



# ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ

ФГБОУ ВО  
«Алтайский государственный  
технический университет  
им. И. И. Ползунова»



2022  
4  
Т. 2

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ

4  
Т. 2  
2022

НА ОБЛОЖКЕ:  
Сереброплавильный завод города Барнаула в середине XIX века



*Посвящается основателю кафедры  
«Малый бизнес в сварочном производстве»  
**Василию Григорьевичу Радченко**  
(1926-2012 гг.)*

*доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
академик Международной Академии наук высшей школы,  
член-корреспондент Академии инженерных наук РФ,  
лауреат Ленинской премии в области науки и техники,  
лауреат премии Академии наук высшей школы России  
Почетный работник высшего образования России,  
Почетный гражданин города Барнаула*

*ректор Алтайского политехнического института им. И.И. Ползунова (1960-1987 гг.),  
заведующий кафедрой «Малый бизнес в сварочном производстве» Алтайского государственного  
технического университета им. И.И. Ползунова (1962-2011 гг.),  
директор Головного аттестационного центра Алтайского региона НАКС (1999-2012 гг.)*

*Кафедра «Малый бизнес в сварочном производстве» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова имеет славные традиции подготовки специалистов по направлениям материаловедения, сварки, родственных процессов и технологий, неразрушающего контроля и технической диагностики, заложенные лауреатом Ленинской премии, первым ректором Алтайского политехнического института Василием Григорьевичем Радченко.*

*Научно-педагогическим работниками кафедры было подготовлено более двух тысяч высококвалифицированных специалистов, которые не только работают и внедряют новые технологии на территории Алтайского края, но и занимают руководящие должности в крупнейших организациях России.*

*В разные годы на кафедре развивались такие научные направления, как «Теория и практика управления структурообразованием, направленной кристаллизацией и свойствами сварных, наплавляемых и упрочняемых изделий и инструмента», «Электроннолучевая сварка сложнлегированных сталей спецназначения и наплавка порошковыми сплавами комплексных износостойких покрытий для оборонных изделий», «Теоретические и экспериментальные основы создания и применения высокопрочных конструкционных сталей и новых ресурсосберегающих технологий их обработки», «Технологические основы создания защитных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии». В настоящее время коллектив кафедры успешно работает в рамках научного направления «Неразрушающий контроль и техническая диагностика».*

*В этом году мы отмечаем 60-летие нашей родной кафедры! Специалисты сварочного производства – настоящее содружество высококвалифицированных профессионалов.*

*Благодарим всех коллег, ученых и специалистов, за участие в подготовке праздничного номера журнала «Ползуновский альманах», посвященного юбилею кафедры. Желаем дальнейшего процветания, развития, творческих и профессиональных успехов!*

*С уважением, коллектив кафедры  
«Малый бизнес в сварочном производстве им. лауреата Ленинской  
премии В.Г. Радченко»*

**ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ****№ 4 т. 2 / 2022**

Свидетельство о регистрации выдано 17 марта 2022 г.  
Федеральным государственным унитарным предприятием  
«Информационное телеграфное агентство России  
(ИТАР-ТАСС), Российская книжная палата

*Главный редактор*

А. М. Марков

*Зам. главного редактора*

Е. С. Ананьева

*Редакционная коллегия:*

С. Б. Поморов

И. В. Харламов

И. Н. Сычева

А. С. Авдеев

С. В. Ананьин

А. С. Баранов

В. И. Полищук

*Редакционный совет выпуска:*

М. Н. Сейдуров

А. А. Попова

*Под общей редакцией*

к.т.н., доцента С.В. Ананьина

*Адрес редакции:*

656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,

тел: 29-09-48

**В НОМЕРЕ:***М. Н. Сейдуров*РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ..... 3*Б. И. Мандров, И. А. Маценко, А. А. Ощепков*СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ.  
ОПЫТ ОБУЧЕНИЯ БАКАЛАВРОВ ..... 10*Б. И. Мандров, И. А. Маценко, А. А. Ощепков,**В. М. Дробот, И. С. Кошкар*ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО  
АНАЛИЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
КАЧЕСТВОМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ В СВАРНЫХ  
СОЕДИНЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЯЕМЫХ  
ВИК ..... 16*И. А. Маценко, А. А. Ощепков, Б. И. Мандров,**Ю. С. Посылкин, А. Н. Дронов*ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ  
ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ В  
ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ..... 21*Ю. О. Шевцов*ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ  
НАПЛАВКИ В ВАКУУМЕ НА  
УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ  
ТРУБОПРОВОДНОЙ И ПАРОВОЙ  
КОТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ..... 27*Ю. О. Шевцов*ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ  
ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ..  
..... 31

