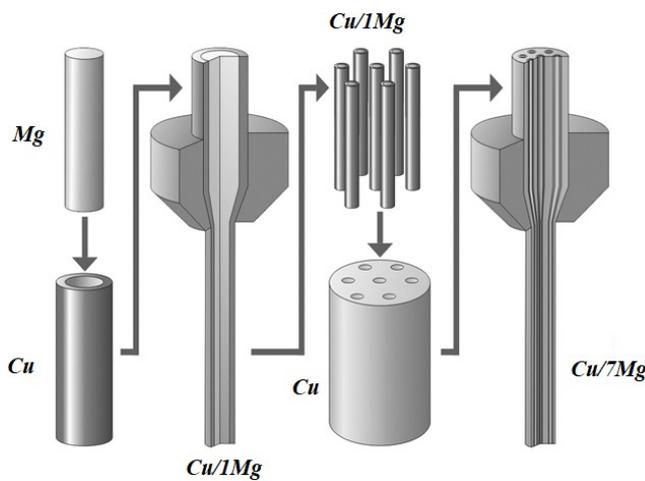


Рис. 1. Схематическое изображение процесса получения исследуемых композитов с 1 и 7 магниевыми волокнами в медной матрице

Для изготовления Cu/7Mg-композита вновь был взят медный пруток с наружным диаметром 18 мм. В торце медной заготовки по окружности радиусом 5,5 мм было просверлено 6 отверстий диаметром 3 мм на равных расстояниях друг от друга. Еще одно такое же отверстие было сделано в центре этой заготовки. В каждое из 7 отверстий помещались отрезки прутка диаметром 3 мм из Cu/1Mg-композита. Затем эта медно-магниевая сборка также подвергалась гидроэкструзии, последовательно через матрицы 10 мм, 6 мм и 3 мм. Таким образом был получен Cu/7Mg-композит (правая часть рис. 1). Для получения Cu/49Mg-композита в медную заготовку с 7 отверстиями вставлялись прутки Cu/7Mg-композита и операция гидроэкструзии повторялась. Соотношение

компонентов в полученных композитах приведено в таблице 1.

Этапы гидроэкструзии прутков до Ø3 мм и их дальнейшего волочения для получения проволоки были одинаковыми. Для исследования свойств в работе использовались образцы двух диаметров: Ø1,5 мм – для механических испытаний и Ø0,25 мм – для резистометрии. Истинная деформация образцов (ε) определялась как

$$\epsilon = \ln \left(\frac{S_0}{S_{обр}} \right), \quad (1)$$

где S_0 – площадь исходной заготовки Ø18 мм; $S_{обр}$ – площадь соответствующего образца.

В начале каждого этапа медная матрица и магниевые вставки (или заготовки из Cu/Mg-композитов) отжигались при температуре 200 °С в течение 1 часа. Как было показано нами ранее [10], такой обработки достаточно для прохождения в меди процессов рекристаллизации. Структура и текстура деформированного магния изучалась нами в работах [11; 12]. Обнаружено, что термообработка магния в интервале 150–200 °С приводит к аномалии: после отжига деформированных образцов их прочностные свойства даже несколько возрастают, пластичность при этом сохраняется. Это объясняется перестройкой дислокационной структуры и термоактивированной блокировкой определенных дислокаций [12]. Более того, установлено [13], что медленное формирование интерметаллидной фазы $CuMg_2$ на Cu/Mg-интерфейсе начинается только при температурах выше 215 °С. На основе вышеизложенного мы пришли к выводу, что термообработка при 200 °С позволяет отжечь Cu/Mg-композит без формирования на поверхности раздела его компонентов каких-либо новых фаз. Таким образом, истинная деформация образцов всех композитов была одинакова и, в соответствии с расчетом по формуле (1), составляла: для механических испытаний $\epsilon \approx 5,0$; для резистометрии $\epsilon \approx 8,6$.

Электрические свойства композитов изучались с использованием стандартного четырехконтактного метода при постоянном токе 20 мА. Погрешность измерения величины удельного электросопротивления составляет $\pm 0,04 \times 10^{-8}$ Ом·м [14]. Механические испытания на растяжение проводились на машине Instron 5982 при скорости растяжения 3 мм/мин. На каждую точку испытывалось не менее 5 образцов, длина рабочей части которых составляла 30 мм.

Для изучения микроструктуры композитов использовался сканирующий электронный микроскоп QUANTA 200.

Таблица 1. Содержание компонентов в исследованных Cu/Mg-композитах

Композит	Количество волокон Mg в композите	Среднее содержание компонентов					
		Объемная доля, %		Массовые %		Атомные %	
		Cu	Mg	Cu	Mg	Cu	Mg
Cu/1Mg	1	55,5	44,5	86,4	13,6	70,9	29,1
Cu/7Mg	7	91,4	8,6	98,2	1,8	95,3	4,7
Cu/49Mg	49	96,2	3,8	99,2	0,8	98,1	1,9

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Микроструктуры композитов. Фотография двух образцов разного диаметра одножильного композита Cu/1Mg-композита представлена на рис. 2.

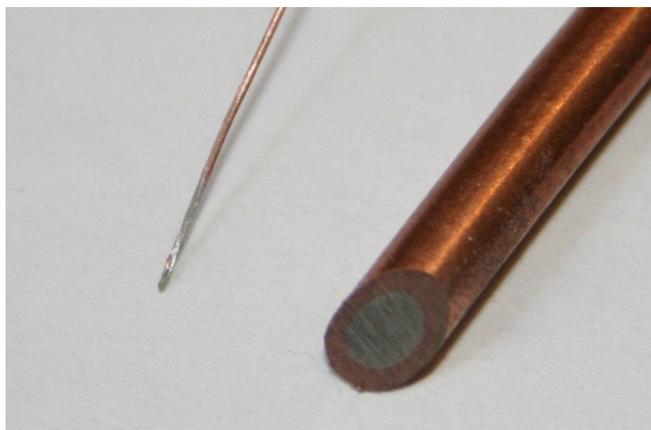


Рис. 2. Внешний вид образцов Cu/1Mg-композита: тонкая проволока Ø0,25 мм после гидроэкструзии и волочения (слева); пруток Ø3 мм после гидроэкструзии (справа)

На снимке (рис. 2) хорошо видно, что магниевая вставка занимает практически половину объема Cu/1Mg-композита. Это согласуется с результатами расчета объемной доли компонентов в этом композите (см. таблицу 1). В левой части рис. 2 находится тонкая композитная проволока Ø0,25 мм. Ее наружная медная оболочка снята специально, чтобы показать блестящую магниевую сердцевину. Резистометрические исследования в нашей работе проводились с использованием таких тонких проволок.

Микроструктуры Cu/7Mg-композита и Cu/49Mg-композита приведены на рис. 3. На снимках хорошо видна практически округлая форма магниевых волокон.

Подобный результат возможен только с использованием гидроэкструзии: в процессе такого воздействия образец находится в условиях всестороннего сжатия. Использование волочения или прокатки резко искажает форму наружных волокон: они становятся овальными ввиду сильного тангенциального течения материала при этих способах деформации.

Сравнение внешнего вида композитов на рис. 3 подтверждает результаты расчетов в таблице 1: объемная доля магния в образцах резко снижается при увеличении количества волокон с 7 до 49. Однако, как было указано выше, в формировании физико-механических свойств композитных материалов большую роль играет не только соотношение объемных долей компонентов. В нашем случае, когда мы планируем упрочнять композит за счет выделения интерметаллидных фаз на границе раздела, основную роль играет площадь интерфейса, точнее, его объемная доля в образце. Она вычисляется как отношение площади поверхности раздела к объему образца. В нашем случае решение можно упростить: объемная доля интерфейса вычислялась как отношение суммы периметров всех магниевых волокон к площади поперечного сечения образца. Полученные результаты сведены в таблицу 2.

Из таблицы 2 можно сделать неожиданный вывод: несмотря на скачкообразное, резкое снижение объемной доли магния при увеличении в композите количества магниевых волокон, объемная доля Cu/Mg-интерфейса при этом растет. Еще более сильная зависимость наблюдается при уменьшении диаметра образца: при переходе от исходной заготовки Ø18 мм к проволочному образцу для резистометрии Ø0,25 мм во столько же раз (т. е. практически на два порядка) возрастает объемная доля интерфейса.

Методы оценки прочностных свойств и электросопротивления композитов. В настоящее время существуют подходы, которые призваны оценить физико-механические свойства биметаллических композитов. К примеру, в работе [15] обсуждается «правило смесей» (the rule of mixtures), с использованием которого можно

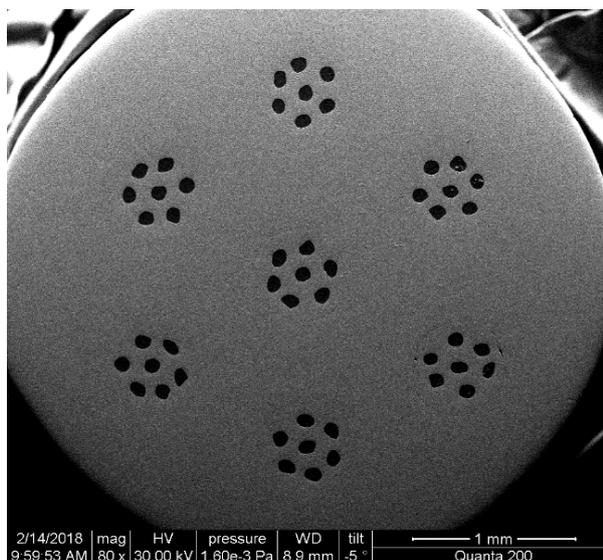
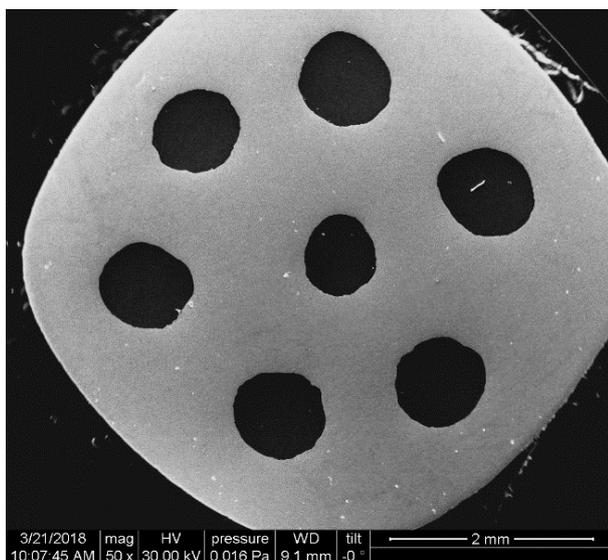


Рис.3. Микроструктуры Cu/7Mg-композита (а) и Cu/49Mg-композита (б) после гидроэкструзии при комнатной температуре

Таблица 2. Диаметр магниевых волокон и объемная доля Cu/Mg-интерфейса в образцах исследованных композитов

Композит	Исходное состояние, Ø18 мм		Образцы для механических испытаний, Ø1,5 мм		Проволока для резистометрии, Ø0,25 мм	
	Диаметр магниевое волокна, мм	Объемная доля Cu/Mg-интерфейса, мм ⁻¹	Диаметр магниевое волокна, мм	Объемная доля Cu/Mg-интерфейса, мм ⁻¹	Диаметр магниевое волокна, мм	Объемная доля Cu/Mg-интерфейса, мм ⁻¹
Cu/1Mg	12,00	0,15	1,000	1,78	0,170	10,87
Cu/7Mg	2,00	0,17	0,170	2,11	0,028	12,53
Cu/49Mg	0,33	0,20	0,028	2,44	0,005	15,67

рассчитать прочностные свойства композитов. У этого подхода есть свои ограничения: «правило» не работает при наноразмерных толщинах композитов, и, кроме того, на интерфейсе компонентов не должно формироваться каких-либо новых фаз.

Полученные в данной работе Cu/Mg-композиты удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Как следует из таблицы 2, магниевое волокно имеет минимальный размер в Cu/49Mg-композите: в образцах для механических испытаний Ø1,5 мм его диаметр составляет ~28 мкм, а в тонких проволоках Ø0,25 мм для резистометрии ~Ø5 мкм. Поэтому мы пришли к выводу о возможности использования «правила смесей» для оценки пределов текучести деформированных композитов.

С учетом изложенных в работе [15] представлений, предел текучести Cu/Mg-композита ($\sigma_{0,2}^{Cu/Mg}$) можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{0,2}^{Cu/Mg} = V_{Cu} \times \sigma_{0,2}^{Cu} + V_{Mg} \times \sigma_{0,2}^{Mg}, \quad (2)$$

где V_{Cu} и V_{Mg} – объемные доли меди и магния (при этом $V_{Cu} + V_{Mg} = 1$);

$\sigma_{0,2}^{Cu}$ и $\sigma_{0,2}^{Mg}$ – соответствующие пределы текучести.

Аналогичный подход позволяет оценить удельное электросопротивление, что ранее было показано на примере слоистых Cu/V-композитов [3]. Электросопротивление в данном случае можно вычислить, исходя из известной формулы для параллельно соединенных проводников. В данном случае проводниками являются компоненты композита, при этом необходимо учитывать объемную долю каждого из них. Естественно, что такой подход применим только в том случае, если на интерфейсе компонентов композита не имеется каких-либо дополнительных фаз.

Расчет величины удельного электросопротивления деформированных Cu/Mg-композитов ($\rho^{Cu/Mg}$) прово-

дился в соответствии с методикой из работы [3] с использованием формулы

$$1/\rho^{Cu/Mg} = V_{Cu}/\rho^{Cu} + V_{Mg}/\rho^{Mg}, \quad (3)$$

где V_{Cu} и V_{Mg} – объемные доли меди и магния; ρ^{Cu} и ρ^{Mg} – удельное электросопротивление меди и магния в сильно деформированном состоянии.

Очевидно, что для проведения расчетов необходимо знать объемные доли компонентов. Они были рассчитаны для каждого исследованного композита, исходя из соотношения диаметра медной заготовки и диаметров магниевых вставок (таблица 1). На основе этих расчетов была проведена теоретическая оценка плотности каждого из образцов. Полученные величины плотностей композитов были проверены экспериментально, путем измерения массы и объема образцов; все результаты сведены в таблицу 3. В целом сопоставление экспериментальной и расчетной плотностей композитов показывает приблизительно одинаковую точность наших оценок объемных долей меди и магния в каждом из образцов.

Подбор экспериментальных данных для проведения расчетов. Очевидно, что для проведения расчетов необходимо знать физико-механические свойства компонентов исследуемого композита. В работе [15] особо подчеркивается, что адекватная оценка по «правилу смесей» может быть достигнута только в том случае, если известны свойства компонентов после точно таких же деформационных воздействий, с применением которых был получен сам композит.

Ранее нами проводились эксперименты по определению механических свойств образцов сильно деформированной меди [16]. Предел текучести меди после волочения ($\epsilon \approx 2,3$) составлял $\sigma_{0,2}^{Cu} \approx 350$ МПа. Механические свойства магния после гидроэкструзии и волочения с суммарной деформацией $\epsilon \approx 3,2$ определялись

Таблица 3. Физико-механические свойства деформированных композитов

Композит	Плотность, г/см ³		Удельное электросопротивление, ρ , 10^{-8} Ом м ($\epsilon \approx 8,6$)		Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа ($\epsilon \approx 5,0$)	
	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
Cu/1Mg	5,5	5,7	2,35	2,52	290	250
Cu/7Mg	7,7	7,5	2,07	2,08	322	307
Cu/49Mg	8,8	8,6	1,88	1,87	359	341

в работе [17]. Предел текучести таких сильно деформированных магниевых прутков составлял $\sigma_{0,2}^{Mg} \approx 125$ МПа.

Именно эти данные были использованы для оценки предела текучести образцов исследованных композитов по формуле (2). Результаты расчетов сведены в таблицу 3. В этой же таблице приведены экспериментальные данные по результатам механических испытаний на растяжение образцов исследованных композитов.

При оценке удельного электросопротивления Cu/Mg-композитов значение электросопротивления меди после ИПД ($e \approx 6,0$) было взято из работы [16]: оно составляет $\rho = 1,83 \times 10^{-8}$ Ом·м. Эти данные были получены нами ранее, при исследовании структуры и свойств сплавов на медной основе. Удельное электросопротивление магния после ИПД удалось найти в работе [18] для прокатанных образцов: $\rho = 4,77 \times 10^{-8}$ Ом·м. Значений электросопротивления магния после ИПД методом гидрокстрезии найти в литературе не удалось. Мы считаем, что в данном случае это не играет большой роли: как известно, при параллельном соединении проводников определяющий вклад вносит проводник с наименьшим электросопротивлением.

Результаты расчетов по формуле (3) удельного электросопротивления исследуемых композитов и соответствующие экспериментальные результаты также представлены в таблице 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе сопоставления полученных данных можно сделать вывод, что использование предварительных расчетов позволяет с приемлемой точностью оценить физико-механические свойства композита. Как хорошо видно из таблицы 3, наибольшее соответствие между результатами расчетов и экспериментальными данными наблюдается для образцов Cu/7Mg- и Cu/49Mg-композитов. К примеру, в соответствии с формулой (2) предел текучести Cu/1Mg-композита был оценен как $\sigma_{0,2}^{Cu/Mg} \approx 250$ МПа. Механические испытания выявили достаточно большое отличие экспериментального результата от расчетных значений для одножильного композита (таблица 3). Экспериментальный предел текучести образцов Cu/1Mg-композита составляет $\sigma_{0,2} = 290$ МПа, т. е. в действительности он оказался прочнее практически на 14 %. Можно предположить, что такой результат вызван различиями деформационного течения меди с ГЦК кристаллической решеткой и магния с ГПУ-решеткой. Кстати, к такому же выводу пришли авторы работы [15]: результаты их расчетов для композитов из двух алюминиевых сплавов практически совпадали с экспериментом, но сильно расходились при работе с Al/Mg-композитом. В свою очередь, экспериментальный ($\sigma_{0,2} = 322$ МПа) и теоретический ($\sigma_{0,2} \approx 330$ МПа) пределы текучести Cu/7Mg-композита оказались близки. Вероятно, в данном случае прочностные свойства образцов в основном определяются медной матрицей, а вклад магния незначителен ввиду малости его объема. По этой же причине достаточно близки экспериментальные данные и результаты расчетов для Cu/49Mg-композита.

Вычисленное на основе формулы (3) удельное электросопротивление деформированного Cu/1Mg-композита составляет: $\rho^{Cu/1Mg} \approx 2,52 \times 10^{-8}$ Ом·м; при увеличении

содержания меди в Cu/7Mg-композите оно закономерно падает до $\rho^{Cu/7Mg} \approx 1,93 \times 10^{-8}$ Ом·м. Экспериментальная проверка проведенных расчетов показала, что после ИПД по использованной нами схеме ($e \approx 8,6$) удельное электросопротивление Cu/1Mg-композита составляет $\rho^{Cu/1Mg} = 2,35 \times 10^{-8}$ Ом·м. Сравнение результатов выявило неплохое соответствие удельного электросопротивления образцов Cu/1Mg-композита с расчетными данными (расхождение составляет ~ 7 %). Теоретическое значение удельного электросопротивления деформированных Cu/7Mg- и Cu/49Mg-композитов практически не отличается от экспериментальных результатов.

В конце обсуждения хотелось бы несколько подробнее остановиться на результатах, полученных для Cu/49Mg-композита. Казалось бы, с увеличением содержания меди точность модельных оценок должна возрастать, поскольку вклад от магния становится минимальным. Однако экспериментальный предел текучести Cu/49Mg-композита ($\sigma_{0,2} = 359$ МПа) даже превысил значения для чистой меди, которые мы брали для своих расчетов ($\sigma_{0,2} = 350$ МПа). Экспериментальное удельное электросопротивление этого композита несколько превышает расчетное, чем сильно отличается от двух других исследованных композитов. Мы полагаем, что в Cu/49Mg-композите с малым размером магниевых волокон и значительной объемной долей Cu/Mg-интерфейса, все большую роль начинают играть процессы, влиянием которых в двух других композитах можно пренебречь. В данном случае речь идет о вызванном ИПД механосплавлении на границе раздела: тонкие приповерхностные слои каждого из компонентов начинают обогащаться атомами друг друга. Такие эффекты наблюдались ранее неоднократно (КПВД) разнородных порошков [19]. Используемые нами деформационные воздействия ($e \approx 8,6$) сопоставимы с деформацией КПВД. Размер магниевых волокон (~ 5 мкм) также близок к использованным в работе [19] порошкам. Если предположить, что толщина образовавшегося при ИПД приповерхностного слоя новой фазы на медно-магниевой основе составляет один-два микрометра, этого будет достаточно для изменения физико-механических свойств Cu/49Mg-композита. Эту гипотезу достаточно легко проверить путем увеличения количества магниевых волокон при одновременном уменьшении их размера. Мы уже движемся в этом направлении: нами получен Cu/Mg-композит, который содержит около одного миллиона тонких магниевых волокон. Обнаруженное явление и предложенное объяснение представляют несомненный интерес с точки зрения формирования структуры на поверхности раздела композитов.

Следует отметить, что в последнее время стали появляться работы по изучению Cu/Mg-композитов с точки зрения их использования в водородной энергетике [20]. Таким образом, полученные в данной работе результаты представляют интерес для различных практических применений.

ВЫВОДЫ

1. Использование расчетов физико-механических свойств металлических композитов по «правилу смесей» позволяет получить результаты, близкие

к экспериментальным лишь при большой разнице объемных долей компонентов.

2. Оценка физико-механических свойств металлических композитов по «правилу смесей» имеет существенно больше ограничений, чем считалось ранее.

3. Полученные в данной работе результаты можно использовать при разработке новых подходов к созданию высокопрочных композитных проводников.

Изучение структуры образцов проводилось в ОЭМ ЦКП УрО РАН, механические испытания выполнялись в ОМИ ЦКП УрО РАН.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Давление», № АААА-А18-118020190104-3) и при частичной поддержке УрО РАН (проект № 18-10-2-24).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Осинцев О.Е., Федоров В.Н. Медь и медные сплавы. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
- Дерягина И.Л., Попова Е.Н., Валова-Захаревская Е.Г., Патраков Е.И. Структура и термическая стабильность высокопрочного нанокompозита Cu-18Nb в зависимости от степени деформации // Физика металлов и металловедение. 2018. Т. 119. № 1. С. 99–108.
- Wang P.P., Wang X.J., Du J.L., Ren F., Zhang Y., Zhan X., Fu E.G. The temperature and size effect on the electrical resistivity of Cu/V multilayer films // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 126. P. 294–301.
- Ko Y.G., Namgung S., Lee B.U., Shin D.H. Mechanical and electrical responses of nanostructured Cu-3 wt %Ag alloy fabricated by ECAP and cold rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 504. № Suppl. 1. P. S448–S451.
- Kim G., Chai X., Yu L., Cheng X., Gianola D.S. Interplay between grain boundary segregation and electrical resistivity in dilute nanocrystalline Cu alloys // *Scripta Materialia*. 2016. Vol. 123. P. 113–117.
- Zhao S., Zheng Z., Huang Z., Dong S., Luo P., Zhang Z., Wang Y. Cu matrix composites reinforced with aligned carbon nanotubes: Mechanical, electrical and thermal properties // *Materials Science and Engineering A*. 2016. Vol. 675. P. 82–91.
- Исламгалиев Р.К., Нестеров К.М., Валиев Р.З. Структура, прочность и электропроводность медно-го сплава системы Cu-Cr, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 2. С. 219–228.
- Wang F., Wakoh K., Li Y., Ito S., Yamanaka K., Koizumi Y., Chiba A.. Study of microstructure evolution and properties of Cu-Fe microcomposites produced by a pre-alloyed powder method // *Materials and Design*. 2017. Vol. 126. P. 64–72.
- Lyu S., Sun Y., Ren L., Xiao W., Ma C. Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti-Al multilayered composites // *Intermetallics*. 2017. Vol. 90. P. 16–22.
- Костина А.Е., Волков А.Ю. Влияние длительных отжигов на структуру и свойства деформированного сплава Cu-8at.%Pd // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 76–83.
- Комкова Д.А., Волков А.Ю. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3. С. 70–75.
- Комкова Д.А., Волков А.Ю. Температурная аномалия прочностных свойств в деформированной магниевой фольге // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. № 12. С. 11–17.
- Nonaka K., Sakazawa T., Nakajima H. Reaction Diffusion in Mg-Cu System // *Materials Transactions, JIM*. 1995. Vol. 36. № 12. P. 1463–1466.
- Volkov A.Yu., Novikova O.S., Antonov B.D. The kinetics of ordering in an equiatomic CuPd alloy: A resistometric study // *Journal Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 581. P. 625–631.
- Feng B., Xin Y., Sun Z., Yu H., Wang J., Liu Q. On the rule of mixtures for bimetal composites // *Materials Science and Engineering A*. 2017. Vol. 704. P. 173–180.
- Волков А.Ю., Новикова О.С., Костина А.Е., Антонов Б.Д. Изменение электрических и механических свойств меди при легировании палладием // *Физика металлов и металловедение*. 2016. Т. 117. № 9. С. 977–986.
- Volkov A.Yu., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing // *Materials Science and Engineering A*. 2015. Vol. 627. P. 56–60.
- Эйдензон М.А. Магний. М.: Металлургия, 1969. 352 с.
- Толмачев Т.П., Пилюгин В.П., Анчаров А.И., Чернышев Е.Г., Пацелов А.М. Образование, структура и свойства сплавов системы Au-Co, полученных интенсивной пластической деформацией под давлением // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 2. С. 155–162.
- Tanaka K., Nishino D., Hayashi K., Ikeuchi S., Kondo R., Takeshita H.T. Formation of Mg₂Cu at low temperature in Mg/Cu super-laminate composites during initial hydrogenation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. № 35. P. 22502–22510.