<i>А. Г. Кулагин</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ.....	<i>А. А. Ощепков, В. В. Виганд, И. А. Маценко, М. Е. Читпанова</i> ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАЛЬНЫХ ГИЛЬЗ.....
38	77
<i>А. Г. Кулагин</i> ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....	<i>А. А. Ощепков, А. И. Щёткин, В. В. Виганд</i> ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ РЕМОНТЕ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЫ ПРЕССА .....
51	82
<i>Д. И. Галкин, М. П. Клейзер, А. Е. Шубочкин</i> СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОМУ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	<i>В. С. Киселёв, Н. С. Ерофеев</i> ПРОВЕДЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ...
55	87
<i>G. Ludmirsky, S. P. Kamyshanov, S. S. Assaulenko</i> MODERNIZATION AND DESIGN OF METAL STRUCTURES FOR FRICTION STIR WELDING.....	<i>А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, М. Н. Сейдуров</i> ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗ- ТЕХНИКИ НА СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ. ....
61	92
<i>Е. А. Иванайский, А. И. Щёткин, А. А. Иванайский</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЕКТА ДЛЯ ПОИСКА УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ.....	<i>С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, А. И. Аугсткалн</i> РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ИЗНОСОСТОЙКАЯ НАПЛАВКА. ....
64	98
<i>С. Ю. Останин</i> ШАГ В БУДУЩЕЕ, ДУГОВАЯ СВАРКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ AOTAI, ИСТОЧНИК СЕРИИ AMIG350P-Y .....	<i>Е. Н. Любых, М. Н. Сейдуров</i> РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСА БАРАБАНА КОТЛА. ....
69	101
<i>А. А. Попова, В. В. Волков</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКОЙ ПО СЛОЕМ ФЛЮСА И МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКОЙ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ ..	<i>Н. А. Ридель, М. Н. Сейдуров</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....
72	107
	<i>М. Н. Сейдуров, А. А. Ощепков, А. И. Щёткин</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО- АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ.....
	111

Учредители журнала:

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Алтайский государственный технический  
университет имени И. И. Ползунова»

## РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АЛТГТУ

М. Н. Сейдуров

В работе представлены результаты деятельности кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ за 60 лет. В разные годы на кафедре развивались такие научные направления, как «Теория и практика управления структурообразованием, направленной кристаллизацией и свойствами сварных, наплавляемых и упрочняемых изделий и инструмента», «Электроннолучевая сварка сложнoleгированных сталей спецназначения и наплавка порошковыми сплавами комплексных износостойких покрытий для оборонных изделий», «Теоретические и экспериментальные основы создания и применения высокопрочных конструкционных сталей и новых ресурсосберегающих технологий их обработки», «Технологические основы создания защитных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии».

**Ключевые слова:** научно-педагогические работники, сварочное производство, научные направления, электрошлаковая сварка, электроннолучевая наплавка, высокопрочные стали.

Кафедра «Малый бизнес в сварочном производстве» (МБСП) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ) имеет богатую историю, связанную с развитием новых сварочных процессов и технологий, а также подготовкой квалифицированных специалистов сварочного производства в Алтайском крае.

Сварка – великое русское изобретение! Об этом знает каждый выпускник кафедры МБСП. На протяжении долгих лет дисциплину «Введение в специальность» преподавал основатель научно-педагогической школы в области сварочного производства на Алтае, лауреат Ленинской премии, д.т.н., профессор Радченко В.Г. [1], имя которого кафедра МБСП с гордостью носит с 2013 г.

Сварочная наука была зарождена первым физиком на Алтае, будущим основоположником отечественной электротехники Петровым В.В. Он по собственному желанию получил в 1788 г. направление учителем физики и математики в г. Барнаул. С 1788 по 1791 г. Петров В.В. работал в Колывано-Воскресенском благородном горном училище. Впоследствии одним из выдающихся успехов русского ученого стало открытие в 1802 г. явления электрической дуги и доказательство возможности ее практического применения для целей плавки, сварки металлов, восстановления их из руд и освещения.

«Новые технологии сварочного производства на земле, под водой, в космосе» – под таким девизом начала свою деятель-

ность под руководством Радченко В.Г. кафедра «Оборудование и технология сварочного производства» (ОиТСП) Алтайского политехнического института (АПИ) в 1962 г. (рисунок 1).

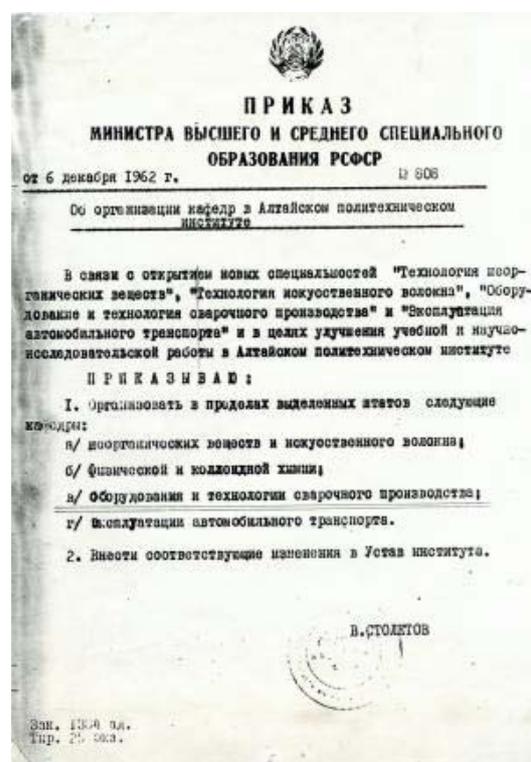


Рисунок 1 – Приказ Министерства высшего и среднего образования РСФСР № 808 от 6 декабря 1962 г. об организации кафедр в Алтайском политехническом институте

Открытию кафедры сварки в г. Барнауле поспособствовало интенсивное развитие Барнаульского котельного завода (БКЗ). В 1956 г. Министерство тяжелого машиностроения СССР направило заместителя главного инженера Таганрогского завода «Красный котельщик» Радченко В.Г. на рабо-

ту главным инженером БКЗ для организации широкого внедрения новой технологии производства толстостенных барабанов энергетических установок, воздушных и гидравлических баллонов мощных прессов и других изделий на основе электрошлаковой сварки (ЭШС) и наплавки (рисунок 2).



Рисунок 2 – Главный инженер Барнаульского котельного завода Радченко В.Г.

За разработку и широкое внедрение ЭШС в тяжелом машиностроении в 1957 г. одной из первых групп ученых и специалистов присуждена Ленинская премия Патону Б.Е., Волошкевичу Г.З., Гузенко И.Г., Давыденко И.Д., Радченко В.Г. с вручением Диплома и Золотой медали лауреата.

Разработанный ИЭС им. Е.О. Патона способ ЭШС, соответствующее сварочное оборудование, аппаратура и фрагменты изготовленного на БКЗ реального воздушного баллона с толщиной стенки 155 мм, емкостью 10000 л, представленные на Всемирную выставку в г. Брюсселе, получили в 1958 г. высшую награду «Гран-При» (Большой приз) и Золотую медаль [2].

В 1959 г. Радченко В.Г. назначили главным инженером Управления машиностроения

Алтайского Совнархоза. В это же время под руководством Радченко В.Г. началась подготовка первых инженеров по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» в АПИ, который он возглавил в 1960 г., став первым ректором, и проработал в этой должности более 27 лет [3].

Сотрудники кафедры ОиТСП уже тогда впервые начали использовать для учебного процесса не только ручную дуговую электро-сварку, газовую сварку и резку, автоматическую сварку под слоем флюса, но передовые электрошлаковые технологии [3-5].

Наличие самых необходимых лабораторий и научно-педагогических кадров позволило подготовить первый в Западной Сибири выпуск инженеров-механиков сварочного производства (рисунки 3 и 4).

РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ  
В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АЛТГТУ



Рисунок 3 – Коллектив кафедры «Оборудование и технология сварочного производства»



Рисунок 4 – Первый выпуск инженеров-сварщиков Алтайского политехнического института

С 1962 г. на кафедре активно развивалось фундаментальное научное направление «Теория и практика управления структурообразованием, направленной кристаллизацией и свойствами сварных, наплавляемых и упрочняемых изделий и инструмента».

Для выполнения первых научно-исследовательских работ использовали электрошлаковую установку А-550, переданную кафедре ОиТСП в дар безвозмездно ИЭС им. Е.О. Патона (рисунок 5).



Рисунок 5 – Проведение научных исследований под руководством доцента Радченко В.Г.

С помощью ведущих предприятий Алтая были оснащены учебные и научные лаборатории для основных видов электродуговой и газозлектрической сварки, электрической контактной (стыковой, точечной и шовной) сварки, газовой сварки и плазменной резки и напыления, электрошлаковой сварки, наплавки и переплава, лазерной и электроннолучевой сварки, наплавки и упрочнения материалов высококонцентрированным электронным пучком в вакууме, источников питания сварочного оборудования, теории сварочных

процессов, контроля качества с помощью рентгеноструктурного анализа, неразрушающих методов контроля, оптической и электронной микроскопии и дисплейный класс с персональными компьютерами.

С 1982 г. на кафедре появляется новое приоритетное направление «Электроннолучевая сварка сложнелегированных сталей спецназначения и наплавка порошковыми сплавами комплексных износостойких покрытий для оборонных изделий».

Были выполнены пионерские научные исследования по разработке технологических основ износостойкой электронно-лучевой наплавки в вакууме самофлюсующихся порошковых материалов.

Сотрудниками кафедры был разработан новый способ контактно-реактивной пайки быстрорежущего инструмента, совмещенный с термообработкой.

Результаты разработок и исследований по основным направлениям электрошлаковой, электроннолучевой, лазерной технологий и контактно-реактивной пайки защищены авторскими свидетельствами и патентами прошли опытно-экспериментальную проверку или внедрение на многих заводах тяжелого, транспортного, автомобилестроительного, авиационного машиностроения и дизельстроения, в том числе на машиностроительных предприятиях России, Украины и других бывших союзных республик и ведущих предприятиях Алтая.

Под руководством к.т.н., профессора Чепрасова Д.П. открылось научное направление «Теоретические и экспериментальные основы создания и применения высокопрочных конструкционных сталей и новых ресурсосберегающих технологий их обработки». Был создан принципиально новый класс высокопрочных сталей бейнитного класса с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами, а также разработаны и освоены новые ресурсосберегающие технологии термической, термоциклической и взрыво-термической обработок.

Подготовка инженерных и научных кадров, развитие материальной базы и укрепление связей с наукой и производством позволили создать учебно-научные лаборатории в ОАО «Барнаултрансмаш» по электроннолучевой технологии сварки, наплавки и упрочнения в вакууме и электрошлаковой технологии, а также в ОАО «АНИТИМ» по сварке взрывом, сварочным роботам и робототехни-

## РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АЛТГТУ

ческим комплексам, плазменной технологии, индукционной наплавке и в ОАО «Сибэнергомаш» по неразрушающим методам контроля сварных соединений.