REFERENCES

- Osintsev O.E., Fedorov V.N. *Med' i mednye splavy* [Copper and copper alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 336 p.
- Deryagina I.L., Popova E.N., Valova-Zaharevskaya E.G., Patrakov E.I. Structure and thermal stability of high-strength Cu-18Nb composite depending on the degree of deformation. *Physics of metals and metallography*, 2018, vol. 119, no. 1, pp. 99–108.
- Wang P.P., Wang X.J., Du J.L., Ren F., Zhang Y., Zhan X., Fu E.G. The temperature and size effect on the electrical resistivity of Cu/V multilayer films. *Acta Materialia*, 2017, vol. 126, pp. 294–301.
- Ko Y.G., Namgung S., Lee B.U., Shin D.H. Mechanical and electrical responses of nanostructured Cu-3 wt%Ag alloy fabricated by ECAP and cold rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 504, no. Suppl. 1, pp. S448–S451.
- Kim G., Chai X., Yu L., Cheng X., Gianola D.S. Interplay between grain boundary segregation and electrical resistivity in dilute nanocrystalline Cu alloys. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 123, pp. 113–117.
- Zhao S., Zheng Z., Huang Z., Dong S., Luo P., Zhang Z., Wang Y. Cu matrix composites reinforced with aligned

- carbon nanotubes: Mechanical, electrical and thermal properties. *Materials Science and Engineering A*, 2016, vol. 675, pp. 82–91.
7. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Valiev R.Z. Structure, strength, and electric conductivity of a Cu-Cr copper-based alloy subjected to severe plastic deformation. *Physics of metals and metallography*, 2015, vol. 116, no. 2, pp. 209–218.
 8. Wang F., Wakoh K., Li Y., Ito S., Yamanaka K., Koizumi Y., Chiba A.. Study of microstructure evolution and properties of Cu-Fe microcomposites produced by a pre-alloyed powder method. *Materials and Design*, 2017, vol. 126, pp. 64–72.
 9. Lyu S., Sun Y., Ren L., Xiao W., Ma C. Simultaneously achieving high tensile strength and fracture toughness of Ti/Ti-Al multilayered composites. *Intermetallics*, 2017, vol. 90, pp. 16–22.
 10. Kostina A.E., Volkov A.Yu. The influence of prolonged annealing on the structure and properties of the deformed Cu-8at.%Pd alloy. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 76–83.
 11. Komkova D.A., Volkov A.Yu. Magnesium structure and texture after the low-temperature megaplastic deformation. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 70–75.
 12. Komkova D.A., Volkov A.Yu. Temperature anomaly of strength properties in deformed magnesium foil. *Metal science and heat treatment*, 2017, vol. 59, no. 11-12, pp. 755–760.
 13. Nonaka K., Sakazawa T., Nakajima H. Reaction Diffusion in Mg-Cu System. *Materials Transactions, JIM*, 1995, vol. 36, no. 12, pp. 1463–1466.
 14. Volkov A.Yu., Novikova O.S., Antonov B.D. The kinetics of ordering in an equiatomic CuPd alloy: A resistometric study. *Journal Alloys and Compounds*, 2013, vol. 581, pp. 625–631.
 15. Feng B., Xin Y., Sun Z., Yu H., Wang J., Liu Q. On the rule of mixtures for bimetal composites. *Materials Science and Engineering A*, 2017, vol. 704, pp. 173–180.
 16. Volkov A.Yu., Novikova O.S., Kostina A.E., Antonov B.D. Effect of alloying with palladium on the electrical and mechanical properties of copper. *Physics of metals and metallography*, 2016, vol. 117, no. 9, pp. 945–954.
 17. Volkov A.Yu., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 627, pp. 56–60.
 18. Eydenzon M.A. *Magniy* [Magnesium]. Moscow, Metallugriya Publ., 1969. 352 p.
 19. Tolmachev T.P., Pilyugin V.P., Ancharov A.I., Chernyshov E.G., Patselov A.M. The formation, structure, and properties of the Au-Co alloys produced by severe plastic deformation under pressure. *Physics of metals and metallography*, 2016, vol. 117, no. 2, pp. 135–142.
 20. Tanaka K., Nishino D., Hayashi K., Ikeuchi S., Kondo R., Takeshita H.T.. Formation of Mg₂Cu at low temperature in Mg/Cu super-laminate composites during initial hydrogenation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 35, pp. 22502–22510.

THE COMPARISON OF THE EXPERIMENTAL DATA AND THE EDUCATED ESTIMATES OF STRENGTH AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Cu/Mg COMPOSITES WITH VARIOUS PROPORTIONS OF THE COMPONENTS

© 2018

A.Yu. Volkov, Doctor of Sciences (Engineering), Head of Strength Laboratory

A.A. Kalonov, postgraduate student, research engineer of Strength Laboratory

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg (Russia)

Keywords: metal composites; cuprum-magnesium alloys; strength properties of composites; resistometry; Cu/Mg composites.

Abstract: The existing modeling views allow with particular accuracy to estimate physical and mechanical properties of materials even at the stage of their discussion without long-term procedures of producing and carrying out tests. For example, when estimating composites' properties, currently, "mixture rule" is widely used that allows calculating strength properties and electrical resistance of composites based on the compositions, which are determined by the components' volume ratio. It is evident that the "mixture rule", as all modeling approaches, has its limitations, which the authors would like to estimate using one composite with various volume ratios of the components.

Using the fluid extrusion method, three Cu/Mg composite bars were produced, the copper matrix of which contained 1, 7 and 49 thin magnesium fibers. The educated estimates of strength properties and electrical resistance of the deformed composites were carried out using the "mixture rule". The authors compared the estimated data and the experimental results. It is shown that the fullest conformity of the calculation results with the experimental data can be observed in the composites with 7 and 49 magnesium fibers. In their turn, the estimated strength properties deviate widely from the experiment in the case of practically the same volumes of components in a single-core composite. It is caused by the difference in the mechanisms of deformation of a copper matrix with the FCC lattice and the magnesium HCP-fiber. The results obtained for a composite with the 49 magnesium fibers give the idea of the initial stages of formation of new phases on the Cu/Mg interface in response to the mechanical fusion processes during the severe plastic deformation.

РАЗРУШАЮЩИЕ ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ИЗ-ЗА ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ГАЗОВЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2018

Е.М. Волокобинский, инженер кафедры конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург (Россия)

Ключевые слова: воздушные включения; композиционный материал; сильное электрическое поле; разрушение.

Аннотация: Статья посвящена рассмотрению такого важного явления в радиодеталях, как раскалывание в многокомпонентных материалах. Композиционные материалы являются важным классом радиоматериалов, поэтому улучшение комплекса их свойств носит важное фундаментальное и прикладное значение и является актуальным направлением материаловедения. Совершенствование композиционных материалов способствует их более широкому применению и изготовлению новых радиодеталей. Наряду с совершенствованием характеристик композиционных материалов значительный интерес для материаловедения представляют соединения, в которых применяются другие элементы, например редкоземельные (сплавы с празеодимом или самарием). Исследуется влияние термоупругих напряжений на работоспособность радиодеталей, содержащих композиционные материалы; выявляются физические факторы, наиболее сильно влияющие на функциональную пригодность изделий с композиционными материалами. Перед нами также стояла задача изучить механизмы возникновения и протекания термоупругого пробоя в композиционном материале, содержащем включения, в частности воздушные. Например, композиционный материал на металлической основе содержит десятки включений различного состава. Как правило, в композиционных материалах содержатся и воздушные включения, влияние которых также необходимо учитывать. Электрическая прочность и срок службы деталей из неоднородных композиционных материалов в сильных электрических полях зависят от содержания воздушных включений и их формы. В статье произведен расчет напряженности электрического поля во включениях и вблизи них. Рассмотрен процесс, происходящий в эллипсоидальном включении под действием сильного электрического поля. Проведен анализ относительного влияния формы крупных включений на механизм упрочнения. Отдельно анализируются процессы для мелких и для крупных включений в композиционном материале и их влияние на разрушение деталей из-за разрядов во включениях. Исследовано влияние комбинированного внешнего воздействия (различные температуры и т. д.). Установлено, что в сильных высокочастотных электрических полях тепловыделение вследствие ионизации в воздушных включениях в композиционных материалах может оказаться значительным, и при интенсивном внешнем воздействии могут иметься разрушающие напряжения. Неравномерный нагрев композиционного материала из-за тепловыделения в крупных включениях приводит к появлению разрушающих термоупругих напряжений и к раскалыванию радиодеталей.

ВВЕДЕНИЕ

Разогрев композиционного материала (КМ) в сильном электрическом поле может приводить к появлению разрушающих термоупругих напряжений. Рассматривается эллипсоидальное воздушное включение и производится расчет максимального тепловыделения под действием сильного электрического поля. Если к КМ приложено синусоидальное напряжение, то поле во включении не меняется по синусоидальному закону. Газ во включении пробивается, и в этот момент напряженность поля падает до нуля. В случае эллипсоидального воздушного включения происходят дискретные разряды, если выполняются два условия: заряд, осевший при пробое на поверхности включения, не меняется существенно за время одного периода; скорость изменения поля должна быть такой, чтобы при возрастании напряженности разряд успел погаснуть. В более крупных включениях разряды происходят чаще. Если не учитывать потери во всех включениях, которые пробивались раньше, то потери на пробой в воздушных включениях будут расти пропорционально E^2 .

Если в образцах из КМ имеются только мелкие включения, отсутствуют крупные газовые включения, то можно не учитывать энергию, затрачиваемую на ионизацию газа во включениях, так как она мала. Если в КМ содержатся крупные включения, то в сильных

электрических полях на радиочастотах тепловыделение в них весьма значительно, сопровождается неравномерным нагревом и приводит к раскалыванию изделий. Причиной разрушения КМ являются термоупругие напряжения, вызываемые неравномерным нагревом вследствие тепловыделения при разрядах в крупных включениях.

Неравномерный нагрев КМ из-за тепловыделения в крупных включениях приводит к появлению разрушающих термоупругих напряжений и к раскалыванию радиодеталей [1; 2].

Вопросы КМ сейчас приобретают все большее значение, но не обсуждаются причины наиболее опасного повреждения КМ – растрескивания (раскалывания). В настоящее время известно большое число экспериментальных фактов, которые касаются деформации КМ, вызываемой наличием крупных воздушных включений, но не приводящей к раскалыванию изделий [3–5].

В статье рассматривается пробой в сильном электрическом поле при наличии в КМ крупных газовых включений [6].

Цель работы:

1) изучение закономерностей влияния тепловыделения в исходных газовых включениях КМ на термоупругие напряжения, приводящие к разрушению. Исследование закономерностей влияния исходной структуры

и геометрических размеров формирующихся газовых включений на структуру и механические свойства КМ;

2) расширение области применения КМ благодаря определению влияния газовых включений на прочностные свойства.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках теории термоупругого пробоя произведем расчет максимального тепловыделения вследствие ионизации газа в отдельном газовом включении под действием переменного электрического поля [7].

Пусть в КМ имеется эллипсоидальное воздушное включение с осью вращения, направленной вдоль вектора напряженности электрического поля E [8; 9].

Если напряженность электрического поля мала, то характер изменения электрического поля как в КМ, так и во включении одинаков, и тепловыделение во включении незначительно [10; 11].

Когда напряженность поля велика, то газ в воздушном включении ионизируется [12; 13]. Если к КМ приложено синусоидальное напряжение, то поле во включении уже не будет изменяться по синусоидальному закону [14; 15] (штриховая линия на рис. 1).

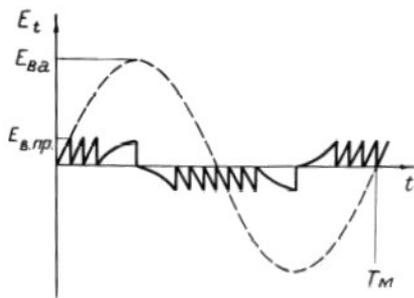


Рис. 1. Изменение напряженности электрического поля во включении со временем на переменном напряжении

Как только напряженность поля во включении E_t достигнет величины внутреннего пробивного напряжения $E_{B,пр}$, газ во включении пробьется, и напряженность поля в нем упадет до нуля [16; 17]. Газ во включении будет пробиваться каждый раз, когда напряженность поля в нем изменяется на величину $\Delta E_B = (+ \text{ или } -) E_{B,пр}$ [18].

Если бы разряды во включении не происходили [19], то амплитудное значение поля в эллипсоидальном включении $E_{B,a}$ равнялось бы

$$E_{B,a} = \frac{E_a}{1 - \frac{\epsilon_B - \epsilon_H}{\epsilon_H} \cdot \frac{K}{4}}$$

где ϵ_B и ϵ_H – диэлектрические проницаемости внутри и вне включения;

E_a – амплитудное значение поля в КМ;

K – функция, зависящая от формы включения.

Величина K определяется формулами:

$$K = f(\sqrt{F}),$$

$$K = f(\lg \sqrt{F}).$$

Обозначим через $E_{пр}$ минимальную напряженность поля в КМ, при которой во включении происходит пробой [20]. За один период T_M во включении будет происходить $4n$ разрядов, где n – целое число, определяемое из условия:

$$n = \frac{E_a}{E_{пр}} - b^* = \frac{E_{B,a}}{E_{B,пр}} - b^*,$$

где b^* – меньше единицы и положительно.

За одну секунду во включении будет происходить N разрядов:

$$N = 4nf,$$

где f – частота переменного поля.

Изменение напряженности электрического поля внутри включения E_t со временем t для случая, когда $E_a/E_{пр} = E_{B,a}/E_{B,пр} = 4$, представлено на рис. 1 ломаной сплошной линией.

В эллипсоидальном воздушном включении будут происходить дискретные разряды, если выполняются два условия. Во-первых, заряд, осевший при пробое на поверхности включения, не должен существенно изменяться за время одного периода, т. е. время релаксации рассеивания зарядов τ должно быть больше $1/f$, $\tau f > 1$. Во-вторых, скорость изменения поля должна быть мала для того, чтобы при возрастании напряженности до $E_{пр}$ разряд успел погаснуть.

В случае соблюдения этих условий можно вычислить выделяющееся во включении тепло.

В момент разряда в эллипсоидальном включении выделяется энергия, равная

$$W_p = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi a^3}{3} \cdot \frac{\epsilon_H^2}{\frac{K}{4} \left[\epsilon_H - (\epsilon_B - \epsilon_H) \frac{K}{4} \right]} \cdot E_{пр}^2,$$

где $\Phi = c^2/a^2$;

a – полуось эллипсоида в направлении вектора напряженности электрического поля E в КМ;

c – перпендикулярная ей полуось.

Так как за одну секунду происходит $4nf$ пробоев, то мощность W , теряемая на разряды во включении, равна

$$W = -2 \frac{\Phi a^3}{3} \cdot \frac{\epsilon_H^2}{\frac{K}{4} \left[\epsilon_H - (\epsilon_B - \epsilon_H) \frac{K}{4} \right]} E_{пр}^2 n f.$$

Обозначая $E_a - b^* E_{пр} = E^*$, запишем:

$$W = -2 \frac{\Phi a^3}{3} \cdot \frac{\epsilon_H^2}{\frac{K}{4} \left[\epsilon_H - (\epsilon_B - \epsilon_H) \frac{K}{4} \right]} E_{пр} E^* f.$$

Разрушение детали цилиндрической формы в электрическом поле происходит при напряжении

$$U_p = E_p L = 3,8 \cdot 10^5 \frac{L}{R} \sqrt{\frac{K}{\epsilon \tan \delta} \cdot \frac{(1-\mu) \sigma_p}{\alpha E_y}}. \quad (1)$$

где σ_p – разрушающее напряжение;
 K – коэффициент теплопроводности КМ;
 E_p – разрушающая напряженность электрического поля;
 L – длина детали;
 R – радиус детали;
 ϵ – диэлектрическая проницаемость;
 $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 μ – коэффициент Пуассона;
 α – коэффициент линейного расширения.

Сила F , вызывающая разрыв детали, находящейся в электрическом поле, может быть определена по формуле

$$F = \pi R^2 \left(\sigma_p - \frac{\epsilon \text{tg}\delta f E^2 \alpha E_y}{1,44 \cdot 10^{11} K (1 - \mu)} \right). \quad (2)$$

где E_y – модуль упругости;
 f – частота электрического поля.

Предельные частоту и напряжение, при которых сила достигает разрушающего значения, следует вычислить по (1) и (2). Необходимо принять меры, чтобы частота и напряжение не превосходили предельного значения.

Необходимо установить такие режимы работы аппаратуры, при которых частота и напряжения не достигают предельного значения (разрушающего).

Можно, разрушив деталь, экспериментально определить, при каких частоте и напряженности электрического поля это произошло. В производственных условиях тогда мы можем подбирать оптимальные значения частоты и напряженности электрического поля в соответствии с (1) и (2), в соответствии с имеющимся оборудованием.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В сильных полях, когда можно пренебречь $E_{\text{пр}}$ по сравнению с E_a , мощность, рассеиваемая во включении, линейно возрастает с увеличением напряженности электрического поля, т. е. с повышением E_a . В рабочих условиях E_a незначительно превосходит $E_{\text{пр}}$, и фактически во включении происходит четыре разряда за один период.

Рассеиваемая во включении мощность при постоянном $E_{\text{пр}}$ линейно возрастает с увеличением частоты. Однако уменьшение $E_{\text{пр}}$ с повышением частоты приводит к более слабой зависимости тепловыделения во включении от частоты. При высоких частотах во включении выделяется несколько меньшая мощность, если при расчетах W подставляется $E_{\text{пр}}$, определяемая на постоянном напряжении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гефле О.С., Лебедев С.М., Ткаченко С.Н. Поведение полимерных композиционных материалов с наполнителем из сегнетоэлектрической керамики в электрическом поле // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 4. С. 64–68.
- Казанчан Г.П., Казанчан А.П., Гаспарян М.С. Влияние барьеров на распределение электрического поля в изоляции // Электричество. 1991. № 5. С. 35–38.
- Sarma G.B., Radhakrishan B., Zacharia T. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Mesoscale // Computational Materials Science. 1992. № 12. С. 105–123.
- Полонский Ю.А., Орданьян С.С., Вихман С.В., Егоров Н.Ю., Егоров В.М. Теплофизические свойства композиционного материала для силовых резисторов на основе часовьярской глины и шунгита // Электротехника. 2007. № 3. С. 38–41.
- Кочергина Ю.А., Карьев Л.Г., Федоров В.А., Плужникова Т.Н. Образование малоразмерных структур в ионных кристаллах при имплантации металла в условиях термоэлектрического воздействия // Материаловедение. 2011. № 10. С. 38–41.
- Карьев Л.Г., Кочергина Ю.А., Мексичев О.А., Федоров В.А., Манухина Д.В. Моделирование состава поверхностей ионных кристаллов, формируемых термоэлектрическим воздействием // Научные технологии. 2012. Т. 13. № 4. С. 23–29.
- Федоров В.А., Кочергина Ю.А., Карьев Л.Г. Поверхностные малоразмерные структуры, образующиеся в ионных кристаллах при легировании металлами под действием тепловых и электрических полей // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2013. Т. 10. № 1. С. 31–34.
- Кочергина Ю.А., Федоров В.А., Карьев Л.Г. Образование поверхностных малоразмерных структур в ЦГК при термоэлектрическом воздействии // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. 2008. Т. 13. № 1. С. 65–66.
- Son S.-B., Roh H., Kang S.H., Chung H.-S., Kim D.H., Choi Y.S., Cho J.S., Moon J.-T., Oh K.H. Relationship microstructure homogeneity and bonding of ultrafine golden wire // Gold Bulletin. 2011. Vol. 44. № 4. P. 231–237.
- Зайцев Ю.С., Кочергин Ю.С., Пактер М.К., Кучер Р.В. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции. Киев: Наукова думка, 1990. 198 с.
- Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 230 с.
- Petrie E.M. Epoxy Adhesive Formulations. USA: McGRAW-HILL, 2006. 536 p.
- Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
- Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Берлин А.А., Иванова-Мумжиева В.Г. Армированные пластики – современные конструкционные материалы // Российский химический журнал. 2001. Т. XLV. № 2. С. 56–74.
- Строганов В.Ф. Молекулярная подвижность в эпоксидных олигомер-полимерных системах. Черноголовка: ИХФ, 1997. 34 с.
- Ричардсон М. Промышленные композиционные материалы. М.: Химия, 1980. 472 с.
- Липатова Ю.С. Физико-химия многокомпонентных полимерных систем. Т. 2. Киев: Наукова думка, 1986. 384 с.
- Васильева В.В., Тарнопольский Ю.М. Композиционные материалы. М.: Машиностроение, 1980. 512 с.
- Альперин В.В., Корольков Н.В., Мотавкин А.В. Конструкционные стеклопластики. М.: Химия, 1979. 360 с.
- Загидуллин А.И., Ефремова А.А., Гарипов Р.М., Дебердеев Р.Я. Влияние реакционноспособных

модификаторов на свойства эпоксидных композиций // Вестник Казанского технологического университета. 2003. № 1. С. 313–319.

REFERENCES

- Gefle O.S., Lebedev S.M., Tkachenko S.N. Behavior of polymeric composite materials with ferroelectric ceramics in electric field. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no. 4, pp. 64–68.
- Kazanchan G.P., Kazanchan A.P., Gasparyan M.S. The influence of barriers on the distribution of the electric field in insulators. *Electrical technology USSR*, 1991, no. 2, pp. 79–84.
- Sarma G.B., Radhakrishnan B., Zacharia T. Finite Element Simulations of Cold Deformation at the Meso-scale. *Computational Materials Science*, 1992, no. 12, pp. 105–123.
- Polonskii Yu.A., Ordan'yan S.S., Vikhman S.V., Egorov N.Yu., Egorov V.M. The thermophysical properties of composite material for power resistors based on Chasovyar clay and schungite. *Russian Electrical Engineering*, 2007, vol. 78, no. 3, pp. 143–145.
- Kochergina Yu.A., Karyev L.G., Fedorov V.A., Pluzhnikova T.N. Formation of low-dimensional structures in ionic crystals during implantation of metal under thermoelectric treatment. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 271–274.
- Karyev L.G., Kochergina Yu.A., Meksichev O.A., Fedorov V.A., Manukhina D.V. Modelling condition surfaces of ionic crystals, formed by thermoelectric influence. *Naukoemkie tekhnologii*, 2012, vol. 13, no. 4, pp. 23–29.
- Fedorov V.A., Kochergina Yu.A., Karyev L.G. Low-dimensional structures of surface formed in ionic crystals during alloying metal under the influence of heat and electric fields. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2013, vol. 10, no. 1, pp. 31–34.
- Kochergina Yu.A., Fedorov V.A., Karyev L.G. Formation of superficial small size structures in alkali halide crystals under thermoelectric influence. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2008, vol. 13, no. 1, pp. 65–66.
- Son S.-B., Roh H., Kang S.H., Chung H.-S., Kim D.H., Choi Y.S., Cho J.S., Moon J.-T., Oh K.H. Relationship between microstructure homogeneity and bonding of ultrafine golden wire. *Gold Bulletin*, 2011, vol. 44, no. 4, pp. 231–237.
- Zaytsev Yu.S., Kochergin Yu.S., Pakter M.K., Kucher R.V. *Epoksidnye oligomery i kleevye kompozitsii* [Epoxy oligomers and glue compositions]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 198 p.
- Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Yu.V. *Epoksidnye polimery i kompozitsii* [Epoxy polymers and compositions]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 230 p.
- Petrie E.M. *Epoxy Adhesive Formulations*. McGRAW-HILL, 2006. 536 p.
- Mikhaylin Yu.A. *Konstruksionnye polimernye kompozitsionnye materialy* [Structural polymer composite materials]. Sankt Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2008. 822 p.
- Zelenskij E.S., Kuperman A.M., Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G., Berlin A.A. Reinforced plastics are modern structural materials. *Rossiiskij Khimicheskij Zhurnal (Zhurnal Rossijskogo Khimicheskogo Obshchestva Im. D.I. Mendeleeva)*, 2001, vol. 45, no. 2, pp. 56–75.
- Stroganov V.F. *Molekulyarnaya podvizhnost' v epoksidnykh oligomer-polimernykh sistemakh* [Molecular mobility in epoxy oligomer-polymer systems]. Chernogolovka, IKhF Publ., 1997. 34 p.
- Richardson M. *Promyshlennye kompozitsionnye materialy* [Industrial composite materials]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 472 p.
- Lipatova Yu.S. *Fiziko-khimiya mnogokomponentnykh polimernykh sistem* [Physicochemistry of multi-component polymer systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. Vol. 2, 384 p.
- Vasilyeva V.V., Tarnopolsky Yu.M. *Kompozitsionnye materialy* [Composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 512 p.
- Alperin V.V., Korolkov N.V., Motavkin A.V. *Konstruksionnye stekloplastiki* [Structural fiberglass]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 360 p.
- Zagidullin A.I., Efremova A.A., Garipov R.M., Deberdeev R.Ya. Effect of reactive modifiers on the properties of epoxy compositions. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2003, no. 1, pp. 313–319.

THE DESTRUCTIVE THERMOELASTIC STRESSES CAUSED BY HEAT OUTPUT
IN GAZ INCLUSIONS IN COMPOSITE MATERIALS

© 2018

E.M. Volokobinsky, engineer of Chair of Designing and Technology of Production of Radioelectronic Facilities
Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, Saint-Petersburg (Russia)

Keywords: air inclusions; composite material; strong electric field; destruction.

Abstract: The paper considers such important phenomenon in radio components as the cleavage in multicomponent materials. Composite materials are the important class of radio materials, thus the improvement of complex of their properties has the important fundamental and applied significance and is the up-to-date sector of the material science. The improvement of composite materials contributes to their wider application and production of new radio components. Alongside with the composite materials properties' improvement, the compounds where other elements, for example, rare-earth (alloys with praseodymium or samarium) are applied are of considerable interest. The paper studies the influence of thermoelastic stresses on the performance capacity of radio components containing composite materials, identifies physical factors influencing most greatly the operational suitability of the products with the composite materials. The author had an objective to study the mechanisms of initiation and behavior of a thermoelastic breakdown in a composite material containing the inclusions, in particular, air inclusions. For example, metal-based composite material contains dozens of inclusions of various compositions. As a rule, composite materials contain air inclusions the influence of which should be taken into account as well. The electrical strength and the service life of the details produced from the non-homogeneous composite materials within the strong electric fields depend on the content of air inclusions and their shape. The paper presents the calculation of the electric field strength in the inclusions and near them. The author considered the process taking place in an ellipsoidal inclusion under the influence of strong electric field and analyzed the relative influence of large inclusions' shape on the hardening mechanism. The processes for small and large inclusions in a composite material and their influence on the destruction of the details caused by the discharges in the inclusions are considered separately. The influence of complex external action (different temperatures, etc.) is studied. It is identified that the heat generation caused in the strong high-frequency fields by the ionization in air inclusions in composite materials can be significant and, under the strong external actions, the destructive stresses can occur. The uneven heating of a composite material leads to the appearance of destructive thermoelastic stresses and to the cleavage of radio components caused by the heat generation in large inclusions.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛО-, УГЛЕПЛАСТИКОВ И МАТЕРИАЛОВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПО ТЕХНОЛОГИЯМ 3DP И FDM

© 2018

И.В. Злобина, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Техническая механика и детали машин»
Н.В. Бекренев, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин»
С.П. Павлов, доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры «Математика и моделирование»

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

Ключевые слова: аддитивные технологии; порошковые и волокнистые композиционные материалы; полимерная нить; межслоевое взаимодействие; предел прочности; внутренние напряжения; кинетика нагрева; температуропроводность; теплопроводность; тепловое поле.