В 1992 г. в связи с получением статуса технического университета АПИ был пере-

именован в АлтГТУ, а в 1997 г. в связи с экономическими переменами в России кафедра ОиТСП была переименована в МБСП (рисунок 6).



Рисунок 6 – Коллектив кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве»

В 1999 г. на базе кафедры МБСП был создан ГАЦ АР НАКС для организации работы в системе аттестации сварочного производства России. Директором был назначен член бюро НАКС, заведующий кафедрой МБСП, д.т.н., профессор Радченко В.Г., а с 2011 г. на этом посту его сменил д.т.н., профессор Радченко М.В. [6].

Стоит отметить, что большую роль в становлении и развитии ГАЦ АР НАКС сыграл исполнительный директор Чепрасов Д.П., а также Арсенкин В.Т., Шабалин В.Н., Петров В.П., Мандров М.И. и Шевцов Ю.О.

В 2000 г. в целях проведения предаттестационной подготовки специалистов сварочного производства в Алтайском регионе, а также для профессиональной подготовки студентов в области сварочного производства на базе кафедры МБСП создан Образовательный центр («ОЦ-Сварка»), директором которого был назначен заведующий кафедрой МБСП, д.т.н., профессор Радченко В.Г.

В 2001 г. Государственная инспекция Министерства образования в ходе аттестации и последующей аккредитации АлтГТУ дала высокую оценку специальности «Оборудование и технология сварочного производства» и присвоила кафедре МБСП первое место среди кафедр этого профиля в России.

Благодаря совместной работе коллективов кафедры МБСП и ГАЦ АР НАКС, а также тесному сотрудничеству с представителями Ростехнадзора был накоплен значительный опыт по практическому использованию нормативной базы в области промышленной безопасности и аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства, сварочных материалов, оборудования и технологий.

В связи с нехваткой квалифицированных кадров на предприятиях г. Барнаула и Алтайского края в «ОЦ-Сварка» ежегодно проводилась подготовка по рабочим профессиям: 19906 «Электросварщик ручной сварки»,

13057 «Контролер сварочных работ», 18346 «Сварщик пластмасс».

С 2011 г. коллективом кафедры МБСП ведется подготовка бакалавров, а с 2012 г. – магистров по образовательным программам высшего образования направления «Машиностроение» (профиль «Оборудование и технология сварочного производства») с возможностью получения рабочей профессии.

С 2011 по 2020 гг. кафедрой заведовал д.т.н., профессор Радченко М.В. Под его руководством развивалось научное направление «Технологические основы создания защитных покрытий с использованием концентрированных потоков энергии». Были выполнены теоретические исследования закономерности формирования защитных покрытий сверхзвуковой газопорошковой наплавкой.

С 2020 г. кафедру МБСП возглавил к.т.н., доцент Сейдуров М.Н. Преподавательский состав представлен пятью доцентами, кандидатами технических наук, одним старшим преподавателем и тремя ассистентами без ученой степени. Всего на кафедре работает 13 сотрудников, девять из них — в возрасте до 40 лет.

На кафедре МБСП трудятся пять лауреатов премии Алтайского края в области науки и техники, один почетный работник высшего профессионального образования и почетный наставник Минобрнауки России, один почетный работник сферы образования РФ.

В настоящее время на кафедре МБСП развивается научное направление «Не разрушающий контроль и техническая диагностика». На базе кафедры функционирует Алтайское краевое отделение Российского общества по неразрушающему контролю и технической и диагностике (РОНКТД) [7].

Руководит региональным отделением старший преподаватель Щёткин А.И. Научно-педагогические работники проводят фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в области материаловедения, сварки, родственных процессов и технологий, неразрушающего контроля и технической диагностики. Сотрудники разрабатывают технологические процессы сборки и сварки (наплавки), осуществляют техническое сопровождение сварочно-монтажных работ и выполняют все виды контроля качества сварных соединений на предприятиях Алтайского края и Республики Алтай.

На кафедре МБСП объединились все приоритетные направления деятельности, связанные с повышением качества промышленной продукции, обеспечением безопасности производственных объектов и предупре-

ждением чрезвычайных ситуаций. Сотрудники координируют работы по сварке и неразрушающему контролю, активно участвуют в разработке технической и методической документации, реализуют программы дополнительного профессионального образования.

В 2021 г. кафедра МБСП совместно с ООО «АЛТВЭЛД» организовала 10-й региональный научно-практический семинар «Современное сварочное оборудование «MEGMEET» и новые технологии сварки». Для научно-исследовательских работ по изучению технологических особенностей импульсно-дуговой сварки был получен сварочный полуавтомат с цифровым управлением.

На базе ООО «Сибэнергомаш – БКЗ» сотрудники кафедры МБСП участвовали в проведении краевого конкурса профессионального мастерства «Лучший по профессии» в номинации «лучший сварщик». Благодаря сотрудничеству с НИИИ МНПО «Спектр» для совместных работ был приобретен ультразвуковой томограф-дефектоскоп.