Аннотация: Композиционные материалы широко используются в воздушных и наземных транспортных системах, хотя и имеют существенный недостаток, заключающийся в значительной анизотропии физико-механических характеристик и малой прочности, особенно при изгибе, сложном деформированном состоянии и в условиях динамических знакопеременных нагрузок. Применение электрофизического и, в частности, СВЧ модифицирования структуры изделий из таких материалов позволяет существенно повысить прочностные характеристики. В связи с сопровождающим воздействием СВЧ электромагнитного поля термическими эффектами для оптимизации технологических режимов модифицирования важно изучить теплофизические характеристики материалов сложного состава и неоднородной структуры для прогнозирования возможных последствий СВЧ воздействия. Авторами выполнены исследования кинетики нагрева, коэффициентов температуро- и теплопроводности образцов, изготовленных из стекло- и углепластика, армированного углеволокном материала с квазиизотропной структурой, аддитивных материалов – пластика *ABS* и композита на основе порошка *Zp130*, пропитанного цианокрилатом *Z-BondTM90*. Изучен нагрев образцов из пластика *ABS* с дополнительной топологической композитной структурой на основе углеродного волокна. Установлено существенное (до 8 раз) различие теплофизических параметров аддитивных пластиков *ABS* и композиционных материалов. В то же время прессованные стекло- и углепластики имеют в 4–6 раз меньшую температуропроводность, чем композит из порошка *Zp130*. Отвержденные композиты с квазиизотропной структурой имеют на порядок и более высокие значения коэффициентов температуро- и теплопроводности, что, по-видимому, связано со значительно большей плотностью структуры. Изложенное подтверждает необходимость при разработке конструкций армированных изделий из аддитивных материалов с топологической структурой и технологий их модифицирования осуществлять подбор компонентов не только по критерию повышения прочности, но и корреляции теплофизических параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике [1; 2]. Композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов [1; 2]. Путем моделирования полей напряжений в сложных по конструкции изделиях выявлена потенциальная возможность повышения их эксплуатационной прочности за счет размещения в составе материала изделия упрочненных областей, ориентация и форма которых коррелируют с формой полей напряжений, возникающих при функционировании изделия [3–5].

Одним из новых путей реализации данной возможности по сравнению с предыдущими исследованиями является оптимизация микроструктуры посредством распределения включений, их ориентации, варьирования объемной доли и формы включений по отношению к заданной целевой функции. Путем внесения арми-

рующих компонентов станет возможным создание элементарных ячеек, которые будут являться наименьшей структурой, периодически повторяющейся в композиционном материале [6; 7]. При изменении объемной доли или формы включений, топологии элементарной ячейки материал будет приобретать различные свойства. Современные аддитивные технологии позволяют формировать трехмерные изделия с оптимальным законом распределения компонентов [8–11]. Данная оптимизация может быть проведена не только путем внесения компонентов, но и их модифицированием путем электрофизических воздействий, что значительно проще реализовать, поскольку процесс является управляемым благодаря регулированию технологических режимов без вмешательства в синтез материала [12–15].

Использование традиционных технологий, тем не менее, для практической реализации данного результата представляется затруднительным, что вызывает необходимость дополнительного исследования в области создания научных основ технологического обеспечения данного решения [16–19].

Цель исследований – изучение кинетики нагрева полимерных композиционных материалов и неметаллических материалов, использующихся в технологиях трех-

мерной печати, для определения их характеристик теплопроводности, позволяющих выработать рекомендации по составу армированных композитов, обеспечивающему оптимальные условия упрочняющей финишной обработки в СВЧ электромагнитном поле.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Были исследованы образцы из стекло-, углепластиков в виде пластин с размерами $80,0 \times 15,0 \times 2,0$ мм, а также сформированные на основе аддитивных технологий: из порошкового материала с последующей стабилизирующей пропиткой (технология *3DP*) и из расплавляемой полимерной нити (технология *FDM*) в виде пластин с размерами $80,0 \times 10,0 \times 7,5$ мм.

В экспериментах с использованием порошкового материала использовали 3D принтер модели *ZPrinter450*. В соответствии с технологией *3DP* из диэлектрического порошка марки *Zp130* формировали образцы в виде стержней длиной 80 мм, диаметром 5,5 мм. Применяли дополнительную пропитку для повышения прочности на основе цианокрилата *Z-BondTM90*.

Для исследования теплофизических характеристик образцов с топологической структурой, полученных путем 3D печати, использовали нить толщиной 1,75 мм из пластика *ABS*, из которой на 3D принтере *Felix 3.1 Single Extruder* формировали пластины соответственно

длиной, шириной и толщиной 120, 40 и 5,0 мм. В соответствии с чертежом в образцах выполнены на противоположных сторонах пазы, заглубленные до средней линии симметрии. При моделировании использовали программную среду *Comsol*, твердотельную модель нагружали растягивающими силами в 1000 Н. Чертеж образца с выявленными полями напряжений выполняли в программной среде *Kompass-3D V.15*, затем полученное трехмерное изображение транслировали в формат *STL* и осуществляли печать. Полости послойно заполняли углеродным волокном производства ООО «Балаково Карбон Продакшн» (г. Балаково Саратовской обл.) и эпоксидной смолой ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Волокна распределяли таким образом, чтобы они без разрывов связывали все полости и углубления, сформированные принтером согласно твердотельной модели. Распределение полей напряжений, 3D модель, сформированная на принтере заготовка и готовый образец представлены на рис. 1.

Для определения теплофизических характеристик образцов применяли метод Паркера в варианте, описанном в [20; 21]. Для нагрева образцов использовали специально разработанную установку с источником в виде прожектора *FL(ИО) 1000 IP54 ИЭК LPI01-1-1000-K01* (Россия) (рис. 2) и механизмом регулирования расстояния от источника теплового излучения до образца.

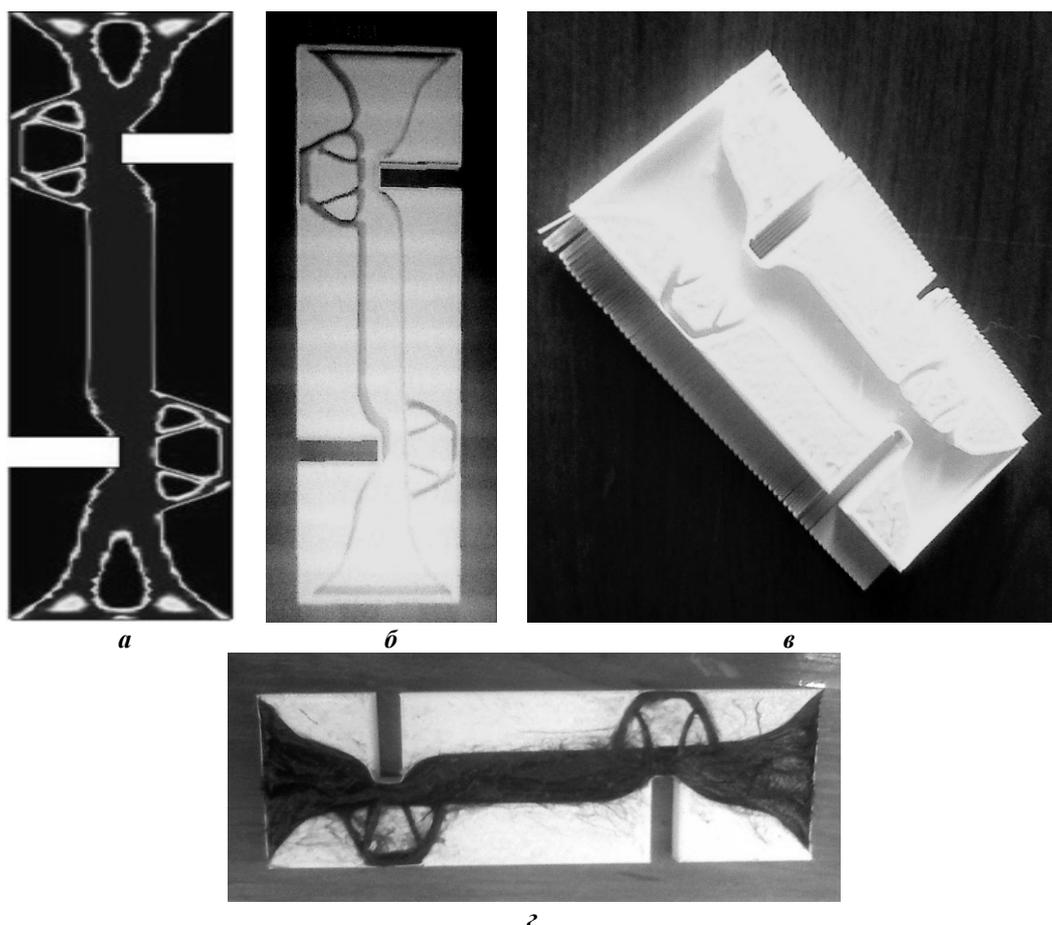


Рис. 1. Образец с топологической композиционной структурой:
а – поле внутренних напряжений при моделировании растяжения;
б – 3D модель образца;
в – заготовка, сформированная на 3D-принтере;
г – образец, армированный углепластиком согласно топологии

Тепловые поля записывали при помощи тепловизора модели FLIR E40 (США) с калибровкой температуры в опорных точках при помощи пирометра Testo 830-T1 (Германия). Источник теплового излучения закрывался металлическим экраном с вертикальной щелью длиной 100 и шириной 8 мм, напротив которой устанавливали образец. Тепловизор размещали за образцом на расстоянии в соответствии с паспортными данными. Нагрев выполняли до появления на экране тепловизора полей, соответствующих температуре 150 °С.

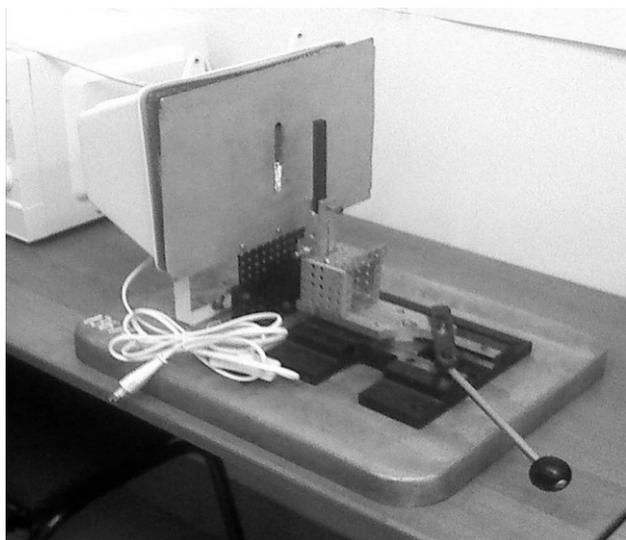


Рис. 2. Экспериментальная установка для нагрева образцов (в оснастке закреплен образец из квазиизотропного углекомпозиата)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализировали тепловые поля для каждого из изучаемых материалов, при этом в соответствии с методикой [21] по термограмме определяли время нагрева образца до температуры, соответствующей половине конечного значения. На основе полученных данных по ниже приведенным зависимостям [21] рассчитывали коэффициенты температуро- и теплопроводности. Для изучения кинетики нагрева с термограммы каждые 10 с снимали значения температуры образца в среднем сечении и на его периферии.

Полученные результаты представлены на рис. 3–5.

Коэффициент теплопроводности получили из следующих формул:

$$\alpha = F_0 \frac{L^2}{\tau_{0,5}},$$

$$T_{st} = \frac{W\alpha}{\lambda L}, \text{ откуда } \lambda = \frac{W\alpha}{T_{st}L},$$

где α – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 $F_0=0,1388$ – число Фурье, коэффициент при времени нагрева $\tau=\tau_{0,5}$;
 L – толщина пластины (образца);

$\tau_{0,5}$ – время достижения половины амплитуды перегрева образца;

T_{st} – избыточная температура (стационарное значение) задней поверхности образца;

W – плотность поглощенной энергии;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/мК.

Анализ термограмм показывает, что за установленный промежуток времени наиболее равномерногреваются образцы из углепластика и порошка Zp130, пропитанного цианокрилатом. Область температур (130–1400) °С занимает почти 2/3 поверхности образца из углепластика и 3/4 поверхности образца из порошка. Для стеклопластика это соотношение не превышает 1/2, а квазиизотропный углекомпозит имеет зональный прогрев: в то время как прилегающая к одной из боковых поверхностей зона имеет температуру около 150 °С и доходит почти до среднего сечения, противоположная сторона нагрета только до 135 °С.

Возможно, наблюдается влияние различной ориентации углеродных волокон, образующих квазиизотропную относительно равнопрочную структуру. В отмеченных зонах волокна имеют взаимноперпендикулярную направленность, что приводит к изменению тепловых потоков и различному количеству поглощенной тепловой энергии. У углепластика, полученного послойной выкладкой, углеродные волокна являются основными проводниками тепла и однонаправлены, что приводит к стабильному тепловому потоку и равномерному нагреву. Композит на основе порошка Zp130 имеет микропористую структуру, заполненную связкой (цианокрилат), свойства которой после отверждения сходны с порошком, поэтому тепловое поле здесь почти равномерно для всей поверхности.

Теплофизические коэффициенты исследованных материалов существенно различаются. Минимальный коэффициент температуропроводности имеет углепластик, в то же время этот коэффициент у квазиизотропного углекомпозита выше почти на 2 порядка. Скорее всего, это может быть связано со значительно меньшей плотностью углепластика, полученного выкладкой слоев армирующих волокон и матрицы. Коэффициент температуропроводности стеклопластика выше, чем у углепластика почти в 2,6 раза и его отличие от данного параметра квазиизотропного углекомпозита – 9 раз. Наиболее близка температуропроводность композита на основе порошка Zp130 и квазиизотропного углекомпозита – различие не превышает 70 %, а коэффициенты теплопроводности различаются не более, чем на 28 %. В целом различие коэффициентов теплопроводности для исследованных материалов качественно повторяет зависимость для температуропроводности. Из графиков кинетики нагрева видно, что наиболее равномерный нагрев образца (по оценке противоположной источнику тепла поверхности) наблюдается для композита на основе порошка Zp130, пропитанного цианокрилатом. При этом температура 140 °С достигается практически через 40 с нагрева. За тот же период времени квазиизотропный композит нагревается до 120 °С, углепластик – до 105 °С, стеклопластик – до 110 °С. Композит на основе порошка Zp130 характеризуется высокой равномерностью прогрева: температуры центральной и периферийной зон отличаются в течение всего цикла не более чем на (5–8) °С. Наибольшую неравномерность

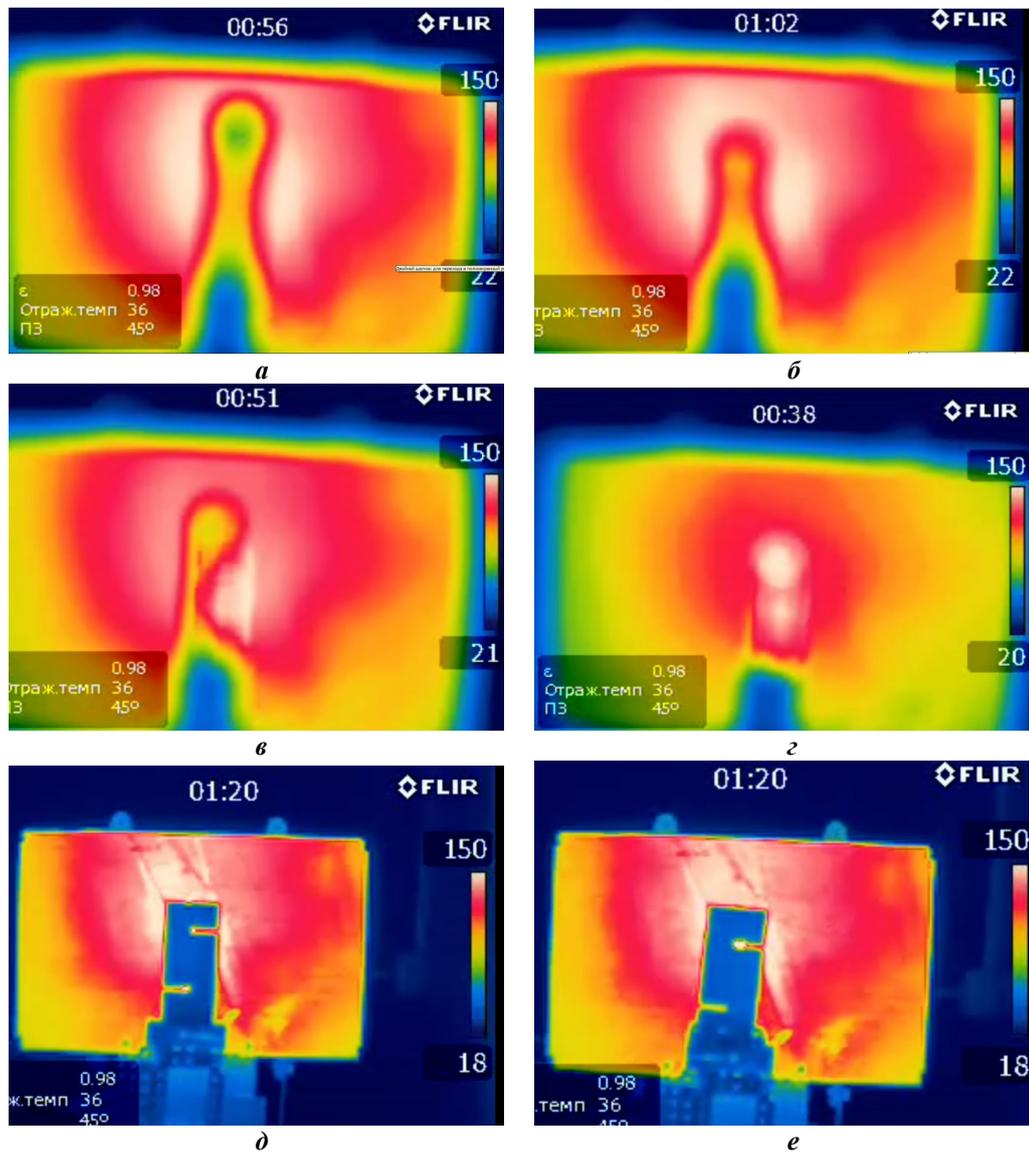


Рис. 3. Термограммы образцов в момент окончания процесса нагрева: стеклопластик (а), углепластик (б), квазиизотропный углекомпозит (в), композит на основе порошка Zr130 (г), термопласт ABS (д), термопласт ABS с армированной композитом на основе углеродных волокон топологической структурой (е)

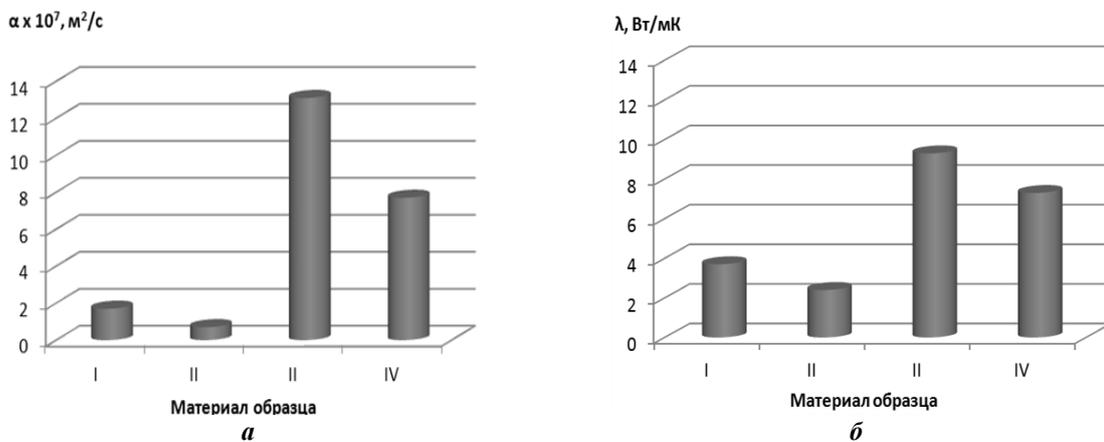


Рис. 4. Значения коэффициентов температуропроводности α (а) и теплопроводности λ (б) различных материалов: I – стеклопластик; II – углепластик; III – квазиизотропный углекомпозит; IV – композит на основе порошка Zr130, сформированный путем трехмерной печати

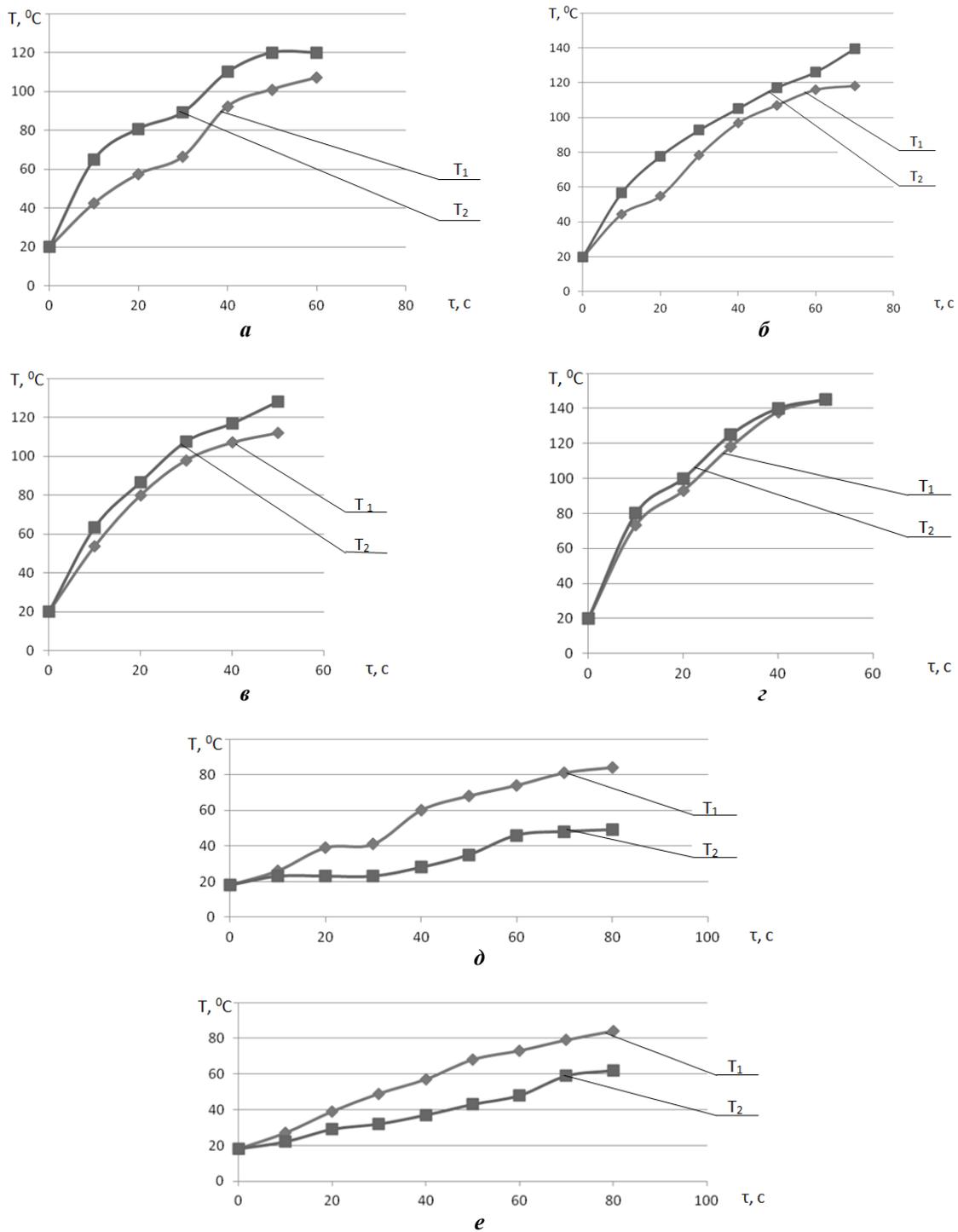


Рис. 5. Кинетика нагрева образцов из композиционных материалов: стеклопластик (а); углепластик (б); квазиизотропный углекомпозит (в); композит на основе порошка Zp130 (г); термопласт ABS (д); термопласт ABS с армированной композитом на основе углеродных волокон топологической структурой (е). T1 – область вблизи оси образца; T2 – боковая поверхность

прогрева имеет образец из стеклопластика. Расхождение значений температур достигает 20 °С.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе анализа полученных результатов можно заключить, что для применяемых в качестве конструкционных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами и волокнами синтетического

стекла, а также аддитивных материалов характерно существенное различие теплофизических параметров, что вызывает необходимость подбора компонентов при упрочнении изделий из аддитивных материалов путем формирования топологических структур. В частности, для упрочнения изделий на основе порошка Zp130 целесообразно применение слоев, подобных квазиизотропному углепластику. При СВЧ модифицировании

стекло- и углепластиков, полученных послойной выкладкой, вследствие их низкой температуро- и теплопроводности необходимо сокращать время воздействия СВЧ электромагнитного поля и его напряженность в рабочей зоне во избежание разогрева поверхностных слоев и у кромок изделия вследствие неизбежных тепловых эффектов, присущих воздействию данного поля на диэлектрические материалы.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «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.
2. Каблов Е.Н. *Материалы и химические технологии для авиационной техники* // *Вестник Российской академии наук*. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
3. Павлов С.П., Крысько В.А. *Оптимизация формы термоупругих тел*. Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. 160 с.
4. Павлов С.П., Жигалов М.В., Балабуха Т.С. *Оптимальное армирование стержней в задачах кручения // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: межвуз. науч. сб.* Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. С. 151–157.
5. Павлов С.П., Пальков Р.С. Влияние свойств межфазового слоя на эффективные механические характеристики нано композитов // *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов (DFMN-2013): материалы V междунар. конф.* М., 2013. С. 554–556.
6. Ahmad A.A., Abdalla M.M., Gurdal Z. *Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Bucking Considerations* // *Journal of Aircraft*. 2010. Vol. 47. № 3. P. 775–782.
7. Nomura T., Dede E.M., Matsumori T., Kawamoto A. *Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method* // *11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. Sydney, 2015. P. 728–733.
8. Bourell D.L., Beaman J.J.Jr., Leu M.C., Rosen D.W. *A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead* // *RapidTech 2009: U.S.-Turkey Workshop on Rapid Technologies*. Erfurt, 2009. P. 5–11.
9. Ehrenberg R. *The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time* // *Science News*. 2013. March 9. P. 20–25.
10. Идрисов Г.И., Кузьмина А.С., Рожкова Е.С., Санатов Д.В., Султанов Д.К. *Новая технологическая революция: вызовы и возможности для России: экспертно-аналитический доклад*. М.: Центр стратегических разработок, 2017. 136 с.
11. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В. *Физическая мезомеханика деформируемого твердого тела как многоуровневой системы. I. Физические основы многоуровневого подхода* // *Физическая мезомеханика*. 2006. Т. 9. № 3. С. 9–22.
12. Архангельский Ю.С. *Справочная книга по СВЧ-электротермии*. Саратов: Научная книга, 2011. 560 с.
13. Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. *Microwave assisted blow molding of polyethyleneterephthalate (PET) bottles* // *Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*. Austin, 2004. P. 33–34.
14. Ибаев М.О., Студенцов В.Н., Черемухина И.В. *Совершенствование технологий полимерной арматуры из реактопластов с применением постоянного электрического поля* // *Дизайн. Материалы. Технология*. 2012. № 5. С. 132–134.
15. Коломейцев В.А., Кузьмин Ю.А., Никуйко Д.Н., Семенов А.Э. *Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа* // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013. Т. 18. № 12. С. 25–31.
16. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. *The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural* // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 870. P. 101–106.
17. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Muldasheva G.K. *Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field* // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1783. P. 020236.
18. Злобина И.В., Бекренев Н.В. *Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий* // *Вестник РГАТУ*. 2017. № 1. С. 236–242.
19. Злобина И.В., Бекренев Н.В. *Исследование изгибной прочности объектов 3D печати из диэлектрических материалов, модифицированных в СВЧ электромагнитном поле* // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. Т. 1. № 1. С. 308–312.
20. Фалилеев А.Д. *Практическая реализация метода Паркера для определения температуропроводности* // *Современные техника и технологии: сб. XVIII междунар. научно-практ. конф.* В 3 т. Т. 3. Томск, 2012. С. 137–138.
21. Вавилов В.П., Торгунаков В.Г., Нестерук Д.А., Маринетти С., Бизон П., Гринцато Э. *Определение теплофизических характеристик материалов методом термографии* // *Известия Томского политехнического университета*. 2006. Т. 309. № 2. С. 130–134.

REFERENCES

1. Kablov E.N. *Innovative development FGUP "VIAM" SSC RF on implementation of the "Strategic directions of development of materials and technologies of their reprocessing for the period till 2030"*. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 3–33.
2. Kablov E.N. *Materials and chemical technology for aircraft engineering*. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 82, № 3, pp. 158–167.
3. Pavlov S.P., Krysko V.A. *Optimizatsiya formy termouprugikh tel* [Shape optimization of thermoelastic bodies]. Saratov, SGTU Publ., 2000. 160 p.
4. Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Balabukha T.S. *Optimal reinforcement rods in problems of torsion*.

- Mezhvuzovskiy nauchnyy sbornik "Problemy prochnosti elementov konstruktiv pod deystviem nagruzok i rabochikh sred"*. Saratov, SGTU Publ., 2009, pp. 151–157.
5. Pavlov S.P., Palkov R.S. The influence of the properties of the interfacial layer on the effective mechanical properties of nano composites. *Materialy V mezhdunar. konf. "Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov (DFMN-2013)*. Moscow, 2013, pp. 554–556.
 6. Ahmad A.A., Abdalla M.M., Gurdal Z. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Bucking Considerations. *Journal of Aircraft*, 2010, vol. 47, no. 3, pp. 775–782.
 7. Nomura T., Dede E.M., Matsumori T., Kawamoto A. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method. *11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*. Sydney, 2015, pp. 728–733.
 8. Bourell D.L., Beaman J.J.Jr., Leu M.C., Rosen D.W. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead. *RapidTech 2009: U.S.-Turkey Workshop on Rapid Technologies*. Erfurt, 2009, pp. 5–11.
 9. Ehrenberg R. The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time. *Science News*, 2013, March 9, pp. 20–25.
 10. Idrisov G.I., Kuzmina A.S., Rozhkova E.S., Sanatov D.V., Sultanov D.K. *Novaya tekhnologicheskaya revolyutsiya: vyzovy i vozmozhnosti dlya Rossii. Ekspertno-analiticheskiy doklad* [New technological revolution: challenges and opportunities for Russia]. Moscow, Tsentr strategicheskikh razrabotok Publ., 2017. 136 p.
 11. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V. Physical mesomechanics of a deformed solid as a multilevel system. I. Physical fundamentals of the multilevel approach. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2006, vol. 9, no. 3, pp. 9–22.
 12. Arkhangelsky Yu.S. *Spravochnaya kniga po SVCh-elektrotermii* [Reference book on microwave electrothermics]. Saratov, Nauchnaya kniga Publ., 2011. 560 p.
 13. Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles. *Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*. Austin, 2004, pp. 33–34.
 14. Ibaev M.O., Studentsov V.N., Cheremukhina I.V. Improvement of technology of polymeric fittings from reaktoplast with use of constant electric field. *Dizayn. Materialy. Tekhnologiya*, 2012, no. 5, pp. 132–134.
 15. Kolomeytssev V.A., Kuzmin Yu.A., Nikuyko D.N., Semenov A.E. Experimental study of the level of uneven heating of dielectric materials and the absorbed power in the microwave resonator-type devices. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2013, vol. 18, no. 12, pp. 25–31.
 16. Zlobina I.V., Bekrennev N.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural. *Solid State Phenomena*, 2016, vol. 870, pp. 101–106.
 17. Zlobina I.V., Bekrennev N.V., Muldasheva G.K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1783, p. 020236.
 18. Zlobina I.V., Bekrennev N.V. Microstructure analysis of structural laminar carbon-fiber composites modified by electro physical effects. *Vestnik RGATU*, 2017, no. 1, pp. 236–242.
 19. Zlobina I.V., Bekrennev N.V. Investigation of the Flexural strength of objects 3D printing of dielectric materials, modified in a microwave electromagnetic field. *Dinamika system, mekhanizmov i mashin*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 308–312.
 20. Falileev A. Practical implementation of the method of Parker to determine the thermal diffusivity. *Sbornik XVIII mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Sovremennaya tekhnika i tekhnologii"*. Tomsk, 2012, vol. 3, pp. 137–138.
 21. Vavilov V.P., Torgunakov V.G., Nesteruk D.A., Marinetti S., Bizon P., Grintsato E. Definition of thermal physical characteristics of materials using IR thermography method. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 309, no. 2, pp. 130–134.

**THE STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF GLASS-, CARBON FIBER MATERIALS
AND MATERIALS PRODUCED BASING ON THE ADDITIVE TECHNOLOGIES
USING 3DP AND FDM TECHNOLOGIES**

© 2018

I.V. Zlobina, PhD (Engineering),
assistant professor of Chair “Engineering Mechanics and Machinery”
N.V. Bekrenev, Doctor of Sciences (Engineering), Professor,
Head of Chair “Engineering Mechanics and Machinery”
S.P. Pavlov, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor,
professor of Chair “Mathematics and modeling”
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov (Russia)

Keywords: additive technologies; powder and fiber composite materials; polymer thread; interlayer interaction; tensile strength; internal stresses; heat kinetics; thermal diffusivity; thermal conductivity; thermal field.

Abstract: Composites are widely used in the air and land transport systems, although they have a significant disadvantage that is a considerable anisotropy of physical and mechanical characteristics and low strength especially under bending, in complex deformed state and under the dynamic alternating loads. The application of the electrophysical and, more specifically, microwave modification of the structure of the products made of such materials allows improving significantly the strength properties. Due to the thermal effects accompanying the influence of the microwave electromagnetic field, to optimize the technological modes of modification, it is important to study thermal characteristics of complex materials with heterogeneous structure for predicting possible effects of microwave exposure. The authors carried out the study of heat kinetics, coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity of the samples made of glass- and carbon fiber materials, carbon fiber reinforced material with a quasi-isotropic structure, additive materials – *ABS* plastic and *Zp130* powder-based composite material impregnated with the *Z-BondTM90* cyanoacrylate. The heating process of samples of carbon fiber-based *ABS* plastics with the additional topological composite structure has been studied. The significant (up to eight times) difference in thermal parameters of the additive *ABS* plastics and composite materials has been determined. At the same time, molded glass- and carbon fiber materials have thermal conductivity 4-6 times lower than the *Zp130* powder-based composites. The cured composites with the quasi-isotropic structure have the values of thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients an order of magnitude and higher, what is apparently caused by the much higher structure density. All these facts confirm the necessity to carry out the selection of the components according to both the strength improvement criterion and the thermal parameters correlation when developing the structures of reinforced products made of additive materials with the topological structure and the technologies of their modification.

ПОРИСТОСТЬ ПРИ РЕМОНТЕ РЕЗЕРВУАРОВ И ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ И МЕРЫ ПО ЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ

© 2018

А.И. Ковтунов, доктор технических наук,

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

Н.Г. Пудовкина, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

А.А. Пудовкин, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

А.М. Масляев, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: пористость сварного шва; ремонт резервуаров; магистральных и технологических трубопроводов; химический состав металла резервуаров и трубопроводов.

Аннотация: При проведении ремонтных работ металлоконструкций резервуаров, магистральных и технологических трубопроводов системы транспорта нефти и нефтепродуктов наблюдается повышенная пористость сварных швов. В качестве причины повышенной пористости рассматривается изменение химического состава и структуры металлов, возникающее под влиянием эксплуатационных факторов, в том числе при контакте с нефтью и нефтепродуктами.

Доминирующими факторами, влияющими на повышенное порообразование при ремонте элементов системы трубопроводного транспорта, описанными ранее в научной литературе с учетом особенностей сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа, являются: повышенное содержание водорода и углерода в сварочной ванне; высокая скорость охлаждения металла, явления деформационного старения ферритно-перлитных сталей и водородного охрупчивания.

Сделаны выводы о причинах повышенной пористости.

Проведены исследования, подтверждающие увеличенное содержание водорода и углерода в металле под влиянием эксплуатационных факторов, причем в металле со стороны контакта с нефтепродуктами массовая концентрация водорода с внутренней стороны образца более чем в два раза выше массовой концентрации водорода с внешней стороны. Содержание углерода со стороны контакта с нефтью превышает содержание углерода с внутренней стороны на 20 %.

На основе проведенного исследования предложен ряд технологических мер по уменьшению пористости в металле шва в производственных условиях ПАО «Транснефть»: увеличение погонной энергии сварки в пределах установленных диапазонов режимов сварки; предварительная термообработка стали, бывшей в эксплуатации, с последующим медленным охлаждением для уменьшения свободного углерода.

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 году в ПАО «Транснефть» была разработана «Программа повышения качества выполнения работ по строительству и ремонту резервуаров стальных для хранения нефти и нефтепродуктов на объектах организаций системы «Транснефть», в которой особое внимание уделяется такому направлению, как проведение анализа и формирование предложений по вопросам повышения качества выполнения строительно-монтажных работ по строительству и ремонту резервуаров на объектах организаций системы «Транснефть» [1].

Несмотря на разнообразие применяемых марок сталей, основную часть трубопроводов и резервуаров, которые находятся в эксплуатации от 15 до 40 лет, изготавливали из низколегированных сталей (10Г2С, 09Г2С, 14ХГС, 19Г, 17ГС, 17Г1С) [2–4]. В настоящее время весьма актуальным является вопрос поддержания работоспособности системы, причем независимо от срока эксплуатации ее отдельных элементов [5–7].

В начальный период эксплуатации состояние резервуаров, магистральных и технологических трубопроводов для транспортирования нефти и нефтепродуктов определяется качеством проектирования и строительства. Влияние этих факторов уменьшается во времени, и доминирующее значение приобретают условия работы системы. В процессе работы изменение техническо-

го состояния транспортной магистрали происходит под воздействием эксплуатационных факторов [8].

Из практики проведения сварочных работ при строительстве и ремонте элементов системы трубопроводного транспорта известно, что повышенная пористость сварных швов наблюдается именно при проведении ремонтных работ. На рис. 1 приведены снимки горизонтальных сварных швов при ремонте резервуаров, полученные при проведении контроля рентгенографическим методом.

Были установлены доминирующие факторы, влияющие на качество сварки, причем основная масса дефектов (свыше 80 %) приходится на поры, шлаковые включения, непровары и их сочетание [9; 10].

Согласно руководящим документам ПАО «Транснефть» РД-25.160.10–КТН-015-15 [11; 12], РД 23.040.00–КТН-386-09 [13], технология сварочно-монтажных работ допускает большой выбор существующих технологий сварки резервуаров и трубопроводов. При проведении ремонтных работ выбор технологии несколько уже, однако и при ремонте, и при проведении строительно-монтажных работ из низколегированных сталей на практике благодаря технологичности и экономичности наиболее часто используется многопроходная механизированная сварка плавящимся электродом (как правило, проволока Св-08Г2С или ее аналоги) в среде защитных газов (как правило, CO₂) [14–16].

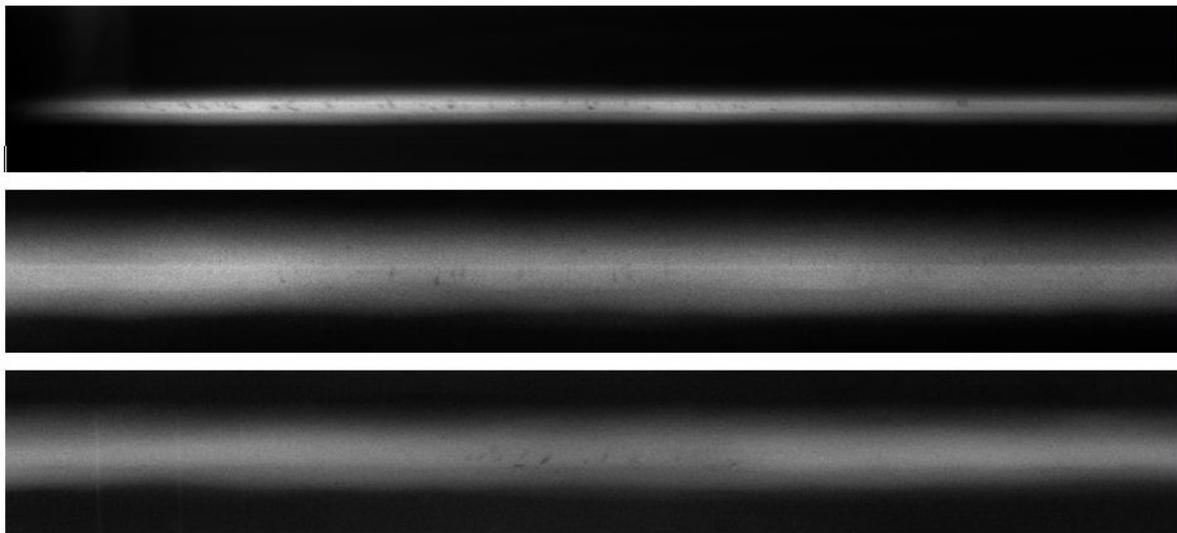


Рис. 1. Результаты контроля рентгенографическим методом горизонтальных сварных швов при ремонте резервуаров

Если считать условия проведения строительных и ремонтных работ в одинаковых климатических и производственных условиях при наличии единых требований и технологии их производства близкими, то причинами повышенной пористости могут быть:

- изменения химического состава и структуры стали под влиянием эксплуатационных факторов, в том числе при контакте с нефтью и нефтепродуктами;
- внешние факторы, возникающие при подготовке к проведению ремонтных работ.

Цель исследования – разработка предложений по применению технологических мер борьбы с пористостью сварного шва в производственных условиях на основе анализа причин повышенной пористости при ремонте резервуаров и трубопроводов для транспортирования нефти и нефтепродуктов с целью повышения качества выполнения строительно-монтажных работ.

Задачи исследования:

- 1) анализ причин увеличения пористости сварных швов при проведении ремонта резервуаров, магистральных и технологических трубопроводов системы транспорта нефти и нефтепродуктов;
- 2) исследование изменения химического и (или) структурного состава основного металла элементов системы трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов;
- 3) формирование предложений по профилактике появления газовых пор.

АНАЛИЗ ПРИЧИН УВЕЛИЧЕНИЯ ПОРИСТОСТИ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Выделим факторы, влияющие на повышенное порообразование при ремонте элементов системы трубопроводного транспорта, описанные ранее в научной литературе с учетом особенностей сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа.

Известно, что выделяются из кристаллизующегося металла лишь молекулярные газы, которые и способны

вызывать пористость [17–19]. Такими газами являются водород, оксид углерода, кислород, азот.

Вследствие высокой растворимости водорода в жидком металле и большой подвижности его атомов концентрация водорода в металле сварочной ванны может несколько увеличиваться за счет его диффузии из околошовной зоны основного металла.

Поры также могут вызываться реакцией между растворенными в металле кислородом и водородом (реакцией образования водяного пара):



Предполагается, что при высоком содержании в металле углерода и низком содержании водорода поры в швах вызываются окисью углерода, а при низком содержании углерода и высоком содержании водорода – парами воды.

Известно, что азот и водород оказывают активное взаимное влияние, которое описывается реакцией:



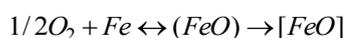
Согласно закону действующих масс, скорость образования NH_3 по этой реакции пропорциональна произведению $[\% N] \times [\% H]^3$. Поскольку здесь водород в третьей степени, то его влияние на пористость будет значительно сильнее.

Таким образом, при повышенном наличии водорода в зоне сварки реакции ассоциации водорода и азота в молекулы могут приводить к повышенному газообразованию, зарождению и развитию пор, а при скачкообразном изменении растворимости водорода и азота при снижении температуры пузырьки газа не успевают полностью выделиться в атмосферу и остаются в шве в виде продолговатых пор.

В литературе в качестве рекомендаций описаны повышенные требования к технологии сварочных работ и сварочным материалам при проведении ремонтов [20]. В частности, это требование касается содержания

остаточного водорода в наплавленном металле: при строительстве требуется обеспечить $3,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла, при ремонте – $2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Это требование может оказывать существенное влияние на пористость сварных швов. Однако применение этой рекомендации на практике затруднено из-за сложности и затратности проведения анализа содержания водорода в свариваемом металле в полевых условиях.

Повышенная пористость может быть вызвана также повышенной концентрацией углерода, а мнение о том, что реакция выгорания углерода служит основной причиной образования газовых включений в плохо раскисленных сталях, является общепризнанным среди металлургов и сварщиков. Углерод может растворяться в жидкой стали как в атомарном состоянии, так и в виде карбида железа. Выгорание углерода от воздействия углекислого газа можно описать как сумму последовательных реакций:



Некоторые исследователи считают, что поры могут вызываться не только интенсивным, но и слишком медленным выделением газов в период кристаллизации металла шва [21]. При слишком медленном выделении пузырьки газа, не успевая вырасти до размеров, обеспечивающих их отрыв от кристаллов и всплытие на поверхность сварочной ванны, остаются в застывающем металле.

При сварке малоуглеродистых и углеродистых сталей в защитных газах и, в частности, при сварке в углекислом газе иногда образуются поры, расположенные у границы сплавления металла шва с основным металлом.

Учитывая, что максимальная пористость при ремонте отмечается в горизонтальных швах стенки резервуаров, можно предположить, что поры зарождаются до начала процесса кристаллизации металла и не успевают выйти из жидкого металла.

Установлено, что условия сварки плавящимся электродом в защитных газах способствуют особенно интенсивному растворению газов в переплавляемом дугой жидком металле [22]. Интенсивность выделения газа из металла, а следовательно, и вероятность образования пор в сварных швах возрастают с увеличением скорости охлаждения металла.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО И (ИЛИ) СТРУКТУРНОГО СОСТАВА ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Исследователями не отмечены количественные изменения содержания кислорода в стали трубопроводов и хранилищ при воздействии нефти и нефтепродуктов [23], в то время как процессы наводораживания и деформационного старения, изменяющие структуру и со-

став металла (в частности, в отношении водорода, азота и углерода), являются предметом постоянного исследования [24].

Атомы водорода также проникают из окружающей среды (нефть, щелочи, кислоты, почвенные электролиты) и от катодных реакций защиты на поверхности труб, накапливаясь в коллекторах (микростотах, порах, границах зерен и т. п.). При деформации на поверхности металла трубы или поверхности микрополости образуются активные центры, в которых происходит диссоциация молекул водорода и проникновение атомарного водорода вглубь металла.

В литературе довольно подробно описаны изменения механических свойств трубной стали при ее эксплуатации, но крайне редко встречаются исследования изменений химического состава стали при ее контакте с нефтью и нефтепродуктами [23; 24]. В частности, не исследовано количественное изменение содержания газов (водород, азот, кислород) и углерода, оказывающих основное влияние на образование газовых пор при ремонте металлоконструкций.

Исследования химического состава сталей, подвергшихся эксплуатации в режиме работы трубопроводов в течение 30 лет, показали соответствие химического состава металлов нормативным документам независимо от срока эксплуатации.

С учетом вышесказанного наибольший интерес вызывает изменение содержания водорода, азота, кислорода и углерода в стали в период эксплуатации и проведения подготовительных работ при ремонте металлоконструкций.

Рассмотрим описанные ранее в литературе процессы, происходящие с углеродом и азотом при длительной эксплуатации стали в среде углеводородов. При рассмотрении влияния состава среды необходимо учитывать, что нефти представляют собой смесь различных углеводородов с неуглеводородными компонентами (спирты, фенолы, соединения серы, кислорода и др.). Если предельные и непредельные углеводороды совершенно инертны к металлам, то неуглеводородные компоненты вступают с ними в химическую реакцию. Сера может присутствовать в металле в виде шлаковых соединений и также влиять на образование пор. В нефтепроводах в условиях эксплуатации возможно образование конденсата с высоким содержанием сероводорода и других соединений (элементарная сера, меркаптаны), наличие которых приводит к насыщению стали водородом.

В исследованиях, посвященных изменениям механических свойств материалов под воздействием эксплуатационных факторов, отмечаются явления деформационного старения ферритно-перлитных сталей и водородного охрупчивания [23]. Водородное охрупчивание вызвано воздействием водорода и водородосодержащих газовых и жидкостных сред. Эти явления могут оказывать влияние на пористость при ремонте резервуаров и линейной части магистральных нефтепроводов за счет наводораживания и перераспределения атомов углерода и азота.

Металлографические данные показывают, что практически все трубные стали действующих нефтепроводов, независимо от срока эксплуатации, имеют ферритно-перлитную структуру, балльность зерна колеблется в пределах 7–9. Однако при сохранении ферритно-

перлитной структуры в процессе деформационного старения активно происходит распад цементита [24], который впервые был обнаружен и изучен методами рентгеноструктурного анализа с применением специальной методики.

Атомы углерода, которые «освободились» в результате распада цементита, скапливаются в полосах скольжения, уходят в твердый раствор, скапливаются на границах зерен и в микротрещинах, где образуются зародыши новых карбидных частиц.

Уменьшение количества цементита в трубных сталях в процессе эксплуатации составляет по данным рентгеноструктурного анализа порядка 30 % и по электронно-микроскопическим данным – порядка 25 %.

В ряде работ других авторов сделаны аналогичные выводы об изменении свойств трубных сталей после длительной эксплуатации [25].

ПРОВЕДЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ВОДОРОДА И УГЛЕРОДА В МЕТАЛЛЕ

Для количественного анализа и исследования распределения водорода в металлоконструкциях элементов системы трубопроводного транспорта были проведены исследования в образце, вырезанном из стенки резервуара, подлежащего капитальному ремонту. До проведения ремонта резервуар использовался в течение 33 лет для хранения нефти на нефтеперекачивающей станции.

Анализ водорода производился при помощи газоанализатора *G8 GALILEO (Bruker)* методом плавления в соответствии с ГОСТ 17745-90. Метод плавления позволяет оценить полное содержание водорода в материале, включая сильносвязанный металлургический водород. При определении концентрации водорода методом плавления предварительно взвешенный твердый образец плавят в графитовом тигле в потоке инертного газа-носителя (N_2). Выделившаяся смесь газов через систему фильтров подается с газом-носителем к системе детектирования, представляющей собой термокондуктометрическую ячейку, в которой происходит измерение теплопроводностей чистого газа-носителя и смеси газа-носителя с выделившимся водородом. По разнице теплопроводностей определяется объем выделившегося водорода и затем рассчитывается весовая концентрация водорода. Калибровка прибора осуществляется с использованием эталонного материала (стандартных образцов).

Образцы вырезали при помощи отрезного станка *Discotom-6 (Struers)*. Для анализа изменения концентрации по толщине пластины ее разрезали вдоль и затем из полученных двух частей вырезали по 4 образца размером $10 \times 5 \times 5$ мм.

Результаты количественного исследования водорода с внутренней (находившейся в контакте с нефтью) и внешней (контактирующей с антикоррозионным покрытием) стороны показали, что массовая концентрация водорода с внутренней стороны образца составляет 3,1 % (стандартное отклонение $\pm 0,2$), с внешней – 1,4 % ($\pm 0,4$). Значения для каждого типа образцов являются средними по 4 образцам.

При определении химического состава металла того же резервуара было установлено, что содержание угле-

рода с внутренней стороны (0,18 %) превышает содержание углерода с внешней стороны (0,15 %) на 20 %.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ БОРЬБЫ С ПОРИСТОСТЬЮ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ ПАО «ТРАНСНЕФТЬ»

1. Механизированная сварка осуществляется постоянным током обратной полярности, что снижает возможную пористость по сравнению с другими методами сварки. В основном в сварочной литературе описывается, что повышение плотности тока в сварочной дуге приводит к снижению скорости остывания сварочной ванны и, следовательно, к уменьшению количества газовых пор.

Очевидно, что для уменьшения порообразования необходимо увеличение погонной энергии сварки за счет имеющихся диапазонов режимов сварки, предусмотренных руководящими документами.

Поэтому для решения задачи возможно рассмотреть выполнение сварочных работ при максимально возможной плотности тока в рамках диапазонов (изменение параметров силы тока, напряжения или скорости сварки), установленных руководящими документами.

2. Загрязнения и ржавчина могут попадать в зону сварки со сварочными материалами из основного свариваемого металла. Уменьшение количества загрязнений можно достичь за счет дополнительной обработки сварочных материалов и свариваемого металла.

3. Сварочный шов формируется за несколько проходов, при этом количество газовых пор в валиках различных проходов различно. Для формирования предположений по уменьшению их количества необходимо установить эмпирическим путем наименее плотные валики и рассмотреть меры дополнительной защиты сварочного шва от пористости, такие как дополнительное введение в сварочную ванну раскислителей (например, изменение химического состава проволоки, использование флюсов, легирующих элементов) или выбор другой технологии проведения сварочных работ из допустимых согласно руководящим документам (например, использование порошковой проволоки).

4. Известно, что уменьшения свободного углерода можно достичь путем термообработки с последующим медленным охлаждением. На основании известных теоретических исследований возможно установление оптимальной в производственных условиях технологии для восстановления цементита в стали. Например, термообработка трубных сталей с содержанием углерода $C < 0,2$ %, при 660 °С с последующим медленным охлаждением в течение 20 мин, позволяет восстановить цементит до уровня около 50 % от его первоначального количества.

5. Для исключения дефектов сварных швов при ремонте резервуаров и трубопроводов может производиться термообработка сварочных кромок перед сваркой. Рекомендуемый для термообработки интервал температур определен как 300 – 400 °С.

ВЫВОДЫ

Причины повышенной пористости сварных швов при ремонте элементов трубопроводной системы под влиянием эксплуатационных факторов:

1) увеличение количества диффузионного водорода, вызванное воздействием водородосодержащих газовых и жидкостных сред;

2) увеличение количества связанного углерода в виде неметаллических включений;

3) повышенное содержание неметаллических включений в металле, возникающее в процессе деформационного старения при распаде цементита и миграции атомов углерода (углерод и азот могут являться зародышами неметаллических включений).