Студенты кафедры МБСП регулярно проходят производственную и преддипломную практики на крупнейших предприятиях нашей страны: АО «Алтайвагон», АО «АНИТИМ», АО «АПЗ «Ротор», АО «Барнаулметаллургмонтаж», ЗАО «Редукционно-охладительные установки», ООО «Газпром газораспределение Барнаул», ООО «ПО «Межрегионэнергосервис», ООО «Сибэнергомаш – БКЗ», ООО «ТД «Алтайталь», ООО «ПМП «Металлургмонтаж».

На кафедре ежегодно в рамках секции «Специальные технологии в машиностроении» всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» проводится подсекция «Оборудование и технология сварочного производства».

В 2022 г. в АлтГТУ состоялось торжественное мероприятие, посвященное празднованию Дня сварщика в России [8]. В честь 220-летия открытия явления электрической дуги на одной площадке собрались студенты, специалисты сварочного производства, представители РОНКТД, научно-педагогические работники кафедры МБСП (рисунок 7).

10 декабря 2022 г. в АлтГТУ прошло мероприятие, посвященное 60-летию кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» имени лауреата Ленинской премии Радченко В.Г. Коллектив кафедры МБСП выражает глубокую благодарность НИИИ МНПО «Спектр», передавшему шаблоны специалиста неразрушающего контроля TapIRUS и образцы по визуальному и измерительному контролю для организации лабораторных ра-

## РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОБЛАСТИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АЛТГТУ

бот студентов по теме «Измерение геометрических параметров качества сварных соеди-

нений методом визуального и измерительного контроля».



Рисунок 7 – Участники торжественного мероприятия рядом с памятником Ползунову

### Выводы:

1. За 60 лет научно-педагогическим работниками кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве» АлтГТУ было подготовлено более двух тысяч специалистов сварочного производства, знания и навыки которых востребованы в реальном секторе экономики России.

2. Востребованность выпускников кафедры, свидетельствует о том, что их подготовка в области материаловедения, сварки, родственных процессов и технологий, неразрушающего контроля и технической диагностики позволяют приступить к производственной деятельности с минимальным периодом адаптации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ростов Н.Д. «Своим главным увлечением считаю работу». 55 лет со дня основания в АлтГТУ кафедры малого бизнеса в сварочном производстве имени лауреата Ленинской премии В.Г. Радченко / Н.Д. Ростов, В.А. Бородин // Ползуновский альманах. – 2017. – № 1. – С.101-104.

2. Радченко М.В. Сварочное производство (Введение в специальность): монография / М.В. Радченко, В.Г. Радченко; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – 215 с.

3. Радченко В.Г. Развитие кафедры «Оборудование и технология сварочного производства» АлтГТУ / Радченко В.Г., Шабалин В.Н. // Ползуновский альманах. – 2005. – № 3. – С. 152-155.

4. Радченко М.В. Кафедре сварочного производства АлтГТУ 50 лет / М.В. Радченко, В.Г. Радченко, В.Н. Шабалин // Ползуновский вестник. – 2012. – №1-1. – С.6-9.

5. Радченко М.В. Развитие научно-педагогической школы и системы аттестации сварочного производства на Алтае / М.В. Радченко, М.Н. Сейдуров // Сварка и диагностика. – 2013. – № 6. – С 9-12.

6. Радченко М.В. Состояние и перспективы развития научно-педагогической и аттестационной деятельности в области сварочного производства / М.В. Радченко, М.Н. Сейдуров, В.Н. Шабалин // Ползуновский альманах. – 2015. – № 4. – С.4-9.

7. Алтайское краевое отделение / Территория NDT. – 2022. Специальный выпуск. – С

**Сейдуров Михаил Николаевич** – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: seidurov@mail.ru

## СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ. ОПЫТ ОБУЧЕНИЯ БАКАЛАВРОВ

Б. И. Мандров, И. А. Маценко, А. А. Ощепков

В статье рассмотрена особая роль полимерных материалов в сооружении как трубопроводных систем, так и других видов строительных конструкций. Подчеркнута необходимость применения соединений и методов сварки, позволяющих их получать, а также вытекающая из этого потребность в специалистах, имеющих базовые знания по сварке полимерных материалов.

Представлены материалы о лабораторном практикуме по сварке листовых и трубных полимерных полуфабрикатов, оценке качества соединений, выполненных студентами во время занятий в лаборатории. Показано, что во время лабораторной работы сочетание знаний теоретического обучения и практических действий во время процедуры сварки и контроля качества сварных соединений способствуют формированию устойчивых компетенций у бакалавров.

**Ключевые слова:** полимерный материал, полуфабрикаты, трубы, листы, пленки, сварные соединения, сварка нагретым воздухом, экструзионная сварка, сварка нагретым инструментом, визуальный и измерительный контроль, гидротестирование, электроискровой тестер

**Введение.** Одним из наиболее серьезных недостатков низкоуглеродистых и низколегированных сталей является низкий уровень коррозионной стойкости, затрудняющий их применение в условиях повышенной влажности или наличия агрессивной среды. Например, статистические данные о количестве порывов трубопроводов в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» указывают на то, что основная доля порывов трубопроводов (как водоводов, так и нефтегазопроводов) приходится на порывы по причине их внутренней коррозии, вызванной агрессивностью перекачиваемых промышленных сред [1]. Аналогичным образом дело обстоит и с металлоконструкциями при контакте с грунтовыми водами.

Для защиты стальной конструкции применяются различные материалы согласно требованиям нормативной документации организации, производящей сооружение конструкции, например, [2]. Применяемая защита от коррозионных повреждений не долговечна, поэтому требуется проведение ремонтных работ, перекладка сетей и другие мероприятия для продления эксплуатации объектов из вышеуказанных сталей. Особенно затратными являются объекты горно-обогатительных комбинатов, искусственные водные сооружения и технологические сооружения для хра-

нения опасных для окружающей среды продуктов химических производств.

Возможным решением вышеуказанных проблем является применение листовых полуфабрикатов или труб полимерных материалов. Этому способствует разработка новых композиций полимерных материалов с высоким уровнем свойств и поставка на рынок полимерных листов и труб, а также все возрастающие потребности рынка для строящихся систем газо- и водоснабжения, строящихся гидротехнических сооружений, «хвостохранилищ» и т.п. На рисунке 1 показаны примеры полимерных полуфабрикатов, выпускаемых отечественными предприятиями в том числе сибирского региона, в частности, ОАО «ТЕХПОЛИМЕР» г. Красноярск и ООО «АНИКОМ», ООО-«Трубопласт-А» г. Барнаул.

Особенно следует отметить ОАО «ТЕХПОЛИМЕР» г. Красноярск, который не только изготавливает полимерные полуфабрикаты, но и активно участвует в сооружении, реконструкции и монтаже на территории РФ сварных объектов из полиэтилена. Среди сварных сооружений можно отметить «хвостохранилище», геомембраны водохранилищ на приисках, футеровка бетонных несущих конструкций и многие другие объекты.

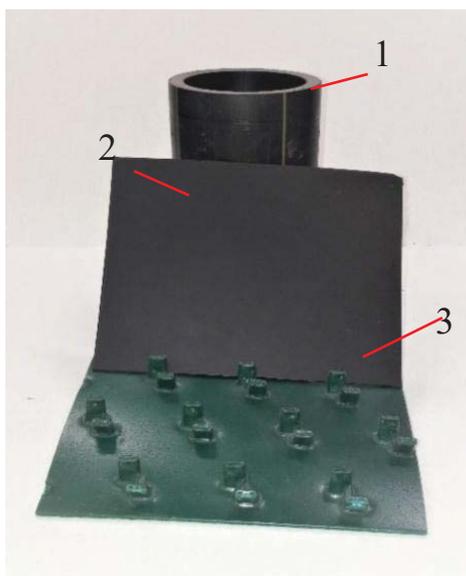


Рисунок 1 – Полимерные полуфабрикаты, применяемые при строительстве сооружений: 1 - трубы, 2 - геомембрана гладкая, 3 - анкерный лист

Трубы используются при сооружении систем газоснабжения, водоснабжения и водоотведения. Сварные соединения в трубопроводах могут быть либо стыковыми без разделки кромок, либо нахлесточными: в раструб; муфтовые соединения труб (рисунок 2) и соединения труб с седловыми отводами.



Рисунок 2 – Муфтовое соединение труб

Анкерный лист применяется для защиты железобетонных конструкций от грунтовых вод. Геомембрана для сооружения искусственных водоемов или хранилищ веществ, опасных для окружающей среды. При соеди-

нении листов используют сварные соединения:

Стыковые:

- без разделки кромок (рисунок 3);
- с односторонней разделкой кромок;
- с двусторонней разделкой кромок.

Нахлесточные:

- соединение листов «внахлестку» (рисунок 4);

- соединение листов «в угол»;

Тавровые:

- без разделки кромок;
- с односторонней разделкой кромок;
- с двусторонней разделкой кромок.

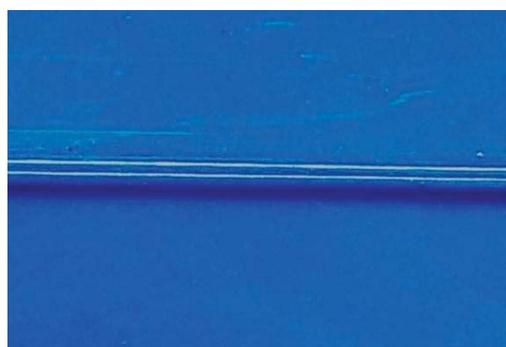


Рисунок 3 – Стыковое соединение листов толщиной 4 мм



Рисунок 4 – Нахлесточное соединение мембраны толщиной 2 мм

В настоящее время, находятся в эксплуатации такие объекты, как «хвостохранилище» Гремяченского горно-обогатительного комбината, искусственный водоем в окрестностях г. Магадан, полигон твердых бытовых отходов в окрестностях р.п. Тальменка Алтайского края и др. На этих объектах в качестве геомембраны использовался полиэтиленовый лист толщиной 1,0 или 2 мм. Кроме того, возрастает интерес к ремонту емкостей,

потерявших плотность с помощью геомембраны.

Размеры сооружений, в которых используются полимерные материалы как трубные, так и геомембраны, значительно превышают длину выпускаемых труб или листов (ширина листов до 5 м, длина рулона до 100 м), что требует применение сварки. Для соединения труб используется сварка нагретым инструментом и закладным нагревателем. Для соединения листов используются способы сварки - нагретым клином, нагретым газом и экструзионная сварка.