Безусловно, проведенный анализ не является исчерпывающим, и поставленные ранее задачи требуют дальнейшего исследования в обозначенных направлениях. Однако уже в данный момент можно предложить ряд технологических мер, влияющих на порообразование при проведении капитального ремонта металлоконструкций резервуаров и нефтепроводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшие исследования могут проводиться в области разработки эффективных мероприятий по снижению содержания водорода и углерода в сварочной ванне при проведении ремонтных работ резервуаров, магистральных и технологических трубопроводов системы транспорта нефти и нефтепродуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. На повестке дня: программа повышения качества строительства и ремонта резервуаров вертикальных стальных на объектах организаций системы «Транснефть» // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. № 2. С. 10–11.
2. Ланчаков Г.А., Зорин Е.Е., Пашков Ю.И., Степаненко А.И. Работоспособность трубопроводов. Сопротивляемость разрушению. В 2 ч. Ч. 2. М.: Недра, 2001. 350 с.
3. Ефименко Л.А. Методологические основы оценки свариваемости конструкционных материалов на примере сталей нефтегазового сортамента // Сварочное производство. 2013. № 9. С. 24–27.
4. Притула В.В. Коррозионная ситуация на газовых и нефтепроводах России и их промышленная безопасность // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 2. С. 6–10.
5. Макаров Г.И. Стратегия технической политики модернизации систем трубопроводного транспорта нефти и газа // Сварочное производство. 2013. № 9. С. 44–48.
6. Зорин Н.Е., Шашалов Д.Н. Сопротивляемость разрушению трубных сталей и их сварных соединений после длительной эксплуатации // Сварочное производство. 2009. № 11. С. 35–36.
7. Пимнев А.Л., Земенкова М.Ю. Проблемы мониторинга надежности резервуаров при технологических процессах транспорта и хранения углеводородов // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 5. С. 43–47.
8. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1996. 576 с.
9. Занковец П.В. Совершенствование технологических процессов и качества сварочно-монтажных работ в строительстве математическим моделированием условий объекта сварки и оптимизацией производственных факторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2000. 20 с.
10. Занковец П.В. Степень влияния подготовки и сборки под сварку на качество сварных соединений технологических трубопроводов // Автоматическая сварка. 2011. № 6. С. 48–53.
11. РД 25.160.10–КТН-015-15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Сварка при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров. В 2 ч. Ч. 1. Технологии сварочно-монтажных работ: с изменением 1. М.: Транснефть, 2016. 223 с.
12. РД 25.160.10–КТН-015-15. Технология ремонта магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов с давлением до 6,3 МПа. Сварка при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров. В 2 ч. Ч. 2. Методы контроля качества сварных соединений: с изменением 1. М.: Транснефть, 2016. 88 с.
13. РД 23.040.00–КТН-386-09. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М.: Транснефть, 2009. 221 с.
14. Бузорина Д.С. Расчет параметров режима многопроходной механизированной сварки в защитных газах для получения качественных сварных соединений // Сварка и диагностика. 2014. № 3. С. 13–17.
15. Карасев М.В., Дорошенко Ф.Е., Казаков А.А., Любченко Д.А. Технологические особенности выполнения различных слоев шва при автоматической сварке трубопроводов // Сварка и диагностика. 2014. № 6. С. 45–49.
16. Завалинич Д.А., Стеклов О.И., Дзюба О.В., Лозовой В.Г., Щеголев В.А. Анализ применения современных электродов отечественного и импортного производства при капитальном ремонте магистральных нефтепроводов // Сварочное производство. 2007. № 4. С. 32–39.
17. Технология и оборудование контактной сварки / под общ. ред. Б.Д. Орлова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 536 с.
18. Теория сварочных процессов / под ред. В.М. Неровного. 2-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 704 с.
19. Гапченко М.Н., Футер И.Е. Пористость сварных швов и меры борьбы с ней. Киев: Гостехиздат УССР, 1953. 76 с.
20. Оськин И.Э., Гончаров Н.Г., Колесников О.И. Требования к сварочным материалам для строительства и ремонта нефтепроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2011. № 4. С. 33–35.
21. Кононенко В.Я. Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом. Киев: Ника-Принт, 2007. 266 с.
22. Походня И.К. Металлургия дуговой сварки конструкционных сталей и сварочные материалы // Сварочное производство. 2009. № 4. С. 3–15.
23. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М., Журавлев Г.В., Вадиков Ф.И. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. 231 с.
24. Мурзахметова У.А., Абдикаликова Б.К. Изучение структуры и свойств низколегированной стали

09Г2С с применение программного обеспечения STATISTICA 10 И DIGIMIZER // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева. 2014. № 4. С. 326–332.

25. Иванова В.С., Горицкий В.М., Терентьев В.Ф. Дислокационная структура и деформационное старение в процессе усталости ОЦК-металлов // Взаимодействие между дислокациями и атомами примесей и свойств металлов: сборник научных трудов. Тула: Тул. политехн. ин-т, 1974. С. 181–186.
- REFERENCES**
1. On the agenda: the program for improving the quality of construction and repair of vertical steel tanks at the sites of organizations of “Transneft” system. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov*, 2016, no. 2, pp. 10–11.
 2. Lanchakov G.A., Zorin E.E., Pashkov Yu.I., Stepanenko A.I. *Rabotosposobnost truboprovodov. Soprotivlyaemost razrusheniya* [Serviceability of pipelines. Resistance to destruction]. Moscow, Nedra Publ., 2001. Ch. 2, 350 p.
 3. Efimenko L.A. Methodological backgrounds for the evaluation of weldability of the construction materials using the example of oil and gas assortment steels. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 9, pp. 24–27.
 4. Pritula V.V. Situation with corrosion on the Russian gas and oil pipelines and with their industrial safety. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2015, no. 2, pp. 6–10.
 5. Makarov G.I. The strategy of engineering policy of modernization of systems of oil and gas pipeline transportation. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 9, pp. 44–48.
 6. Zorin N.E., Shapshalov D.N. Resistance power of pipeline steels and their welding joints after continuous service. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 11, pp. 35–36.
 7. Pimnev A.L., Zemenkova M.Yu. Problems of monitoring of reliability of tanks in processes of transport and storage of hydrocarbons. *Truboprovodnyy transport: teoriya i praktika*, 2015, no. 5, pp. 43–47.
 8. Paton B.E., ed. *Svarnye konstruksii. Mekhanika razrusheniya i kriterii rabotosposobnosti* [Welded Structures. Fracture Mechanics and Criteria of Working Capacity]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996. 576 p.
 9. Zankovets P.V. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov i kachestva svarochno-montazhnykh работ v stroitelstve matematicheskim modelirovaniem usloviy obekta svarki i optimizatsiy proizvodstvennykh faktorov*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [The improvement of engineering processes and quality of mechanical works in construction using the mathematical modeling of the conditions of welding object and the production factors optimization]. Minsk, 2000. 20 p.
 10. Zankovets P.V. Level of effect of preparation and assembly for welding on quality of welded joints for industrial pipelines. *Avtomaticheskaya svarka*, 2011, no. 6, pp. 48–53.
 11. RD 25.160.10–КТN-015-15. *Magistralnyy truboprovodnyy transport nefiti i nefteproduktov. Svarka pri stroitelstve i remonte stalnykh vertikalnykh rezervuarov. Tekhnologii svarochno-montazhnykh работ: s izmeneniyem I* [Main pipeline transportation of oil and oil products. Welding during the construction and repair of steel vertical tanks. Mechanical works technologies: as amended 1]. Moscow, Transneft’ Publ., 2016. Ch. 1, 223 p.
 12. RD 25.160.10–КТN-015-15. *Tekhnologiya remonta magistralnykh nefteprovodov i nefteproduktoprovodov s davleniem do 6,3 МПа. Svarka pri stroitelstve i remonte stalnykh vertikalnykh rezervuarov. Metody kontrolya kachestva svarnykh soedineniy: s izmeneniyem I* [The technology of repair works of the main oil and oil products pipelines with the pressure up to 6.3 MPa. Welding during construction and repair works of steel vertical tanks. The methods of control of welding joints quality: as amended 1]. Moscow, Transneft’ Publ., 2016. Ch. 2, 88 p.
 13. RD 23.040.00–КТN-386-09. *Magistralnyy truboprovodnyy transport nefiti i nefteproduktov* [Main pipeline transportation of oil and oil products]. Moscow, Transneft’ Publ., 2009. 221 p.
 14. Buzorina D.S. Calculation of mode parameters of mechanized multi-pass welding in protective gases for quality of welded joints. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 3, pp. 13–17.
 15. Karasev M.V., Doroshenko F.E., Kazakov A.A., Lyubochko D.A. Technological characteristics of performing various weld layers during automatic welding of pipelines. *Svarka i diagnostika*, 2014, no. 6, pp. 45–49.
 16. Zavalinich D.A., Steklov O.I., Dzyuba O.V., Lozovoy V.G., Shchegolev V.A. The analysis of application of modern Russian and foreign electrodes during major repair of main pipelines. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2007, no. 4, pp. 32–39.
 17. Orlov B.D., ed. *Tekhnologiya i oborudovanie kontaktной svarki* [Technology and equipment of contact welding]. 2nd ed., pererab. i dop. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 536 p.
 18. Nerovnyy V.M., ed. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of Welding Processes]. 2nd ed. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2016. 704 p.
 19. Gapchenko M.N., Futer I.E. *Poristost svarnykh shvov i mery borby s ney* [Weld joint porosity and the measures of its control]. Kiev, Gostekhizdat USSR Publ., 1953. 76 p.
 20. Oskin I.E., Goncharov N.G., Kolesnikov O.I. Requirements for welding materials used for building and repair of pipelines. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov*, 2011, no. 4, pp. 33–35.
 21. Kononenko V.Ya. *Svarka v srede zashchitnykh gazov plavyashchimsya i neplavyashchimsya elektrodom* [Gas-shielded welding with consumable and nonconsumable electrode]. Kiev, Nika-Print Publ., 2007. 266 p.
 22. Pokhodnya I.K. Metallurgy of arc welding of construction steels and welding materials. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2009, no. 4, pp. 3–15.
 23. Gumerov A.G., Yamaleev K.M., Zhuravlev G.V., Vadikov F.I. *Treshchinostoykost metalla trub nefteprovodov* [Crack resistance of metal of pipes of oil pipelines]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2001. 231 p.
 24. Murzakhmetova U.A., Abdikalikova B.K. The study of the structure and properties of low-alloy steel 09G2S using the STATISTICA 10 and DIGIMIZER software.

Vestnik Kazakhskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta im. K.I. Satpaeva, 2014, no. 4, pp. 326–332.
25. Ivanova V.S., Goritskiy V.M., Terentev V.F. Dislocation structure and strain aging in the process of fatigue of

BCC-metals. *Vzaimodeystvie mezhdu dislokatsiyami i atomami primesey i svoystv metallov: sbornik nauchnykh trudov*. Tula, Tul. politekhn. in-t Publ., 1974, pp. 181–186.

POROSITY DURING THE REPAIR WORK OF TANKS AND PIPELINES FOR TRANSPORTATION OF OIL AND OIL PRODUCTS AND THE MEASURES FOR ITS PREVENTION

© 2018

A.I. Kovtunov, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Welding, metal forming and related processes”

N.G. Pudovkina, graduate student of Chair “Welding, metal forming and related processes”

A.A. Pudovkin, graduate student of Chair “Welding, metal forming and related processes”

A.M. Maslyayev, graduate student of Chair “Welding, metal forming and related processes”

Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: weld porosity; tanks repair; main and process pipelines repair; chemical composition of metal of tanks and pipelines.

Abstract: While repairing the metallic structures of tanks, main and process pipelines of oil and oil products transportation system, high porosity of welds can be observed. As a reason of high porosity, the change of chemical composition and metal structure resulting from the environmental effect including the contact with oil and oil products can be considered.

The dominant factors affecting the high pore-formation while repairing the elements of pipeline transportation system which were described earlier in the research literature with respect to the special characteristics of continuous wire welding in the carbon dioxide environment are the high hydrogen and carbon content in the molten weld pool, high cooling rate of metal, strain aging of the ferritic-pearlitic steels, and the hydrogen embrittlement.

The conclusion about the reasons for high porosity is made.

The authors carried out some studies which verified the increased hydrogen and carbon content in the metal under the influence of operational factors and what is more, in metal at the side of contact with oil products, the hydrogen content by weight on the inside of sample is twice as big as the hydrogen content by weight on the outside of it. The carbon content on the side of contact with oil is 20 % more than that on the inside.

Based on the research, the authors offered a number of techniques for decreasing the weld metal porosity under factory conditions of PAO “Transneft”: the increase of heat input rate of welding within the established range of welding modes; the preliminary thermal treatment of used steel with the following slow cooling for the decrease of free carbon.

ВТОРИЧНОЕ ВСКРЫТИЕ ПРОДУКТИВНОГО ПЛАСТА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ СВЕРЛЯЩИМ ПЕРФОРАТОРОМ С ПОВОРОТНЫМ МЕХАНИЗМОМ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

© 2018

А.В. Месропян, доктор технических наук,
профессор кафедры прикладной гидромеханики
М.Р. Рахматуллина, магистрант

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа (Россия)

Ключевые слова: вторичное вскрытие пластов; сверлящая перфорация; кумулятивная перфорация; коэффициент извлечения нефти; нефтеотдача.

Аннотация: Мировые тренды роста энергопотребления, повышения нефтеотдачи пластов, наряду с ужесточением требований нормативно-правовой базы, законодательства в части обеспечения рационального природопользования, требований экологии и промышленной безопасности, определяют актуальность и востребованность разработки и внедрения новых технологических, схемных и компоновочных решений, обеспечивающих качественную гидродинамическую связь «пласт – скважина». В статье рассмотрены вопросы повышения качества вторичного вскрытия нефте- и газоносных пластов, проанализированы существующие методы и технические средства для вторичного вскрытия продуктивного пласта. Приведены аргументы, доказывающие, что применение сверлящей перфорации, с точки зрения обеспечения гидродинамической связи «пласт – скважина», а также соответствия наиболее значимым критериям эффективности вторичного вскрытия, является наиболее целесообразным для работы на скважинном фонде, особенно в сложных коллекторах, при работе на наклонно-ориентированных и горизонтальных скважинах.

Проведен патентный обзор и анализ существующих технических средств, в результате которых предложен перспективный сверлящий перфоратор с электрогидравлической системой и поворотным механизмом рабочей части для вскрытия нефте- и газоносных пластов, который сохраняет фильтрационные свойства пласта за счет вскрытия его в шадящем режиме, обеспечивает высокое качество гидродинамической связи продуктивного пласта со скважиной, а также способствует увеличению коэффициента извлечения нефти благодаря многоточечной перфорации.

Показано, что реализация высокого качества гидродинамической связи пласта со скважиной, увеличение нефтеотдачи во многом зависят от технических параметров перфораторов и обеспечиваются в том числе и за счет корректного моделирования рабочих процессов в наиболее ответственных элементах конструкции перфоратора.

ВВЕДЕНИЕ

Перфорация скважин – одна из важнейших и неотъемлемых операций при освоении скважины. Освоение – это заключительный этап строения скважины. От того, насколько качественно удастся обеспечить гидродинамическую связь между пластом-коллектором и скважиной на стадии построения скважины, зависит последующая ее эксплуатация. Процесс перфорации заключается в создании отверстий в стенках обсадной колонны. Задачей перфорации является обеспечение надежной гидродинамической связи продуктивного пласта и скважины без негативного воздействия на коллекторские свойства и без разрушения обсадной колонны. Качество вскрытия пласта часто играет практически решающую роль при последующей эксплуатации скважин. От него зависит дальнейшая нефтеотдача скважины, срок строительства и освоения скважины, выбор необходимых методов интенсификации притока и др.

В разное время был внедрен ряд технологических и конструктивных решений в номенклатуру нефтесервисного оборудования, однако в настоящее время эффективность сверлящих перфораторов отечественного производства является сравнительно низкой, технологические и схемные решения морально и технически устарели и требуют модернизации и дальнейшего развития. Известны и используются следующие способы перфорации: кумулятивный, пулевой, гидropескоструйный, тор-

педный, гидромеханический щелевой, сверлящий и др. [1–3]. Подробный обзор приведен на рис. 1.

Применение метода, не адаптированного к определенным условиям проведения операции и характеристикам пласта, может приводить к негативным последствиям, вплоть до полной потери продуктивности. Эффективность выбранного метода вторичного вскрытия продуктивного пласта существенно влияет на успешность строительства скважин и на объемы нефтедобычи.

В мировой и отечественной практике в настоящее время до 90÷98 % вскрытия пластов производится кумулятивной перфорацией [4]. В результате взрыва заряд пробивает стенку обсадной колонны, проникая в призабойную зону продуктивного пласта. Таким образом могут образовываться десятки каналов глубиной от 150 до 1350 мм, диаметр которых варьируется от 7 до 23 мм (глубина канала тем больше, чем меньше его диаметр).

Широкое применение кумулятивные перфораторы находят благодаря своей высокой производительности и относительно небольшой стоимости работ и расходам материала. Несмотря на это, данный способ вторичного вскрытия пластов имеет ряд серьезных недостатков, таких как высокие нагрузки на стенку обсадной колонны, высокая вероятность попадания в породу пласта продуктов взрыва и обсадной колонны.

Недостатками гидромеханических щелевых перфораторов являются малая глубина проникновения в пласт, возможное засорение гидромониторной насадки

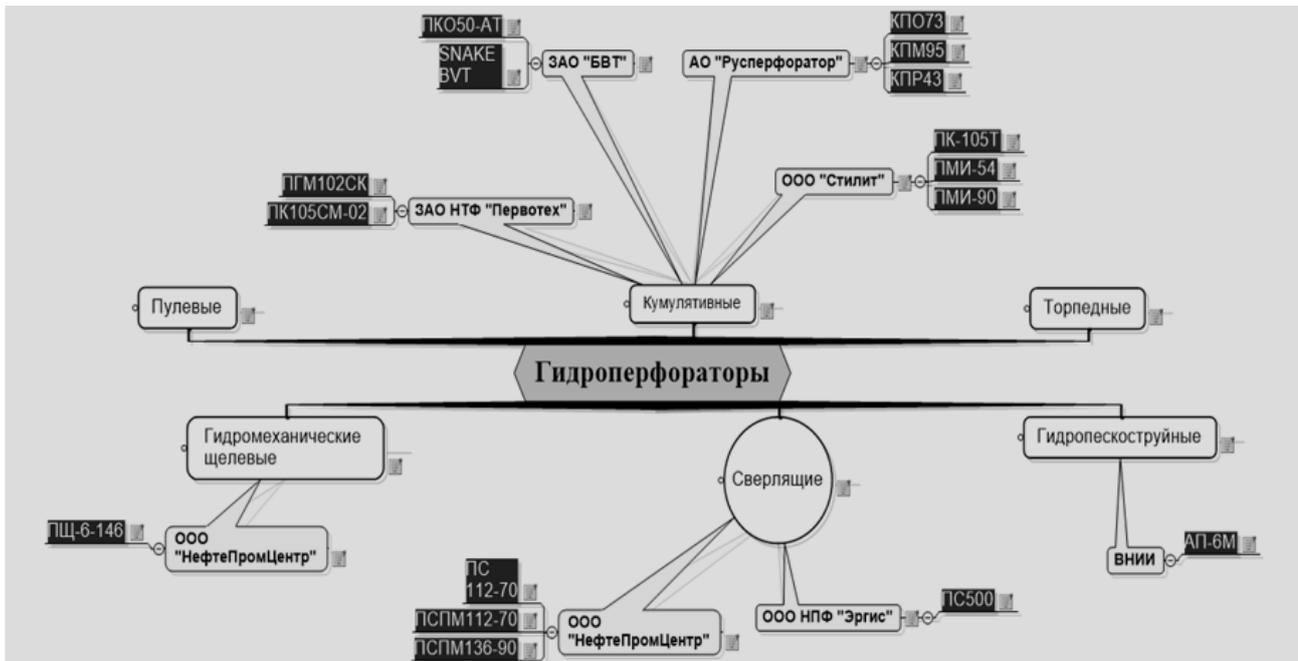


Рис. 1. Классификация скважинных перфораторов

и сложность замены режущего инструмента, при которой требуется полная разборка устройства [5; 6].

Торпедные и пулевые перфораторы оказывают высокие нагрузки на стенки обсадной колонны, что приводит к нарушению герметичности ствола скважины вследствие образования трещин [7].

Для выбора оптимального метода перфорации выделены наиболее важные критерии эффективности вторичного вскрытия продуктивного пласта с геологической точки зрения [8]:

1. Суммарная поверхность вскрытия эксплуатационной колонны должна быть максимально возможной с учетом сохранения ее прочности для того, чтобы противостоять горному давлению.

2. Обсадная колонна должна быть сохранена за пределами интервала вскрытия для возможности длительного использования скважины без обводнения.

3. Количество и глубина перфорационных каналов в интервале вскрытия должны быть максимальными, так как это обеспечивает надежную связь пласта и скважины даже в случае невысокого качества первичного вскрытия (высокие репрессии, неблагоприятные факторы бурового раствора и др.).

С учетом приведенных критериев наиболее целесообразно использовать сверлящую перфорацию, которая позволяет производить вторичное вскрытие пластов щадящим способом и без отрицательных воздействий на призабойную зону пласта, сохраняет естественную проницаемость, исключает межпластовые перетоки по трещинам в цементном камне и не оказывает воздействия на целостность скважины и фильтрационные свойства пород продуктивного пласта [9]. К достоинствам сверлящей перфорации можно также отнести возможность точечной избирательной перфорации пластов сложного строения. После проведения вторичного вскрытия пласта данным методом не требуются дополнительные операции, такие как гидроразрыв пласта или

иные химические и физические методы для восстановления проницаемости призабойной зоны, которые, в свою очередь, приводят к дополнительным затратам, а также формируют трудноизвлекаемые запасы нефти.

Эффективность извлечения нефти современными, промышленно освоенными методами по всему миру является неудовлетворительной, а потребность в нефтепродуктах с каждым годом только увеличивается. Конечная нефтеотдача пластов по различным странам и регионам составляет от 25 до 40 %. Например, в странах Латинской Америки и Юго-Восточной Азии средняя нефтеотдача пластов составляет 24÷27 %, в Иране – 16÷17 %, в США, Канаде и Саудовской Аравии – 33÷37 %, в странах СНГ и России – до 40 %, в зависимости от структуры запасов нефти и применяемых методов разработки [10]. Для увеличения данного показателя требуется разработка новых схемных и компоновочных решений, обеспечивающих длительную и повышенную интенсивность притока нефти к скважине.

Аналитический обзор конструктивных и компоновочных схем сверлящих перфораторов для вторичного вскрытия пластов, применяемых в России, показал, что данные устройства недостаточно эффективны из-за малой глубины формируемых каналов. Это не позволяет обеспечить надежную гидродинамическую связь между скважиной и продуктивным пластом (таблица 1).

Все вышеуказанное обуславливает актуальность выполнения работ, направленных на повышение качества вторичного вскрытия пласта-коллектора сверлящей перфорацией.

Цель исследования – разработка перспективного электрогидравлического сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части на основе исследования рабочих процессов системообразующих элементов для обеспечения высокого качества вторичного вскрытия пластов.

Таблица 1. Сравнительный анализ перфораторов, применяемых в России

	ПС 112-70	ПСМ 112-70	ПСМ 136-90	ПС 112-60	ПС 500	Min	Max	Среднее значение	Перспективный сверлящий перфоратор
Длина, мм	2400	2400	2400	2400	4015	2400	4015	3207,5	Не более 4000
Диаметр, мм	112	112	136	112	112	112	136	124	136
Масса, кг	85	85	98	87	100	85	100	92,5	Не более 150
Рабочий инструмент	Твердосплавное сверло					-	-	-	Твердосплавное сверло
Диаметр перфорационного отверстия	15	15	15	28	20	15	28	21,5	20
Время сверления одного отверстия, мин	5	3			20	3	20	11,5	2
Количество сверлений за спуск	До 35	До 30	До 30	До 20	От 7	7	35	21	От 20
Потребляемая мощность, кВт	До 2					-	2	-	
Рабочее напряжение, В	380					380	380	380	380
Частота, Гц	50					5	50	50	50

СВЕРЛЯЩИЙ ПЕРФОРАТОР С ПОВОРОТНЫМ МЕХАНИЗМОМ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

Наиболее целесообразной для увеличения коэффициента извлечения нефти представляется разработка сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части и с повышенным выходом бурового инструмента, который позволяет создавать в одной радиальной плоскости скважины несколько чистых перфорационных каналов длиной до 700 мм (рис. 2). Это обеспечит создание надежной и качественной связи продуктивного пласта и скважины.

Известен ряд работ, направленных на усовершенствование функций сверлящего перфоратора, в которых рассматриваются вопросы схемных и компоновочных

решений [11–13], однако все эти решения имеют общий недостаток – малую глубину перфорационного канала.

Наиболее близким к предлагаемому устройству является сверлящий перфоратор (патент № 2645443, МПК E21B 43/11, от 09.03.2011), который обеспечивает высокую надежность работы и автоматизацию настройки аппаратуры для работы на скважинах разных диаметров за счет применения модульной конструкции. Преимуществом заявляемого сверлящего перфоратора является высокая точность перфорируемых отверстий вследствие надежности фиксации и расфиксации перфоратора. Разработка сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части целесообразна, так

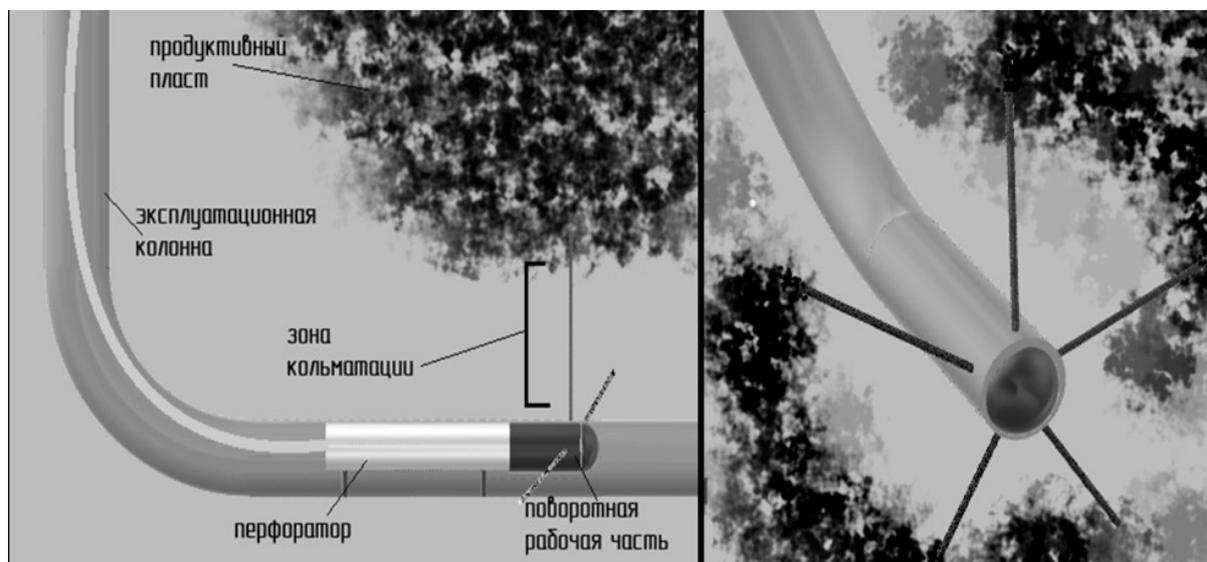


Рис. 2. Сверлящий перфоратор с поворотным механизмом рабочей части

как обеспечит повышение нефтеотдачи и, как следствие, увеличение коэффициента извлечения нефти за счет длины перфорационного канала, достигающего 400÷700 мм в длину, а также возможности создания нескольких отверстий в одной диаметральной плоскости без извлечения перфоратора на поверхность за счет поворота рабочей части. Расчетное время сверления одного канала в предлагаемом перфораторе не превышает 2 мин, что является еще одним немаловажным фактором, так как уменьшение трудозатрат и времени на заканчивание скважины существенно влияет на рациональное использование ресурсов. К преимуществам разрабатываемого перфоратора также следует отнести возможность более эффективной работы в горизонтальных скважинах. Дебиты горизонтальных сооружений намного выше дебитов обычных вертикальных скважин, так как толщина продуктивных пропластков может уменьшаться до нескольких метров, но при этом в длину может достигать нескольких километров [16]. Это определяет перспективность строительства горизонтальных скважин и необходимость разработки технологий и технических средств, в частности сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части, для работы на скважинном фонде с горизонтальными коллекторами. Внедрение новых технологий и технических средств, в том числе и перспективного сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части, будет способствовать увеличению коэффициента извлечения нефти.

С экономической точки зрения внедрение новых технологий и применение новых, перспективных технических средств для вторичного вскрытия продуктивных пластов также актуально, поскольку использование сверлящего перфоратора не требует дополнительных операций, таких как гидроразрыв пласта, кислотная обработка призабойной зоны, применение технологий с использованием полимеров (комплексное воздействие на пласт полимерными гелеобразующими системами в сочетании с интенсифицирующими реагентами; воздействие на пласт вязкоупругими составами; щелочно-полимерное заводнение) [17] и т. д., направленных на интенсификацию притока (например, технология гидроразрыва пласта требует от 3 до 10 млн рублей на одну скважину) [18].

Статистическая информация по зависимости КИНа от способа вторичного вскрытия продуктивного пласта показывает, что использование сверлящей перфорации наиболее целесообразно, так как способствует повышению нефтеотдачи [19]. Таким образом, моделирование рабочих процессов в системообразующих элементах перспективного сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части направлено на решение целого ряда проблемных задач, связанных с повышением качества гидродинамической связи пласта со скважиной, увеличением нефтеотдачи и коэффициента извлечения нефти, а также снижением трудозатрат на заканчивание скважины [20].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате анализа научно-технической литературы, патентных источников, установлено, что НИОКТР, направленных на создание технических средств, обеспечивающих многократное вскрытие пласта в азиму-

тальной плоскости на одной точке фиксации аппаратуры в скважине, не проводилось. Это позволяет сделать заключение о том, что описываемое в данной статье техническое решение является новым, перспективным и будет способствовать повышению качества гидродинамической связи.

Проведенные аналитические исследования показали, что применение предлагаемого сверлящего перфоратора с поворотным механизмом рабочей части имеет значительное преимущество перед альтернативными методами вторичного вскрытия продуктивных пластов за счет обеспечения большей площади контакта скважины и пласта без негативного влияния на обсадную колонну и пласт. Большая площадь контакта будет способствовать улучшению гидродинамической связи пласта и скважины и долгосрочному повышению коэффициента извлечения нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулакшин С.С. Бурение геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1991. 334 с.
2. Булатов А.И., Проселков Ю.М., Шаманов С.А. Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин. М.: Недра-Бизнесцентр, 2003. 1007 с.
3. Булатов А.И., Качмар Ю.Д., Макаренко П.П., Яремийчук Р.С. Освоение скважин. М.: Недра-Бизнесцентр, 1999. 473 с.
4. Божко Г.И., Дуванов А.М., Фельдман Н.И. Анализ состояния взрывных методов вторичного вскрытия и газодинамической обработки нефтегазовых пластов за рубежом // Каротажник. 2001. Вып. 78. С. 14–27.
5. Кривонос И.В., Балакиров Ю.А. Освоение, исследование и эксплуатация многопластовых скважин. М.: Недра, 1975. 167 с.
6. Жуланов И.Н., Крапивина Т.Н. Развитие технологии контроля качества щелевой гидроразрывной перфорации // Горное эхо. 2007. № 4. С. 31–35.
7. Миндияров С.Б., Шаисламов Ш.Г. Геофизические исследования и работы в скважинах. Т. 5. Вторичное вскрытие пластов и специальные операции. Уфа: Информреклама, 2010. 228 с.
8. Крылов А.П., Глоговский М.М., Мирчинк М.Ф., Николаевский Н.М., Чарный И.А. Научные основы разработки нефтяных месторождений. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 416 с.
9. Митягина М.О. Сверлящие перфораторы с электрогидравлической системой и логическим управлением // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. заоч. науч. конф. СПб.: Молодой ученый, 2011. С. 110–114.
10. Рузин Л.М., Морозюк О.А. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика). Ухта: УГТУ, 2014. 127 с.
11. Сафонов Д.И., Варламов С.Е., Атрощенко Н.Н. Сверлящий скважинный перфоратор: патент РФ № 157710; заяв. № 2015110300/03, 23.03.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
12. Яруллин Р.К. Сверлящий перфоратор и способ контроля его работы: патент РФ № 2439294; заяв. № 2010108638/03, 09.03.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
13. Камалетдинов Т.Р., Гуторов Ю.А., Галеев Н.Ф. Сверлящий перфоратор для глубокой перфорации

- нефтегазовых скважин: патент РФ № 163783; заяв. № 2015146796/03, 29.10.2015; опублик. 10.08.2016, Бюл. № 22.
14. Галлямов Ш.Р., Месропян А.В., Митягина М.О. Сверлящий перфоратор с электрогидравлической системой для вторичного вскрытия пластов: патент РФ № 2465443; заяв. № 2011108780/03, 09.03.2011; опублик. 27.10.2012, Бюл. № 30.
 15. Давлетова Л.У., Месропян А.В., Митягина М.О. Сверлящий перфоратор с электрогидравлической системой и регулировкой угла наклона бура: патент РФ № 2466269; заяв. № 2011122153/03, 31.05.2011; опублик. 10.11.2012, Бюл. № 31.
 16. Кудинов В.И., Сучков Б.М. Новые технологии повышения добычи нефти. Самара: Кн. изд-во, 1998. 368 с.
 17. Капырин Ю.В., Храпова Е.И., Кашицин А.В. Использование комплексной технологии вторичного вскрытия пласта для повышения дебита скважин // Нефтяное хозяйство. 2001. № 6. С. 58–60.
 18. Сейд-Рза М.К. Технология бурения глубоких скважин в осложненных условиях. Баку: Азернешр, 1963. 338 с.
 19. Месропян А.В., Митягина М.О. К вопросу о повышении качества вторичного вскрытия нефтегазовых пластов электрогидравлическими сверлящими перфораторами // Нефтепромышленное дело. 2013. № 5. С. 19–23.
 20. Аюханова Э.Р., Галлямов Ш.Р., Месропян А.В. Геофизическое оборудование с электрогидравлической системой управления для исследования нефте- и газоносных пластов // Гидропневмоавтоматика и гидропривод–2010: сб. науч. трудов. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2010. С. 212–214.
- REFERENCES**
1. Sulakshin S.S. *Burenie geologorazvedochnykh skvazhin* [Geological exploration well drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 334 p.
 2. Bulatov A.I., Proselkov Yu.M., Shamanov S.A. *Tekhnika i tekhnologiya bureniya neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Oil and gas wells drilling technique and technology]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2003. 1007 p.
 3. Bulatov A.I., Kachmar Yu.D., Makarenko P.P., Yaremychuk P.S. *Osvoenie skvazhin* [Well development]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 1999. 473 p.
 4. Bozhko G.I., Duvanov A.M., Feldman N.I. The analysis of the state of exploding methods of completion and gas-dynamic treatment of oil-and-gas strata abroad. *Karotazhnik*, 2001, vyp. 78, pp. 14–27.
 5. Krivososov I.V., Balakirov Yu.A. *Osvoenie, issledovanie i ekspluatatsiya mnogoplastovykh skvazhin* [The development, exploration and operation of multi-layer wells]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 167 p.
 6. Zhulanov I.N., Krapivina T.N. The development of technologies of quality control of the slotted hydrosandblast perforation. *Gornoe ekho*, 2007, no. 4, pp. 31–35.
 7. Mindiyarov S.B., Shaislamov Sh.G. *Geofizicheskie issledovaniya i raboty v skvazhinakh. T. 5. Vtorichnoe vskrytiye plastov i spetsialnye operatsii* [Geophysical research and work in the wells. V. 5. Completion of strata and special operations]. Ufa, Informreklama Publ., 2010. 228 p.
 8. Krylov A.P., Glogovsky M.M., Mirchink M.F., Nikolaevsky N.M., Charniy I.A. *Nauchnye osnovy razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy* [Scientific basis for the development of oil fields]. Izhevsk, Institut kompyuternykh issledovaniy Publ., 2004. 416 p.
 9. Mityagina M.O. Drilling perforators with electrohydraulic system and logical control. *Materialy mezhdunar. zaoch. nauch. konf. "Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy"*. Sankt Petersburg, Molodoy ucheniy Publ., 2011, pp. 110–114.
 10. Ruzin L.M., Morozuk O.A. *Metody povysheniya nefteotdachi plastov (teoriya i praktika)* [Methods of enhanced oil recovery (theory and practice)]. Ukhta, UGTU Publ., 2014. 127 p.
 11. Safonov D.I., Varlamov S.E., Atroshchenko N.N. *Sverlyashchiy skvazhinniy perforator* [Drilling hole perforator]. Patent RF, no. 157710, 2015. (In Russ.).
 12. Yarullin R.K. *Sverlyashchiy perforator i sposob kontrolya ego raboty* [Drill perforator and the way of control of its work]. Patent RF, no. 2439294, 2010. (In Russian).
 13. Kamaletdinov T.R., Gutorov Yu.A., Galeev N.F. *Sverlyashchiy perforator dlya glubokoy perforatsii neftegazovykh skvazhin* [Drilling perforator for deep perforation of oil-and-gas wells]. Patent RF, no. 163783, 2015. (In Russ.).
 14. Gallyamov Sh.R., Mesropyan A.V., Mityagina M.O. *Sverlyashchiy perforator s elektrogidravlicheskoj sistemoy dlya vtorichnogo vskrytiya plastov* [Drilling perforator with electrohydraulic system for strata completion]. Patent RF, no. 2465443, 2011. (In Russ.).
 15. Davletova L.U., Mesropyan A.V., Mityagina M.O. *Sverlyashchiy perforator s elektrogidravlicheskoj sistemoy i regulirovkoy naklona bura* [Drilling perforator with electrohydraulic system and the well borer angle pitch adjustment]. Patent RF, no. 2466269, 2011. (In Russ.).
 16. Kudinov V.I., Suchkov B.M. *Novye tekhnologii povysheniya dobychi nefti* [New technologies for increasing oil production]. Samara, Knizhnoe izdatelstvo Publ., 1998. 368 p.
 17. Kapyrin Yu.V., Khrapova E.I., Kashitsin A.V. The use of complex technology of the stratum completion to increase the well flow rates. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2001, no. 6, pp. 58–60.
 18. Seyd-Rza M.K. *Tekhnologiya bureniya glubokikh skvazhin v oslozhnennykh usloviyakh* [The technology of deep-well drilling in severe environment]. Baku, Azerneshr Publ., 1963. 338 p.
 19. Mesropyan A.V., Mityagina M.O. The problem of improving quality of secondary opening of oil and gas formations by means of electrohydraulic boring perforating guns. *Neftepromyslovoe delo*, 2013, no. 5, pp. 19–23.
 20. Ayukhanova E.R., Gallyamov Sh.R., Mesropyan A.V. Geophysical equipment with the electrohydraulic control system for the research of oil-and-gas-bearing strata. *Sbornik nauchnykh трудов "Gidropnevmoavtomatika i gidroprivoд–2010"*. Kovrov, KGTA im. V.A. Degtyareva Publ., 2010, pp. 212–214.

THE PRODUCTIVE STRATUM COMPLETION USING THE ELECTROHYDRAULIC DRILLING PERFORATOR WITH THE STINGER ROTATING MECHANISM

© 2018

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

M.R. Rakhmatullina, graduate student

Ufa State Aviation Technical University, Ufa (Russia)

Keywords: productive strata completion; drilling perforation; cumulative perforation; oil recovery index; oil recovery.

Abstract: The global trends of the energy consumption growth, oil recovery enhancement, alongside with the regulatory requirements strengthening and the strengthening of laws regarding the ensuring of rational nature management, the ecology, and industrial safety requirements predetermine the urgency and the demand for the development and implementation of new technological, schematic and layout solutions providing high-quality reservoir-to-well connectivity. The paper considers the issues of improving the quality of oil- and gas-bearing strata completion, analyzes the existing methods and engineering tools for productive stratum completion. The authors put forward the arguments proving that, in the context of providing the reservoir-to-well connectivity and the compliance with the major criteria of completion efficiency, the application of drilling perforation is the most rational for work with the well stock, especially in complex reservoirs, and when working in slant directional and horizontal wells.

The authors carried out the patent survey and the analysis of the existing engineering tools, in the result of which they offered the advanced drilling perforator with the electrohydraulic system and stringer rotating mechanism for the oil- and gas-bearing strata completion that saves the filtration properties of a stratum by tapping it sparingly, ensures high quality of the reservoir-to-well connectivity, and contributes to the increasing oil recovery factor due to the multiple perforations.

It is identified that the high-quality reservoir-to-well connectivity and the oil recovery increase depend considerably on the perforators' technical parameters and are ensured by the proper simulation of the operational processes within the critical constructional elements of a perforator.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА С ЗАГОТОВКОЙ ПРИ НАЛОЖЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

© 2018

А.Н. Унянин, доктор технических наук, доцент
Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск (Россия)
А.В. Хазов, заместитель главного инженера
АО «Ульяновский механический завод», Ульяновск (Россия)

Ключевые слова: шлифование; шлифовальный круг; ультразвуковые колебания; кинематика; абразивное зерно; механическая обработка заготовок.

Аннотация: Одним из эффективных средств повышения эффективности операций механической обработки заготовок является рациональное использование энергии ультразвуковых колебаний (УЗК). Для разработки рекомендаций по выбору направления и амплитуды УЗК в процессе шлифования выполнены исследования кинематики взаимодействия шлифовального круга с заготовкой. Предложены аналитические зависимости для расчета скорости перемещения абразивного зерна относительно заготовки, количества абразивных зерен, контактирующих с заготовкой, и параметра Ra шероховатости обработанной поверхности при шлифовании с УЗК. С использованием этих зависимостей выполнено численное моделирование для различных условий и режима шлифования. Установлено, что при наложении на заготовку колебаний в направлении, совпадающем с вектором рабочей скорости шлифовального круга, для уменьшения силы трения в зоне контакта круга с заготовкой необходимы колебания с частотой, выходящей за пределы частотного диапазона промышленных ультразвуковых установок. Наложение колебаний в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, приводит к существенному увеличению высотных параметров шероховатости этой поверхности. При наложении колебаний в направлении, совпадающем с осью круга, обеспечиваются минимальные высотные параметры шероховатости, а за счет прерывистого контакта зерен с заготовкой возможно снижение коэффициента трения, поэтому УЗК целесообразно накладывать в этом направлении. Для наложения колебаний на заготовку использовали устройство, в котором она закрепляется между излучателем колебаний и опорой и является одним из звеньев колебательной системы. Экспериментальные исследования, выполненные при плоском шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т, позволили установить, что наложение колебаний амплитудой $2A_z=6\dots 9$ мкм в направлении, совпадающем с осью круга, обеспечивают снижение сил шлифования на 10...15 %, износа круга на 25...40 %, параметра шероховатости Ra на 12...15 %.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей повышения эффективности операций механической обработки является наложение на элементы технологической системы колебаний ультразвуковой частоты. Использование ультразвуковых колебаний (УЗК) изменяет кинематику процесса резания [1; 2] и способствует снижению коэффициента трения в зоне контакта инструмента с заготовкой [3; 4]. Под влиянием УЗК интенсифицируются процессы проникновения смазочно-охлаждающих технологических средств в зону обработки и реализации ими своих технологических свойств [5; 6]. В результате снижается теплосиловая напряженность процесса [7; 8], повышается работоспособность инструмента и качество деталей [4; 9].

Значительное количество работ направлено на изучение кинематики шлифования [10; 11 и др.], однако лишь в немногих анализируется кинематика шлифования с наложением УЗК. В работе [12] рассматривается кинематика микрорезания единичными абразивными зернами (АЗ), приводится схема траектории движения абразивных зерен относительно заготовки. Аналитические зависимости, описывающие закономерности движения АЗ относительно заготовки при наложении УЗК, не приведены. Отсутствие аналитических исследований затрудняет разработку рекомендаций, касающихся использования УЗК (направление и амплитуда колебаний) для повышения эффективности процесса шлифования.

Цель исследования – разработка рекомендаций по выбору направления и амплитуды УЗК в процессе шлифования.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На заготовку могут быть наложены колебания в следующих направлениях [2; 13] (рис. 1): нормальные (в направлении оси y , перпендикулярной обрабатываемой поверхности), продольные (в направлении оси x , совпадающей с вектором рабочей скорости круга) и поперечные (в направлении оси z , совпадающей с осью круга). Однако наложение колебаний в любом направлении приводит к колебаниям заготовки и в направлениях, перпендикулярных распространению колебаний, за счет наличия сдвиговых волн [13]. Амплитуду колебаний в направлениях, перпендикулярных распространению колебаний, можно рассчитать как произведение амплитуды УЗК и коэффициента Пуассона. Для большинства сталей этот коэффициент равен $\mu=0,3$, поэтому амплитуды колебаний, возникающих за счет распространения сдвиговых волн, достаточны для влияния на процесс шлифования.

Наложение колебаний в направлении оси x , совпадающей с вектором рабочей скорости шлифовального круга V_k , оказывает влияние на скорость перемещения АЗ относительно заготовки, которая может быть рассчитана по зависимости

$$V_{аз}^x = V_k + \Delta V_x \cdot \cos \omega \cdot \tau,$$

где V_k – рабочая скорость круга, м/с;
 ω – циклическая (круговая) частота колебаний, рад/с;
 τ – время, с;

ΔV_x – амплитуда (максимальное значение) колебательной скорости частиц материала заготовки при наложении УЗК, м [14; 15].

$$\Delta V_x = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A_x,$$

где f – частота колебаний, 1/с;

A_x – амплитуда колебаний в направлении оси x .

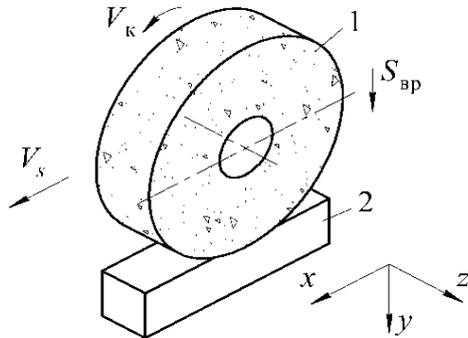


Рис. 1. Схема наложения колебаний на заготовку:
1 – шлифовальный круг; 2 – заготовка

Если амплитуда колебательной скорости $\Delta V_x < V_k$, то направление скорости движения АЗ относительно заготовки в любой момент времени совпадает с направлением рабочей скорости круга V_k , а сила трения АЗ о заготовку остается такой же, как и при отсутствии УЗК. Если $\Delta V_x > V_k$, то в течение части периода колебаний относительная скорость будет направлена в сторону, противоположную направлению V_k . В этом случае реализуется процесс прерывистого диспергирования материала заготовки абразивными зёрнами, поэтому эффективная сила трения уменьшается [1; 15].

Частота колебаний, достаточная для изменения направления скорости перемещения АЗ относительно заготовки, может быть определена из зависимости

$$f > \frac{V_k}{2 \cdot \pi \cdot A_x}.$$

При $A_x = 5 \cdot 10^{-6}$ м, $V_k = 35 \dots 120$ м/с данная частота должна быть $f > (1114 \dots 3821) \cdot 10^3$ Гц, что значительно превышает используемый частотный диапазон промышленных ультразвуковых установок, который составляет 18...40 кГц.

Когда частицы материала заготовки колеблются в направлении оси y , возможен прерывистый контакт АЗ с заготовкой, при котором сила трения действует в течение части периода их контакта, что приведет к ее снижению [1; 15]. Согласно [1] качественное изменение процесса взаимодействия АЗ с заготовкой достигается, когда время их контакта превышает четверть периода ультразвуковых колебаний. Учитывая зависимости для расчета времени и длины траектории контакта круга с заготовкой [10; 16], получено условие влияния УЗК на процесс взаимодействия АЗ с заготовкой на качественном уровне:

$$f \geq \frac{V_k}{4 \cdot \sqrt{D_k \cdot t}},$$

где D_k – диаметр шлифовального круга, м;

t – глубина шлифования, м.

Например, при $D_k = 0,2$ м, $t = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м, $V_k = 35 \dots 120$ м/с минимальная частота УЗК, при которой имеет место качественное изменение процесса шлифования, составит $f = 6200 \dots 21255$ Гц. Используемый частотный диапазон промышленных УЗ установок превышает рассчитанный, поэтому качественное изменение процесса может быть достигнуто практически при всех условиях и режиме шлифования.

Максимальная глубина внедрения АЗ в заготовку при наличии колебаний в нормальном направлении равна

$$a_m^1 = a_m + A_y,$$

где a_m – глубина внедрения АЗ в заготовку при отсутствии колебаний [16; 17];

A_y – амплитуда колебаний в направлении оси y .

Число зерен, диспергирующих материал заготовки при шлифовании без колебаний, можно определить по зависимости [11; 18]:

$$z_{кр} = n_{зк} \cdot c_k \cdot \left(\frac{h_n + a_m}{d_0} \right)^\alpha,$$

где c_k и α – коэффициенты [11];

h_n – суммарная величина скалывания АЗ в процессе правки и его износа, м;

d_0 – средневероятный размер АЗ, м;

$n_{зк}$ – число зерен на поверхности круга, ограниченной размерами контактной зоны.

При шлифовании с наложением колебаний глубина залегания АЗ, диспергирующих материал заготовки, увеличивается на величину A_y , поэтому коэффициент, характеризующий увеличение количества АЗ при колебании частиц материала заготовки в направлении оси y , равен

$$k_z = \frac{(h_n + a_m + A_y)^\alpha}{(h_n + a_m)^\alpha}.$$

При следующих исходных данных: $a_m = 5 \cdot 10^{-6}$ м [17]; $h_n = 10 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha = 2,75$ [11; 18] – коэффициент $k_z = 1,65$ при $A_y = 3 \cdot 10^{-6}$ м и $k_z = 4$ при $A_y = 10 \cdot 10^{-6}$ м.

Поскольку при наложении УЗК сьем материала заготовки осуществляется большим количеством АЗ, на каждое из них приходится меньший объем диспергируемого материала, что позволяет прогнозировать меньший износ и засаливание зерен а следовательно, больший период стойкости круга. С увеличением амплитуды колебаний количество зерен, диспергирующих материал заготовки при колебании ее частиц в нормальном направлении, существенно увеличивается. Однако колебания частиц материала заготовки в направлении оси y могут привести к увеличению высотных параметров микрогеометрии обработанной поверхности за счет увеличения разновысотности АЗ круга [11; 18].

Очевидно, минимальные значения высотных параметров шероховатости могут быть достигнуты при наложении на заготовку УЗК в направлении, совпадающем

с осью шлифовального круга. Колебание частиц материала заготовки в этом направлении, как и шлифование с поперечной подачей, приводит к увеличению количества АЗ, формирующих микрорельеф заготовки [11], вследствие чего уменьшаются высотные параметры шероховатости. Однако при наложении на заготовку УЗК в направлении оси y за счет сдвиговых волн колебания в заготовке распространяются и в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности, но с меньшей амплитудой ($A_y = A_z \cdot \mu$), что эквивалентно увеличению разнорысности АЗ.

Полагаем, что при колебании заготовки в направлении оси z число зерен, контактирующих с заготовкой, увеличивается на величину, равную отношению поперечного перемещения заготовки, приходящегося на один оборот шлифовального круга, к его высоте [11; 18], а разнорысность абразивных зерен увеличится на величину, равную амплитуде колебаний заготовки в нормальном направлении A_y . Поэтому зависимость, предложенная для расчета параметра Ra шероховатости шлифованной поверхности при плоском шлифовании периферией круга без поперечной подачи [11], при наложении на заготовку поперечных УЗК примет вид [19]

$$Ra_{yзк} = M_5 \cdot \left[\frac{(H_0 + A_y)^k}{n \cdot z_0 \cdot (1 + K_z) \cdot \left(\frac{V_k}{V_{сп}} \pm 1 \right) \cdot \sqrt{D_k}} \right]^{\frac{1}{k+m+0,5}}, \quad (1)$$

где H_0 – разнорысность активных АЗ круга, м [11; 18]; $V_{сп}$ – скорость продольной подачи, м/с; M_5, k, m – коэффициенты;

$$n = 6,43 \cdot d_0^{-0,14};$$

z_0 – число зерен, приходящихся на единицу рабочей поверхности шлифовального круга, $1/м^2$;

K_z – коэффициент, учитывающий увеличение числа зерен, контактирующих с заготовкой, при колебании ее в поперечном направлении. Знак «+» справедлив для встречного, а «-» для попутного шлифования.

$$H_0 = \frac{h_0}{\sqrt[k]{F(h_{ск})}}, \quad (2)$$

где h_0 – расстояние уровня скалывания абразивных зерен круга от наиболее выступающих вершин зерен, м; $F(h_{ск})$ – функция распределения вершин зерен при значениях аргумента $h_{ск}$;

$h_{ск}$ – расстояние от вершин сколовшихся зерен до среднего уровня связки, м.

Для расчета коэффициента K_z предложена зависимость [19]

$$K_z = \frac{4 \cdot \pi \cdot A_z \cdot D_k \cdot f}{H \cdot V_k}. \quad (3)$$

Адекватность зависимостей (1) и (3) доказана путем сравнения расчетных и экспериментальных значений параметра Ra шлифованных с наложением УЗК поверхностей деталей [19].

С использованием зависимостей (1)–(3) выполнен расчет параметра Ra при плоском шлифовании заготовок из стали 12Х18Н10Т ($\mu=0,3$) кругом 25А25(Ф60)ПСМ1(К)6К6(У) (в скобках приведены обозначения зернистости, твердости и связки круга по ГОСТ Р 52381) ($d_0=0,25$ м; $z_0=9,9 \cdot 10^6$ $1/м^2$ [16]) диаметром $D_k=0,2$ м без поперечной подачи. Режим шлифования: $V_k=35$ м/с; $V_{сп}=10$ м/мин= $0,17$ м/с. Высота шлифовального круга $H=0,02$ м. Провка круга осуществляется алмазным карандашом типа 01 со скоростью продольной подачи 0,3 м/мин и поперечной подачей 0,02 мм/ход. Для данного случая при $h_{ск}/d_0=1,38$, $h_0=20 \cdot 10^{-6}$ м, $k=2,9$, $F(h_{ск})=0,57$ [11]. Расчеты выполнены для случая наложения на заготовку поперечных (в направлении оси z) и нормальных (в направлении оси y) колебаний частотой 18,6 КГц и амплитудой 10 мкм (таблица 1).