Следует отметить, что с каждым годом увеличивается объем производства объектов, при сооружении которых, используются сваренные полимерные полуфабрикаты, как трубные, так и листовые. В то же время, в учебных заведениях любого уровня плановая целевая подготовка специалистов по сварке полимерных материалов не производится. В отдельных организациях региона, например, учебном центре ГАЦ АР НАКС до 2021 г. производилось, по заявкам заинтересованным лиц, обучение на 3 уровень сварщика пластмасс.

В 2010 г. на кафедре МБСП АлтГТУ им. И.И. Ползунова была организована лаборатория сварки полимерных материалов. В 2011 г. была начата работа по внедрению в учебный процесс подготовки специалистов сварочного производства, а с 2014 г. бакалавров направления «Машиностроение» профиля «Оборудование и технология сварочного производства модуля «Сварные соединения полимерных материалов». Это было реализовано в программе дисциплины «Производство сварных конструкций», а после перехода на бакалавриат в дисциплине «Расчет и проектирование сварных соединений».

В лекционном курсе в разделе «Материалы сварных конструкций» рассматривались особенности строения термопластов, их свойства и свариваемость. В разделе «Типы сварных соединений» рассматривались вышеперечисленные типы сварных соединений. В лабораторном практикуме были разработаны лабораторные работы по сварке и определению свойств сварных соединений из листов и труб. Выбор тематики лабораторных работ определялся оборудованием, которым была оснащена лаборатория сварки пластмасс кафедры МБСП.

Для освоения программы дисциплины бакалаврами были подготовлены методиче-

ские материалы по вышеуказанному модулю - учебное пособие [4] по изучению особенностей строения термопластов, их свойствах, свариваемости и применяемых типах сварных соединений. Кроме того, описаны и проиллюстрированы применяемые способы сварки.

Для закрепления лекционного материала, приобретения умений и навыков по сварке полимерных материалов были разработаны и поставлены лабораторные работы по сварке полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида пластифицированного.

Помощь в обеспечении листовыми полиэтиленовыми материалами и полиэтиленовым прутком оказало ЗАО «ТЕХПОЛИМЕР» г. Дивногорск. Для изучения лабораторных работ материал был оформлен в виде методических указаний [5]. Общий объем аудиторных занятий составляет 26 часов.

**Обсуждение результатов изучения и освоения модуля «Сварные соединения полимерных материалов»**

**Лекционные занятия.** На изучение теоретического материала по полимерным конструкционным материалам было выделено два аудиторных часа. По одному часу отводилось на разделы «Материалы сварных конструкций» и «Типы сварных соединений».

В разделе «Материалы сварных конструкций» рассматривалось деление полимерных материалов на термопласты и реактопласты, а также возможность получения из них неразъемных сварных соединений. При этом сопоставлялись механические и технологические свойства, химическая стойкость и долговечность полиэтилена, полипропилена и поливинилхлорида. Особое внимание уделялось особенностям физического состояния и молекулярному строению термопластов – основному конструкционному материалу сварных конструкций из полимеров.

Наибольшую трудность в понимании вышеуказанного материала у студентов вызывает то обстоятельство, что у термопластов нет твердого и жидкого состояния, а полиэтилен не охрупчивается даже при минус 40 °С. Кроме того, дополнительно сложно воспринимается переход в вязкотекучее состояние не при конкретной температуре, а в диапазоне температур. Для хорошей свариваемости он должен быть ~ 50 °С.

При рассмотрении свариваемости недостаточно быстро воспринимается информация об отсутствии жидкой сварочной ванны в отличие от процессов при сварке металлов,

а также диффузионно-реологическая теория образования сварного соединения. В лабораторных работах удается отчетливо продемонстрировать отсутствие жидкой сварочной ванны при сварке полимеров.

При рассмотрении материала в разделе «Типы сварных соединений» следует обратить внимание студентов на то, что ГОСТ 16310-80 [6] может быть применен только для двух способов сварки - нагретым газом с присадочным прутом и экструзионной сварки. ГОСТ Р 59604.2-2021 [7] указывает тип сварного соединения для сварки труб нагретым инструментом как сварка «встык» и «враструб» не давая в тексте стандарта пояснений. При этом в стандарте не приводится обозначение вводимых терминов, как это было в предшествующим РД 03-495-02. Для остальных соединений труб с деталями с закладным нагревателем вообще не вводится понятий о типе сварных соединений.

Для листовых (мембранных) конструкций в [7] применяются следующие типы сварных соединений:

- стыковое (С);
- угловое (У);
- тавровое (Т);
- нахлесточное (Н).

Это позволяет, ссылаясь на нормативные документы [6 и 7] показать конструкцию сварных соединений, не прибегая к аналогиям и опыту студентов. В лаборатории сварки полимерных материалов за время ее работы собраны материалы, демонстрирующие основные типы сварных соединений, что значительно облегчает изложение темы о типах сварных соединений см. рисунки 2-4.

**Лабораторные работы.** Лабораторный практикум включает в себя шесть работ по четыре часа. Три лабораторных работы посвящены сварке труб нагретым инструментом (далее НИ) встык, враструб и муфтой с закладным нагревателем (далее ЗН). Две лабораторных работы посвящены экструзионной сварке (далее Э) и прутковой сварке нагретым воздухом (далее НГ) листов (мембран) и одна посвящена сварке НГ листа (фланца) с трубой. В качестве присадочных материалов использовались полиэтиленовые прутки диаметром 3 и 4 мм, а также пруток из пластифицированного поливинилхлорида.