При наложении на заготовку нормальных колебаний амплитудой $A_y=10$ мкм разнорысность зерен H_0+A_y увеличивается до 0,0343 мкм; коэффициент K_z , учитывающий увеличение числа зерен, контактирующих с заготовкой, составил 0,2, а параметр Ra увеличился до 2,29 мкм. Наложение поперечных колебаний амплитудой $A_z=10$ мкм обеспечивает увеличение разнорысности зерен в меньшей степени – до 0,0273 мкм, однако за счет увеличения коэффициента K_z до 0,67 параметр Ra снизился до 1,8 мкм.

Таким образом, при наложении на заготовку поперечных колебаний следует прогнозировать минимальные значения высотных параметров шероховатости обработанной поверхности. При этом амплитуда колебаний частиц материала заготовки в нормальном направлении A_y сопоставима со средними толщинами среза, которые по данным [17] при окончательном шлифовании составляют 3...6 мкм при $V_k=40$ м/с и 2,6...4 мкм при $V_k=80$ м/с, т.е. является достаточной, чтобы уменьшить коэффициент трения за счет прерывистого контакта АЗ с заготовкой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполнены при шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т при наложении на заготовки поперечных колебаний частотой 18,6 кГц с амплитудой $2A_z$, варьируемой в пределах 3...12 мкм. Врезная подача составила 0,01 мм/дв. ход. Остальные условия и элементы режима совпадают с теми, при которых рассчитывали параметр Ra . Для наложения УЗК на заготовку предложено устройство, в котором она закрепляется между излучателем колебаний и опорой и является одним из звеньев колебательной системы [20]. Плотный контакт излучателя с заготовкой позволяет минимизировать потери энергии УЗК и обеспечить высокую амплитуду колебаний заготовки (рис. 2).

С увеличением амплитуды УЗК до значения $2A_z=9$ мкм параметр Ra уменьшается, что можно объяснить увеличением числа зерен, контактирующих с заготовкой, в результате чего увеличивается коэффициент K_z . Наложение на заготовку УЗК с амплитудой 9 мкм привело к снижению параметра Ra на 23 %.

Минимальный износ круга после 80 двойных ходов зафиксирован при шлифовании заготовок из сталей 3Х3М3Ф и 12Х18Н10Т с амплитудой УЗК $2A_z$, равной 6 и 9 мкм соответственно (рис. 3). Этот износ ниже на 42 и 24 %, чем при шлифовании без наложения УЗК.

Таблица 1. Результаты численного моделирования параметра Ra

Способ шлифования	Амплитуда колебания, мкм		Коэффициент K_z	Разновысотность АЗ, $H_0 + A_y$, мкм	Ra , мкм
	A_y	A_z			
Без наложения УЗК	0	0	0	0,0243	1,9
С наложением УЗК в направлении оси y, $A_y=10$ мкм	10	3	0,2	0,0343	2,29
С наложением УЗК в направлении оси z, $A_z=10$ мкм	3	10	0,67	0,0273	1,8

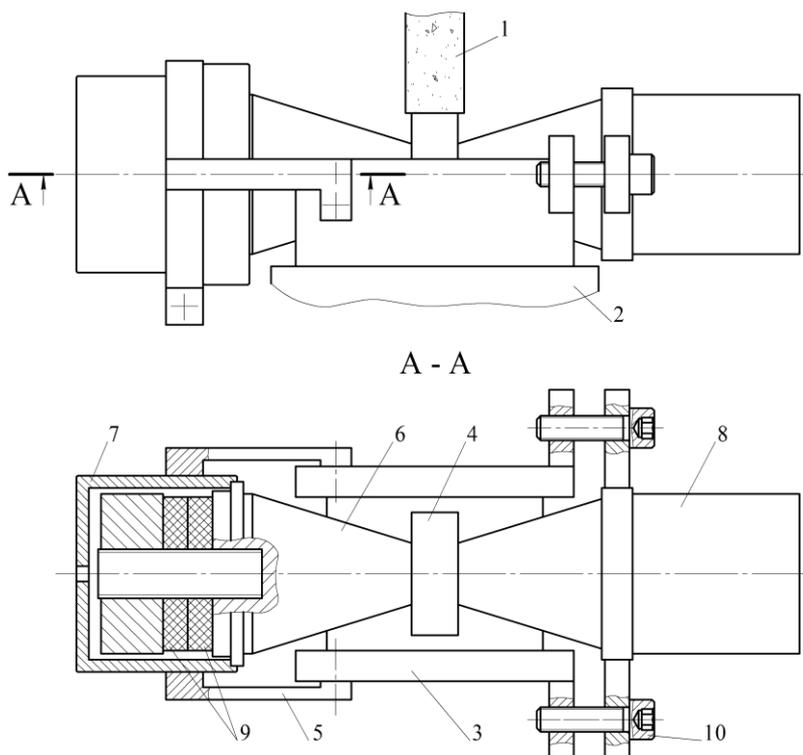


Рис. 2. Схема наложения УЗК на заготовку: 1 – шлифовальный круг; 2 – магнитная плита станка; 3 – рамка; 4 – заготовка; 5 – кронштейн; 6 – излучатель; 7 – корпус; 8 – опора; 9 – пьезопреобразователи; 10 – винты

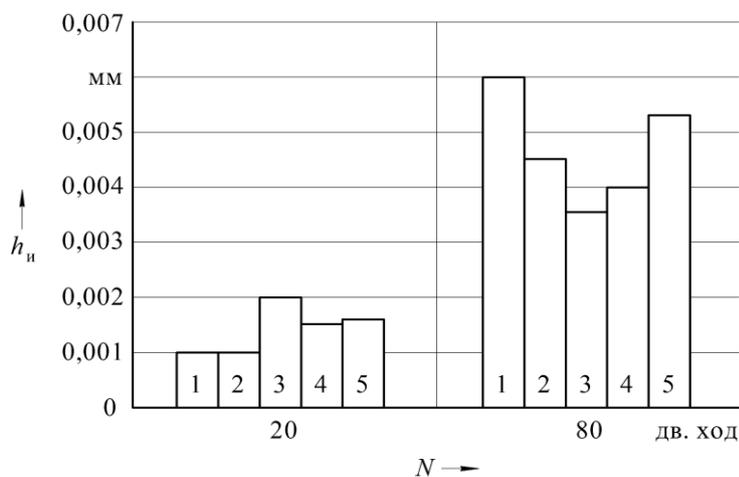


Рис. 3. Зависимость износа ШК h_w от числа двойных ходов N и амплитуды A_z УЗК, накладываемых на заготовку: 1 – без воздействия; 2 – $2A_z=3$ мкм; 3 – $2A_z=6$ мкм; 4 – $2A_z=9$ мкм; 5 – $2A_z=12$ мкм; материал заготовки – 3ХЗМ3Ф

При увеличении амплитуды колебаний до 12 мкм износ круга увеличивается. После выполнения 80 рабочих ходов составляющие силы шлифования с УЗК практически не увеличились и оказались ниже на 10...15 %, чем при шлифовании без УЗК [21].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Анализ кинематики взаимодействия абразивных зерен шлифовального круга с материалом заготовки при наложении УЗК в различных направлениях позволяет сделать следующие выводы:

– при наложении продольных (в направлении оси x) УЗК для изменения направления скорости АЗ относительно заготовки и уменьшения за счет этого силы трения в зоне контакта АЗ с заготовкой необходимы колебания с частотой, выходящей за пределы частотного диапазона промышленных УЗ установок, поэтому колебания в данном направлении накладываются нецелесообразно;

– наложение нормальных (в направлении оси y) колебаний значительно увеличивает количество АЗ, диспергирующих материал заготовки, что позволяет прогнозировать меньший износ и засаливание АЗ, а следовательно, больший период стойкости шлифовального круга, однако при этом формируются значительные высотные параметры микрогеометрии обработанной поверхности;

– при наложении на заготовку поперечных (вдоль оси z) колебаний обеспечиваются минимальные высотные параметры шероховатости, а амплитуда колебаний частиц материала заготовки в нормальном направлении является достаточной, чтобы уменьшить коэффициент трения за счет прерывистого контакта АЗ с заготовкой, поэтому накладывать колебания целесообразно в этом направлении.

Экспериментальные исследования показали, что накладывать на заготовку УЗК целесообразно в направлении оси круга с амплитудой $2A_z=6...9$ мкм. При этом обеспечивается снижение сил шлифования на 10...15 %, износа круга на 25...40 %, параметра шероховатости Ra на 15 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. М.: Машиностроение, 1970. 353 с.
2. Агапов С.И., Сидякин Ю.И. Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука. Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. 148 с.
3. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
4. Нерубай М.С. Физико-механические методы обработки. Куйбышев: КуАИ, 1979. 92 с.
5. Киселев Е.С., Ковальногов В.Н. Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.
6. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием / под ред. Л.В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
7. Агапов С.И., Головкин В.В. Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука. Самара: СНЦ, 2010. 134 с.
8. Унянин А.Н. Влияние технологических факторов на локальные температуры при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // Вектор науки

- Тольяттинского государственного университета. 2016. № 1. С. 48–53.
9. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
 10. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Ленингр. ун-т, 1981. 144 с.
 11. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Сарат. ун-т, 1975. 191 с.
 12. Tawakoli T., Azarhoushang B., Rabiey M. Ultrasonic-assisted grinding of soft steel // *Industrial Diamond Review*. 2009. № 1. P. 40–41.
 13. Волгин М.Ф., Калашников В.В., Нерубай М.С., Штриков Б.Л. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.
 14. Балдев Р., Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука. М.: Техносфера, 2006. 576 с.
 15. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
 16. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 298 с.
 17. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. 248 с.
 18. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Сарат. ун-т, 1989. 191 с.
 19. Унянин А.Н., Арзамасцев Я.А. Формирование микрогеометрии шлифованной поверхности при наложении на заготовку ультразвуковых колебаний // *Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XIX международной научно-технической конференции*. Т. 3. Донецк: ДонНТУ, 2012. С. 24–26.
 20. Унянин А.Н., Терехин И.Ю. Способ плоского шлифования с наложением ультразвуковых колебаний: патент РФ № 2418671, 2008.
 21. Унянин А.Н., Арзамасцев Я.А. Изнашивание шлифовального круга при наложении на заготовку ультразвуковых колебаний // *Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: материалы IV Международной научно-технической конференции*. Ч. I. Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2012. С. 291–296.

REFERENCES

1. Poduraev V.N. *Obrabotka rezaniem s vibratsiyami* [Cutting with vibrations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 353 p.
2. Agapov S.I., Sidiyakin Yu.I. *Narezanie zubchatykh kolez s ispolzovaniem ultrazvuka* [Gear cutting using ultrasonic]. Volgograd, IUNL BolgGTU Publ., 2010. 148 p.
3. Markov A.I. *Ultrazvukovaya obrabotka materialov* [Ultrasonic processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 237 p.
4. Nerubay M.S. *Fiziko-mekhanicheskie metody obrabotki* [Physical and mechanical processing methods]. Kuybyshev, KuAI Publ., 1979. 92 p.
5. Kiselev E.S., Kovalnogov V.N. *Mekhanicheskaya obrabotka zagotovok v usloviyakh kriticheskogo teplomassoperenosa* [Mechanical processing of blank parts in the circumstances of critical heat and mass transfer]. Moscow, RAN Publ., 2008. 250 p.

6. Khudobin L.V., ed. *Smazochno-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva i ikh primeneniye pri obrabotke rezaniem* [Lubricating and cooling technology tools and their use in machining]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
7. Agapov S.I., Golovkin V.V. *Povysheniye effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki putem primeneniya ultrazvuka* [Efficiency improvement of mechanical treatment by means of ultrasonic application]. Samara, SNTs Publ., 2010. 134 p.
8. Unyanin A.N. The influence of technology factors on the local temperatures during the ultrasonically assisted grinding. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 1, pp. 48–53.
9. Kumabe D. *Vibratsionnoye rezaniye* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 424 p.
10. Ostrovskiy V.I. *Teoreticheskiye osnovy protsessov shlifovaniya* [Theoretical background of grinding process]. Leningrad, Leningr. un-t Publ., 1981. 144 p.
11. Korolev A.V. *Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke* [Surface Formation in Tools and Components during Abrasive Machining]. Saratov, Sarat. un-t Publ., 1975. 191 p.
12. Tawakoli T., Azarhoushang B., Rabiey M. Ultrasonic-assisted grinding of soft steel. *Industrial Diamond Review*, 2009, no. 1, pp. 40–41.
13. Volgin M.F., Kalashnikov V.V., Nerubay M.S., Shtrikov B.L. *Primeneniye ultrazvuka i vzryva pri obrabotke i sborke* [Application of ultrasonic vibrations and explosion when processing and assembling]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p.
14. Baldev R., Radzhendran V., Palanichami P. *Primeneniye ultrazvuka* [Application of ultrasound]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 576 p.
15. Golyamina I.P., ed. *Ultrazvuk. Malenkaya entsiklopediya* [Ultrasound. Small Encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1979. 400 p.
16. Khudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizatsiya zasalivaniya shlifovalnykh krugov* [Minimizing brining grinding wheels]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2007. 298 p.
17. Filimonov L.N. *Vysokoskorostnoye shlifovaniye* [High Speed Grinding]. Leningrad, Mashinostroenie, Leningr. otd-nie Publ., 1979. 248 p.
18. Korolev A.V. *Teoretiko-veroyatnostnyye osnovy abrazivnoy obrabotki* [Theoretical and Probabilistic Basis Abrasion]. Saratov, Sarat. un-t Publ., 1989. 191 p.
19. Unyanin A.N., Arzamastsev Ya.A. The formation of micro-geometry of grinded surface when applying the ultrasonic vibrations on a workpiece. *Mashinostroeniye i tekhnosfera XXI veka: sbornik trudov XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Donetsk, DonNTU Publ., 2012. Vol. 3, pp. 24–26.
20. Unyanin A.N., Terekhin I.Yu. *Sposob ploskogo shlifovaniya s nalozheniem ultrazvukovykh kolebaniy* [The technique of flat grinding with the ultrasonic vibrations applying], patent RF no. 2418671, 2008.
21. Unyanin A.N., Arzamastsev Ya.A. Abrasive wheel wear when applying ultrasonic vibrations on a workpiece. *Naukoemkiye tekhnologii v mashinostroenii i aviadvigatelistroenii: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Rybinsk, RGATU imeni P.A. Soloveva Publ., 2012. Ch. I, pp. 291–296.

THE STUDY OF KINEMATICS OF INTERACTION OF A GRINDING WHEEL WITH A WORKPIECE WHEN APPLYING ULTRASONIC VIBRATIONS

© 2018

A.N. Unyanin, Doctor of Sciences, Associate Professor
Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk (Russia)

A.V. Khazov, deputy chief engineer
JSC "Ulyanovsk Mechanical Plant", Ulyanovsk (Russia)

Keywords: grinding; grinding wheel; ultrasonic vibrations; kinematics; abrasive grain; mechanical processing of work materials.

Abstract: One of the effective means of improving the efficiency of the operations of work materials mechanical processing is the rational use of the ultrasonic vibrations energy (UVE). To develop the recommendations on the selection of the UVE direction and amplitude, within the grinding process, the study of the kinematics of interaction of a grinding wheel and a workpiece is carried out. The authors suggested the analytic dependences to calculate the velocity of displacement of an abrasive grain against a workpiece, the number of abrasive grains contacting with the workpiece, and the Ra parameter of surface roughness when grinding with the UVE. Using these dependencies, the numerical simulation for various conditions and grinding mode is carried out. It is determined that when applying vibrations to the workpiece in the direction coinciding with the vector of the operating velocity of a grinding wheel, to decrease the frictional force within the contact zone of a wheel with a workpiece, the vibrations with the frequency going beyond the frequency range of the industrial ultrasonic devices are required. The applying of vibrations in the direction perpendicular to the processed surface causes the significant increase in the altitude parameters of the roughness of this surface. When applying vibrations in the direction coinciding with the wheel axis, minimal altitude roughness parameters are achieved, and due to the intermittent contact of grains with the workpiece it is possible to decrease the friction ratio, consequently, it is reasonable to apply UVE in the same direction. To apply vibrations to a workpiece, the authors used the device where the workpiece is being fixed between the vibration sender and the bearer and is considered to be one of the parts of the vibrating system. The experimental study carried out when flat grinding of blank parts made of 3H3M3F and 12H18H10T steels allowed determining that the applying of vibrations with the amplitude of $2A_z=6...9 \mu\text{m}$ in the direction coinciding with the wheel axis ensures the decrease in the grinding force by 10...15 %, wheel wear by 25...40 %, Ra roughness parameter by 12...15 %.

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ДЕФОРМИРОВАНИЯ В РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЯХ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

© 2018

П.Н. Шенбергер, старший преподаватель кафедры
«Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: оптимальный зазор; напряжения и деформации при резке; разделительные операции; образование трещин.

Аннотация: В статье рассматривается механизм деформирования при резке тонколистового материала с целью прогнозирования качества профиля реза путем рационального выбора зазора и показателей системы «заготовка – секционный рабочий инструмент». Задачи исследования решались для плоской деформации с использованием конечно-элементной модели процесса резки. На основании результатов расчета выполнено описание напряженно-деформированного состояния материала в зоне реза для четырех стадий процесса. Определены показатели напряженно-деформированного состояния и условия в материале, которые приводят к образованию трещины. Выполнена оценка степени влияния усилия деформирования и прижима на величины упругих деформации секций и значение зазора. Установлено значение распирающего усилия, которое соответствует величине от 10 до 30 % от максимального усилия разделительной операции. В работе отмечено, что значительное влияние на изменение величины зазора между режущими секциями оказывает боковое распирающее усилие. Выявлено, что изменение величины зазора под влиянием упругих деформаций верхней и нижней секции невелико и находится в пределах допуска рекомендуемого зазора. Предложено условие получения качественной поверхности профиля реза, которое обеспечивается в случае совпадения направления распространения трещины с направлением, соединяющим режущие кромки на секциях верха и низа. Установлено, что оптимальный зазор для значений параметров, используемых в работе, составляет 5 % от толщины материала, что согласуется с производственными результатами. Анализ распределения полей главных нормальных напряжений в очаге деформации позволил установить, что напряжения, будучи растягивающими, способствуют раскрытию скалывающихся трещин, возникающих в слоях заготовки, расположенных вблизи от режущих кромок. В статье отмечено, что распространению скалывающейся трещины от режущей кромки верхнего инструмента способствует большее значение результирующей величины главного нормального растягивающего напряжения в очаге деформации у верхнего инструмента, чем у режущей кромки нижнего инструмента.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование характера распределения напряжений в деформируемом материале необходимо как для более полного выявления механизма деформирования в разделительных операциях холодной листовой штамповки, так и для установления способов управления процессом разделения с целью получения деталей высокого качества.

Изучению разделительных операций при резке тонколистовых заготовок посвящено значительное количество работ. В основном в процессе анализа разделительных операций рассматриваются напряженно-деформированное состояние металла [1–3], силовые режимы технологического процесса [4; 5], методики определения критерия разрушения материала [6; 7], а также размеры и форма инструмента [8–10], обеспечивающие получение качественной поверхности среза для различных металлов.

Значительный вклад в развитие методов анализа процессов разделительных операций внесли работы, посвященные исследованиям особенностей механизма деформирования материала при выполнении разделительных операций листовой штамповки [11; 12], методам теоретического анализа и экспериментального исследования процессов резки [13], разработкам, относящимся к описанию напряженно-деформированного состояния в зоне реза [14], параметрам разрушения [15] и т. д.

В настоящее время все чаще исследование процессов резки металлов основывается на использовании методов численного моделирования с применением

программных систем, в основу которых заложен метод конечных элементов [16; 17]. Необходимость применения программ инженерного анализа для исследования процессов обработки металлов давлением связана с их возможностями в области моделирования сложных процессов со значительными пластическими деформациями и разрушением материалов [18].

В процессе разработки конструкций разделительных штампов последовательного действия [19–21] отдельное внимание уделяется проблеме определения и обеспечения оптимальной величины зазора между рабочим инструментом. Неверно подобранная величина зазора приводит к снижению качества профиля реза за счет появления дефектов в зоне разделения материала [22; 23].

Выбор величины зазора зависит от вида и толщины материала. Для вырубки крупногабаритных заготовок толщиной 0,8 мм из стали 08Ю ОСВ, предназначенных для автомобильной промышленности, величина двухстороннего зазора составляет в среднем от 4 до 16 % от толщины [24–26]. Величина зазора в указанных работах различна и может варьироваться в пределах от 20 %.

Повышение требований к качеству крупногабаритных тонколистовых деталей кузова современного автомобиля и проблемы, связанные с его обеспечением, определяют область настоящего исследования.

Основной задачей исследования является прогнозирование качества профиля реза тонколистовых заготовок на основе рационального выбора зазора и показателей системы «заготовка – рабочий инструмент».

Цель работы – совершенствование разделительных операций для тонколистового материала крупногабаритных заготовок путем рационального выбора зазора и показателей системы «заготовка – рабочий инструмент».

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рациональная величина зазора находилась на основе численного моделирования процесса разделительной операции. Схема напряженно-деформированного состояния в зоне реза принималась плоско-деформированной. Условие перехода тела в пластическое состояние задавалось законом Хилла для ортотропного тела. В качестве критерия разрушения использовался нормированный интегральный закон Cockcroft-Latham. Зазор между секционным рабочим инструментом анализировался в допустимом интервале значений от 0,03 до 0,065 мм. Минимальные размеры конечных элементов в зоне зазора составляли 5...7 мкм. Общее число конечных элементов достигало 21000.

Численный анализ процесса резки был реализован с помощью программы DEFORM-2D.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численное моделирование показало, что при различных технологических зазорах по мере увеличения нагрузки растет очаг деформации и концентрация напряжений у режущих кромок секций (рис. 1). По мере перемещения верхней секции интенсивность напряжений распространяется вглубь очага деформации. Максимальные главные деформации в зоне реза распределяются неравномерно, что свидетельствует об их неоднородности (рис. 2).

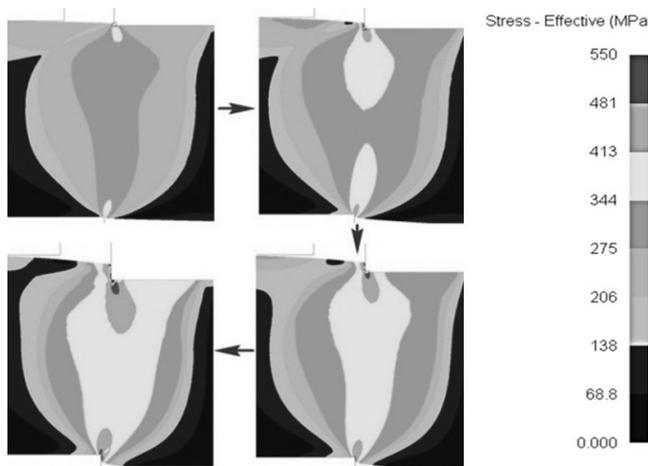


Рис. 1. Увеличение очага деформации по мере увеличения нагрузки (параметр – интенсивность напряжений)

Анализ напряженно-деформированного состояния материала в зоне реза был осуществлен для четырех стадий процесса (рис. 3):

- 1 – упругая деформация,
- 2 – упруго-пластическая деформация,
- 3 – упруго-пластическая стадия и начало разрушения,

4 – распространение трещины, ведущее к разрушению.

Уровни выбора данных расположены с шагом 0,1S для области исследования равной толщине материала (S) (рис. 4).

Полученные данные, представленные в виде графиков, позволили выполнить описание напряженно-деформированного состояния в зоне реза материала. Анализ максимальных главных напряжений в точке T1 показал, что наибольшее значение напряжения наблюдается под прижимом ввиду изгиба материала заготовки (рис. 5). В точке T2 градиент напряжений максимален в зазоре между инструментом. Для стадии процесса в точке T3 наблюдается увеличение напряжений в зазоре для материала со стороны секции низа и падение напряжений, соответствующих началу разрушения материала от режущей кромки секции верха.

Анализ максимальных главных деформаций показал, что во всех трех точках происходит рост градиента главных деформаций в направлении распространения трещины (рис. 6).

Скорость деформации также максимальна для участков заготовки под секцией верха (рис. 7). В точке T3 показано значительное увеличение скорости деформации, относящееся к формированию условий в материале для его разрушения, а также падение скорости для участков вблизи режущей кромки секции верха, в которых уже получила развитие трещина.

Для нахождения рациональной величины зазора необходимо учесть и оценить влияние деформации инструмента. Сопряженная задача определения упругих деформаций инструмента, выполненного из стали У10А, позволила установить степень влияния усилия деформирования и прижима на величины упругой деформации верхнего и нижнего рабочего инструмента и значение зазора (рис. 8, 9). Полученное значение распирающего усилия соответствует расчетному интервалу, согласно которому величина горизонтальной силы составляет от 10 до 30 % от максимального усилия разделительной операции.

Совместное влияние упругих деформаций верхнего и нижнего инструмента приводит к изменению величины зазора в пределах его допуска [26]. Величина смещения под действием упругих сил составляет от 20,2 до 32,8 % допуска на величину зазора, под влиянием прижима – от 3,3 до 4,3 %.

Результаты расчета показали, что большее влияние на изменение величины зазора оказывает действие бокового распирающего усилия на верхний инструмент за счет большей площади контакта материала заготовки и инструмента. Значение горизонтального смещения верхнего инструмента на 14 % выше, чем величина смещения нижнего инструмента.

Смещение режущих кромок инструмента, а также величина зазора формируют различные условия разрушения тонколистового материала. Численный расчет в условиях смещения рабочего инструмента показал, что при зазорах 0,03 и 0,06 мм траектория развития трещины вначале имеет дугообразный характер, а при величине зазора 0,04 мм проходит по прямолинейной траектории (рис. 10). Таким образом, при величине зазора 0,04 мм наблюдается точное совпадение скалывающихся трещин, идущих от режущих кромок.

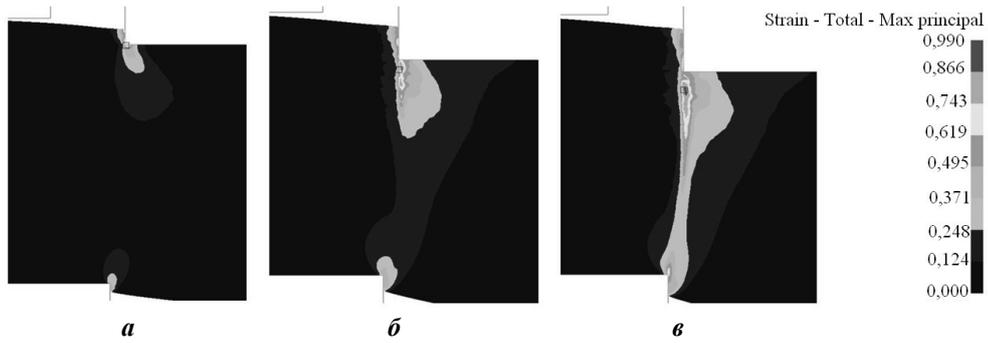


Рис. 2. Максимальные главные деформации: а – 0,1S; б – 0,19S; в – 0,23S



Рис. 3. Анализ напряженно-деформированного состояния материала в зоне реза для четырех стадий процесса

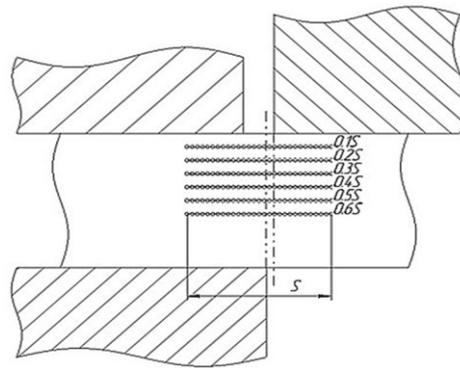


Рис. 4. Уровни анализа напряженно-деформированного состояния материала в зоне реза

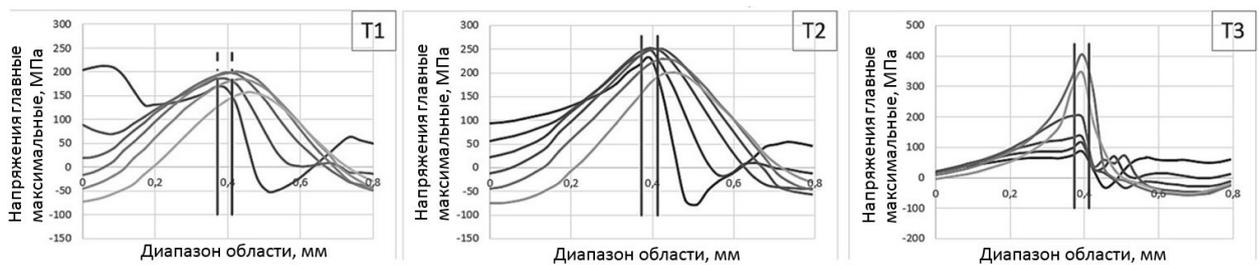


Рис. 5. Максимальные главные напряжения

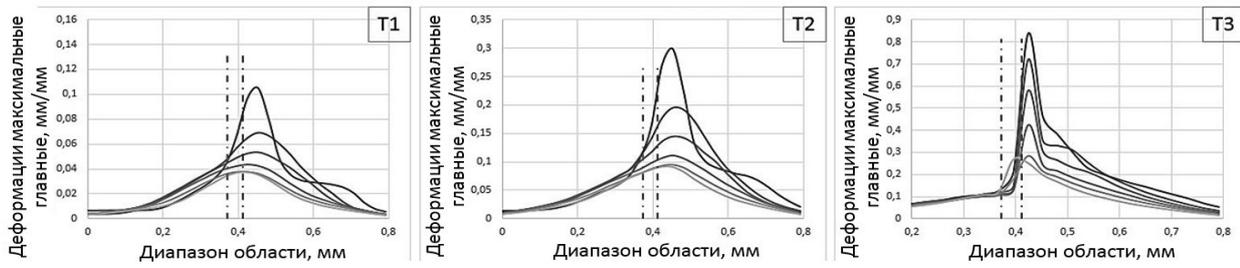


Рис. 6. Максимальные главные деформации

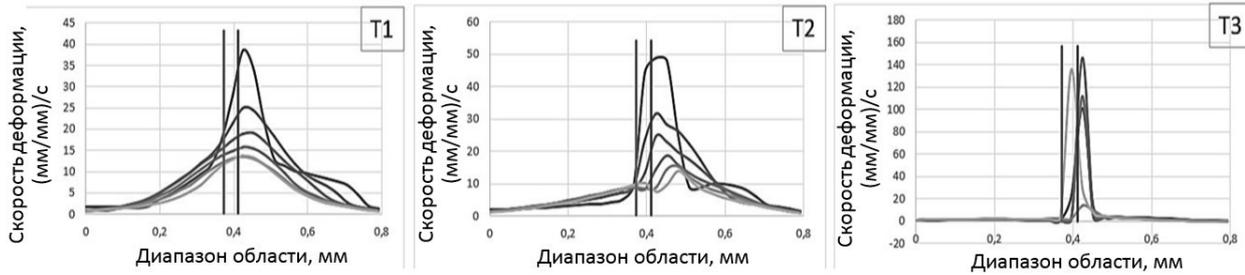


Рис. 7. Скорость деформации

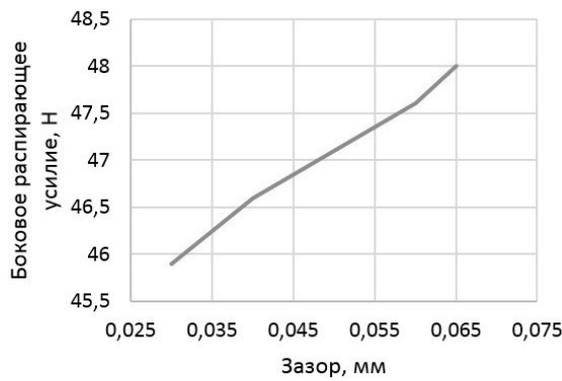


Рис. 8. Зависимость величины бокового распирающего усилия от величины зазора

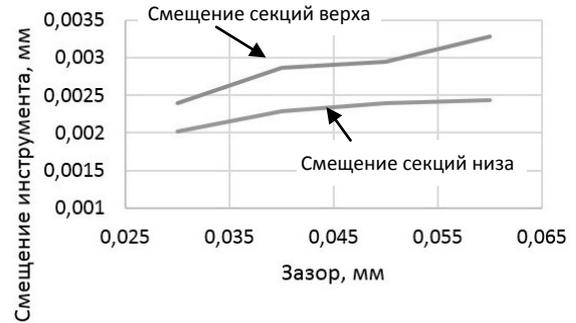


Рис. 9. График зависимости величины смещения режущих секций от величины зазора под действием распирающих сил

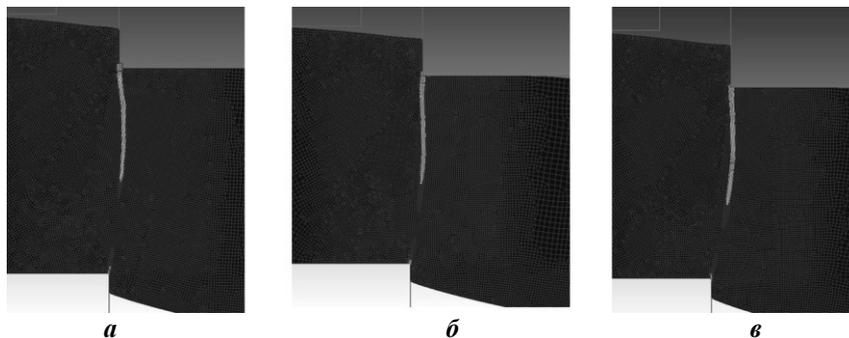


Рис. 10. Направления развития трещины при различной величине зазора: а – 0,03 мм; б – 0,04 мм; в – 0,06 мм

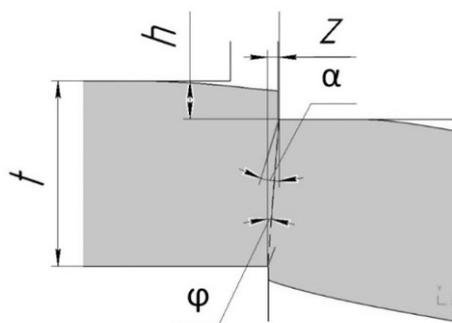


Рис. 11. Направление распространения трещины

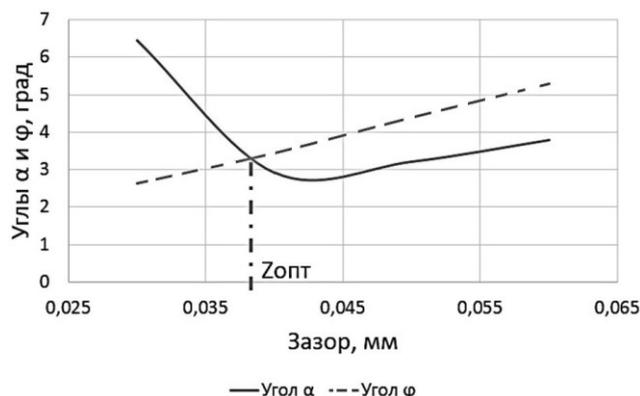


Рис. 12. Значения углов α и φ для различных зазоров с использованием результатов конечно-элементного анализа

Зазор будет оптимальным, когда направление распространения трещины совпадает с направлением, соединяющим режущие кромки инструментов (диагональная линия) (рис. 11) [1]:

$$\alpha = \varphi,$$

где α – угол распространения трещины;

φ – угол наклона отрезка, соединяющего кромки режущего инструмента в момент зарождения трещины.

Точное совпадение трещин, которые распространяются от режущих кромок, обеспечивает качественную поверхность реза.

Значения углов α и φ были рассчитаны для различных зазоров с использованием результатов конечно-элементного анализа (рис. 12). Оптимальный зазор для значений параметров, используемых в этой работе, составляет 5% от толщины материала, что согласуется с производственными результатами. Полученные значения углов в целом соответствуют интервалу значений углов распространения трещины, представленных в работах [14; 24].

В результате численных экспериментов получено значение угла распространения трещины (для стали 08Ю ОСВ толщиной 0,8 мм), при котором зазор оптимален, оно равно $3,4^\circ$. Найденная величина угла значительно меньше нижнего значения интервала (от 4 до 6°) изменения зазоров. В зависимости от пластичности металла также наблюдается изменение границ интервала угла распространения трещины.

Характер распределения полей главных нормальных напряжений в очаге деформации показал (рис. 5), что напряжения, будучи растягивающими, способствуют раскрытию скалывающихся трещин, возникающих в слоях заготовки, расположенных вблизи от режущих кромок. Полученный результат является подтверждением гипотез о направлении распространения трещины, представленных в работах [1; 11; 12].

Благодаря концентрации напряжений в устье трещины, последняя быстро развивается в толщину заготовки и при встрече трещин, идущих от режущих кромок навстречу друг другу, процесс разделения заготовки заканчивается.

Результирующая величина главного нормального растягивающего напряжения больше у режущей кромки верхнего, чем у нижнего инструмента (рис. 5), что способствует образованию и распространению скалывающейся трещины от верхнего инструмента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представленная методика численного моделирования разделительных операций на основе расчетной конечно-элементной модели процесса резки тонколистового материала позволяет прогнозировать качество получаемых заготовок с учетом особенностей деформирования.

Анализ полученных результатов показал, что упругое смещение рабочего инструмента не выходит за границы допуска технологического зазора.

Установлены величины упругих деформаций инструмента, возникающие в процессе разделительной

операции тонколистового материала. Выявлено, что упругое горизонтальное смещение на верхнем ноже больше, чем на нижнем ноже, на 14 %.

Описан механизм вязкого разрушения для разделительных операций. Найдено подтверждение гипотезы о направлении распространения трещины, которое связано с действием максимальных главных растягивающих напряжений.

По результатам численных экспериментов определены границы оптимального технологического зазора. Показано, что для рулонной холоднокатаной стали 08Ю толщиной 0,8 мм значение оптимального зазора составляет 5 % от толщины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Quazi T.Z., Shaikh R.S. An Overview of Clearance Optimization in Sheet Metal Blanking Process // *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012. № 2. P. 4547–4558.
- Dhulugade Y.N., Gore P.N. Design and Development of Sheet Metal “Draw” Component Using CAE Technology // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2013. № 3. P. 30–39.
- Почекуев Е.Н., Шенбергер П.Н. Повышение качества крупногабаритных заготовок на основе моделирования разделительных операций в последовательных штампах // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2018. № 2. С. 27–31.
- Константинов И.Л., Сидельников С.Б. Основы технологических процессов обработки металлов давлением. М.: ИНФРА-М, 2016. 488 с.
- Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю., Султан-заде Н.М. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 551 с.
- Тутьшкин Н.Д., Трегубов В.И. Связанные задачи теории пластичности и повреждаемости деформируемых материалов. Тула: ТулГУ, 2016. 267 с.
- Diaz D., Altan T. Blanking and edge fracture in flanging of AHSS. Part I // *STAMPING Journal*. 2017. Vol. 2. P. 20–21.
- Naranje V., Kumar S. Knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts // *Expert Systems with Applications*. 2014. № 41. P. 1419–1431.
- Potočnik, D. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies // *Journal of Zhejiang University-Science A*. 2013. Vol. 14. № 5. P. 327–340.
- Chung Y. Geometric modeling of drawbeads using vertical section sweeping // *Computer-Aided Design*. 2013. Vol. 45. № 12. P. 1556–1561.
- Вишневский Н.С., Константинов В.Ф. Повышение стойкости разделительных штампов. М.: Машиностроение, 1984. 119 с.
- Михаленко Ф.П. Стойкость разделительных штампов. М.: Машиностроение, 1976. 208 с.
- Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов. М.: Металлургия, 1990. 304 с.
- Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 479 с.
- Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Высшая школа, 1983. 176 с.
- Ашейчик А.А., Полонский В.Л. Расчет деталей машин методом конечных элементов. СПб.: Политехнический ун-т, 2016. 242 с.
- Селедкин Е.М. Расчет процессов обработки материалов давлением методом конечных элементов. Тула: ТулГУ, 2016. 112 с.
- Непершин Р.И. Прикладные проблемы пластичности. М.: Станкин, 2016. 310 с.
- Почекуев Е.Н., Шенбергер П.Н. Системное управление процессом проектирования разделительных штампов для холодной листовой штамповки // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ. Технология машиностроения и материалы*. 2013. Т. 2. № 2. С. 48–52.
- Почекуев Е.Н., Шенбергер П.Н. Поисковое проектирование конструкций последовательных разделительных штампов для листовой штамповки // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2015. № 2. С. 161–165.
- Почекуев Е.Н., Путеев П.А., Шенбергер П.Н. Проектирование штампов для последовательной листовой штамповки в системе NX. М.: ДМК, 2012. 336 с.
- Батышев А.И. Проектирование и производство заготовок. М.: МГОУ, 2013. 247 с.
- Проскурин А.А. Разработка устройства и исследование режимов реверсивной вырубki деталей из тонколистового проката без заусенцев : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 172 с.
- Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: Машиностроение, 1989. 303 с.
- Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Л.: Машиностроение, 1980. 432 с.
- Справочник конструктора штампов: листовая штамповка / под общ. ред. Л.И. Рудмана. М.: Машиностроение, 1988. 495 с.

REFERENCES

- Quazi T.Z., Shaikh R.S. An Overview of Clearance Optimization in Sheet Metal Blanking Process. *International Journal of Modern Engineering Research*, 2012, no. 2, pp. 4547–4558.
- Dhulugade Y.N., Gore P.N. Design and Development of Sheet Metal “Draw” Component Using CAE Technology. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, no. 3, pp. 30–39.
- Pochekuev E.N., Shenberger P.N. Improving the quality of large-size billets on the basis of modeling of separation operations in successive dies. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2018, no. 2, pp. 27–31.
- Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B. *Osnovy tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Basics of technological procedure of pressure metal treatment]. Moscow, INFRA-M Publ., 2016. 488 p.
- Vorontsov A.L., Albagachiev A.Yu., Sultan-zade N.M. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov v mashinostroenii* [Theoretical Foundations of metal processing in mechanical engineering]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2014. 551 p.

6. Tutyshkin N.D., Tregubov V.I. *Svyazannye zadachi teorii plastichnosti i povrezhdaemosti deformiruemyykh materialov* [Linked tasks of plasticity theory and deformable materials damaging]. Tula, TulGU Publ., 2016. 267 p.
7. Diaz D., Altan T. Blanking and edge fracture in flanging of AHSS. Part I. *STAMPING Journal*, 2017, vol. 2, pp. 20–21.
8. Naranje V., Kumar S. Knowledge based system for automated design of deep drawing die for axisymmetric parts. *Expert Systems with Applications*, 2014, no. 41, pp. 1419–1431.
9. Potočník, D. GAJA: 3D CAD methodology for developing a parametric system for the automatic (re)modeling of the cutting components of compound washer dies. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2013, vol. 14, no. 5, pp. 327–340.
10. Chung Y. Geometric modeling of drawbeads using vertical section sweeping. *Computer-Aided Design*, 2013, vol. 45, no. 12, pp. 1556–1561.
11. Vishnevskiy N.S., Konstantinov V.F. *Povyshenie stoykosti razdelitelnykh shtampov* [Improving the durability of shearing dies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 119 p.
12. Mikhalenko F.P. *Stoykost razdelitelnykh shtampov* [Shearing dies durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 208 p.
13. Aryshenskiy Yu.M., Grechnikov F.V. *Teoriya i raschety plasticheskogo formoizmeneniya anizotropnykh materialov* [Theory and calculations of plastic forming of anisotropic materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 304 p.
14. Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. *Tekhnologiya i avtomatizatsiya listovoy shtampovki* [Technology and automation of sheet stamping]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2003. 479 p.
15. Ogorodnikov V.A. *Otsenka deformiruemosti metallov pri obrabotke davleniem* [The assessment of deformability of metals when pressure processing]. Kiev, Vysshaya shkola Publ., 1983. 176 p.
16. Asheychik A.A., Polonskiy V.L. *Raschet detaley mashin metodom konechnykh elementov* [The calculation of machine parts using finite element method]. Sankt Petersburg, Politekhicheskiy un-t Publ., 2016. 242 p.
17. Seledkin E.M. *Raschet protsessov obrabotki materialov davleniem metodom konechnykh elementov* [The calculation of the processes of metal pressure treatment using finite element method]. Tula, TulGU Publ., 2016. 112 p.
18. Nepershin R.I. *Prikladnye problemy plastichnosti* [Applied plasticity problems]. Moscow, Stankin Publ., 2016. 310 p.
19. Pochekuev E.N., Shenberger P.N. System management of the design process separating stamps for cold stamping. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. Tekhnologiya mashinostroeniya i materialy*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 48–52.
20. Pochekuev E.N., Shenberger P.N. Exploratory development of the structures of progressive separating dies for sheet stamping. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 2, pp. 161–165.
21. Pochekuev E.N., Puteev P.A., Shenberger P.N. *Proektirovanie shtampov dlya posledovatelnoy listovoy shtampovki v sisteme NX* [Development of dies for progressive sheet stamping in NX system]. Moscow, DMK Publ., 2012. 336 p.
22. Batsyshev A.I. *Proektirovanie i proizvodstvo zagotovok* [Design and manufacture of blanks]. Moscow, MGOU Publ., 2013. 247 p.
23. Proskurin A.A. *Razrabotka ustroystva i issledovanie rezhimov reversivnoy vyrubki detaley iz tonkolistovogo prokata bez zausentsev*. Diss. kand. tekhn. nauk [The development of a device and the study of the modes of reversing blanking of parts made of burnfree rolled sheet material]. Moscow, 2015. 172 p.
24. Averkiev Yu.A., Averkiev A.Yu. *Tekhnologiya kholodnoy shtampovki* [Cold stamping technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 303 p.
25. Zubtsov M.E. *Listovaya shtampovka* [Sheet stamping]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1980. 432 p.
26. Rudman L.I., ed. *Spravochnik konstruktora shtampov: listovaya shtampovka* [Sheet stamping: reference book for dies designer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 495 p.

**SPECIAL CHARACTERISTICS OF THE DEFORMING MECHANISM
DURING STAMPING SHEARING OPERATIONS**

© 2018

P.N. Shenberger, senior lecturer of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”
Togliatti State University, Togliatti (Russia)

Keywords: optimal gap; stresses and deformations when cutting; shearing operations; crack formation.

Abstract: The paper considers the deformation mechanism when cutting thin sheet material to predict the quality of a cut profile by the rational choice of a gap and the indicators of the “workpiece – sectional working tool” system. The research objectives were solved for flat deformation using the finite element model of a cutting process. Based on the calculation results, the author described the stress-strain state of the material in the cutting zone for four stages of the process and determined the indices of the stress-strain state and the conditions in the material leading to the crack formation. The degree of influence of the deformation force and pressing on the values of the elastic deformation of sections and the gap value is estimated. The study identified the bursting force value which corresponds to the value of 10 to 30 % of the maximum force of a shearing operation. In the work, it is noted that the lateral bursting force influences considerably the variation of a gap between the cutting sections. It is found that the gap size variation under the influence of elastic deformations of the upper and lower sections is small and is within the permitted recommended gap. The author offers the condition for the production of a qualitative profile surface of a cut which is provided in the case of coincidence of the crack propagation direction and the direction connecting the cutting edges on the top and bottom sections. It is determined that the optimal gap for the parameters values used in the work is 5 % of the material thickness, which is consistent with the production results. The analysis of fields’ distribution of the main normal stresses in the deformation region allowed determining that the stresses, being the stretching, contribute to the opening of shearing cracks occurring in the layers of a workpiece located near the cutting edges. The paper notes that the value of the resultant of main normal tensile stress in the deformation region of the upper tool greater than that of the cutting edge of the lower tool facilitates the shearing crack propagation from the cutting edge of the upper tool.

НАШИ АВТОРЫ

Башмаков Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов.

Адрес: Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, 423810, Россия, г. Набережные Челны, пр-т Мира, 68/19.

Тел.: +7 927 450-85-11

E-mail: bashmakovda@yandex.ru

Бекренев Николай Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин».

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

E-mail: irinka_7_@mail.ru

Волков Алексей Юрьевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией прочности.

Адрес: Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

Тел.: (343) 374-40-54

E-mail: volkov@imp.uran.ru

Волокобинский Евгений Михайлович, инженер кафедры конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 193232, Россия, г. Санкт-Петербург, пр-т Большевиков, 22, корп. 1.

Тел.: +7 911 210-79-93

E-mail: volii1992@mail.ru

Злобина Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и детали машин».

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

Тел.: 8 917 322-13-88

E-mail: irinka_7_@mail.ru

Калонов Аъзамбек Атхамович, аспирант, инженер-исследователь лаборатории прочности.

Адрес: Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18.

Тел.: (343) 374-40-54

E-mail: kalonov@imp.uran.ru

Ковтунов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 53-92-15

E-mail: akovtunov@rambler.ru

Масляев Александр Михайлович, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 28-11-14

E-mail: maslyaevam@sam.transneft.ru

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

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

Тел.: (347) 273-79-27; (347) 272-63-07

E-mail: office@ugatu.su

Павлов Сергей Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Математика и моделирование».

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

E-mail: irinka_7_@mail.ru

Пудовкин Андрей Андреевич, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 28-11-14

E-mail: bambucha@bk.ru

Пудовкина Надежда Геннадьевна, магистрант кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 28-11-14

E-mail: pud_ng@mail.ru

Рахматуллина Маргарита Радиковна, магистрант.

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

E-mail: ritata2212@mail.ru

Туричин Глеб Андреевич, доктор технических наук, исполняющий обязанности ректора.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190008, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3.

Тел.: (812) 714-07-61

E-mail: office@smtu.ru

Унянин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент.

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

E-mail: a_un@mail.ru

Хазов Александр Васильевич, заместитель главного инженера.

Адрес: АО «Ульяновский механический завод», 432008, Россия, г. Ульяновск, Московское шоссе, 94.

E-mail: umz_73@mail.ru

Шенбергер Полина Николаевна, старший преподаватель кафедры «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы».

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

Тел.: (8482) 53-92-98

E-mail: Shenberger@tltsu.ru

OUR AUTHORS

Bashmakov Dmitry Aleksandrovich, PhD (Engineering), Associate Professor, assistant professor of Chair of High-Energy Processes and Aggregates.
Address: Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga region) Federal University, 423810, Russia, Naberezhnye Chelny, Prospect Mira, 68/19.
Tel.: +7 927 450-85-11
E-mail: bashmakovda@yandex.ru

Bekrenev Nikolay Valerievich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Chair “Engineering Mechanics and Machinery”.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.
E-mail: irinka_7_@mail.ru

Kalonov Aiezambek Atkhamovich, postgraduate student, research engineer of Strength Laboratory.
Address: M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 620108, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18.
Tel.: (343) 374-40-54
E-mail: kalonov@imp.uran.ru

Khazov Aleksandr Vasilievich, deputy chief engineer.
Address: JSC “Ulyanovsk Mechanical Plant”, 432008, Russia, Ulyanovsk, Moskovskoye Shosse, 94.
E-mail: umz_73@mail.ru

Kovtunov Aleksandr Ivanovich, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair “Welding, metal forming and related processes”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-15
E-mail: akovtunov@rambler.ru

Maslyaev Aleksandr Mikhailovich, graduate student of Chair “Welding, metal forming and related processes”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 28-11-14
E-mail: maslyaevam@sam.transneft.ru

Mesropyan Arsen Vladimirovich, Doctor of Sciences (Engineering), professor of Chair of Applied Hydromechanics.
Address: Ufa State Aviation Technical University, 450008, Russia, Ufa, Karl Marks Street, 12.
Tel.: (347) 273-79-27; (347) 272-63-07
E-mail: office@ugatu.su

Pavlov Sergey Petrovich, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, professor of Chair “Mathematics and modeling”.
Address: Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 410054, Russia, Saratov, Politechnicheskaya Street, 77.
E-mail: irinka_7_@mail.ru

Pudovkin Andrey Andreevich, graduate student of Chair “Welding, metal forming and related processes”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 28-11-14
E-mail: 6am6ucha@bk.ru

Pudovkina Nadezhda Gennadievna, graduate student of Chair “Welding, metal forming and related processes”.
Address: Togliatti State University, 445020, Russia, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 28-11-14
E-mail: pud_ng@mail.ru

Rakhmatullina Margarita Radikovna, graduate student.
Address: Ufa State Aviation Technical University, 450008, Russia, Ufa, Karl Marks Street, 12.
E-mail: ritata2212@mail.ru

Shenberger Polina Nikolaevna, senior lecturer of Chair “Welding, pressure materials treatment and related processes”.
Address: Togliatti State University, 445667, Russia, Samara region, Togliatti, Belorusskaya Street, 14.
Tel.: (8482) 53-92-98
E-mail: Shenberger@tltsu.ru

Turichin Gleb Andreevich, Doctor of Sciences (Engineering), Acting Rector.

Address: Saint Petersburg State Marine Technical University, 190008, Russia, Saint Petersburg, Lotsmanskaya Street, 3.

Tel.: (812) 714-07-61

E-mail: office@smtu.ru

Unyanin Aleksandr Nikolaevich, Doctor of Sciences, Associate Professor.

Address: Ulyanovsk State Technical University, 432027, Russia, Ulyanovsk, Severny Venets Street, 32.

E-mail: a_un@mail.ru

Volkov Aleksey Yurievich, Doctor of Sciences (Engineering), Head of Strength Laboratory.

Address: M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 620108, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18.

Tel.: (343) 374-40-54

E-mail: volkov@imp.uran.ru

Volokobinsky Evgeny Mikhailovich, engineer of Chair of Designing and Technology of Production of Radioelectronic Facilities.

Address: Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 193232, Russia, Saint-Petersburg, Prospect Bolshevikov, 22, block 1.

Tel.: +7 911 210-79-93

E-mail: volii1992@mail.ru

Zlobina Irina Vladimirovna, PhD (Engineering), assistant professor of Chair “Engineering Mechanics and Machinery”.

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

Tel.: 8 917 322-13-88

E-mail: irinka_7_@mail.ru