Целью цикла лабораторных работ была практическая работа студентов по подготовке, изготовлению и контролю вышеперечисленных сварных соединений. При этом ставились следующие задачи:

- закрепление теоретического материала;
- приобретении умений работы с инструментом и оснасткой, предназначенными для сварки полимерных материалов;
- наработка навыков сварки, контроля и испытаний изготовленных соединений.

В четырех работах сварные соединения выполнялись студентами самостоятельно после показа преподавателем безопасных приемов работы. В двух работах по сварке труб НИ и ЗН из-за высокой стоимости оборудования сварка выполнялась на площадке промышленных предприятий с созданием видеоряда, передаваемого студентам и испытанием сварных соединений в лабораториях кафедры МБСП. После обсуждения со студентами были выбраны две лабораторные работы, которые наиболее их заинтересовали.

**Сварка нагретым воздухом с подачей присадочного прутка «быстрым» соплом.** В лабораторной работе производилась многопроходная сварка фланца из полиэтиленовой гладкой геомембраны см. рисунок 1 поз. 3 к полиэтиленовой трубе диаметром 63 мм с толщиной стенки 5,8 мм. На рисунке 5 показан процесс сварки вышеуказанного таврового соединения угловым швом.

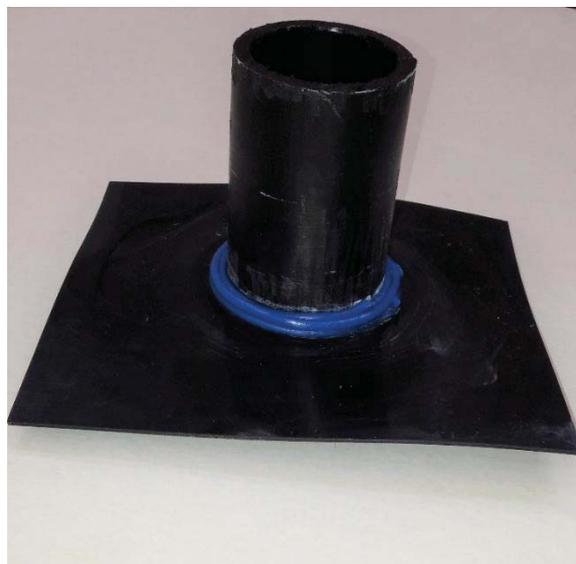


Рисунок 5 – Соединение фланца с трубой прутковой сваркой «быстрым» соплом

Процесс сварки интересен тем, что сварка должна вестись без перерыва для каждого прохода. При этом сварщику необходимо обходить вокруг трубы. Каждый проход выполнялся разными участниками лабора-

торной работы. После выполнения каждого из четырех проходов производился контроль герметичности высоковольтным искровым методом при напряжении 50кВ. Участники лабораторной работы были проинструктированы о необходимости ремонта сварного соединения своего прохода на тот случай, если бы в нем обнаруживался пробой, как показано на рисунке 6 для экструзионной сварки углового соединения.



Рисунок 6 - Проверка герметичности углового шва, выполненного экструзионной сваркой (искровой разряд показывает нарушение сплошности шва)

Лабораторная работа интересна для студентов тем, что они сами выполняли все трудовые действия от заготовительных до контрольных и формулирования заключения о качестве сварного соединения. Кроме того, при выполнении лабораторной работы студентам было продемонстрировано отсутствие сварочной ванны и показано, что без приложения усилия к прутку перемещение вязкотекучего участка прутка в зону сварки не происходит.

**Сварка полипропиленовых труб в раструб.** В настоящее время сварка НИ в раструб широко применяется при прокладке внутридомовых трубопроводов горячего и холодного водоснабжения, поэтому многие студенты видели в разные периоды своей жизни этот процесс. Это обстоятельство, а также кажущаяся простота и легкость выполнения сварки были дополнительным стимулом привлекательности этой лабораторной работы. Однако при переходе к самостоятельным практическим действиям, например, необходимости разметки заготовки трубы, правильного удержания фитинга в руке и продвижения фитинга на трубу после прогрева

соединяемых заготовок вызывало некоторое снижение интереса к действиям. В то же время, при переходе к оценке качества, проверке герметичности при гидроиспытании не только своих, но и соединений, выполненных сокурсниками, поддерживали интерес к лабораторной работе. На рисунке 7 показано как студент 4 четвертого курса гр. МС-91 Читпалова М. готовится к прогреву фитинга и трубы на аппарате для раструбной сварки.



Рисунок 7 – Раструбная сварка полипропиленовых труб

Выводы:

1. Термопласты успешно конкурируют с низкоуглеродистыми и низколегированными сталями при строительстве трубопроводов, искусственных водоемов и хранилищ опасных веществ;
2. Для сооружения сварных конструкций из полимерных материалов требуются специалисты разных уровней с профессиональной подготовкой по сварке этих материалов.
3. До начала централизованной подготовки специалистов по сварке полимерных материалов целесообразно в направлении «Машиностроение» направленности «Обору-

дование и технология сварочного производства» ввести модули с со сваркой полимерных материалов.

4. Модуль по сварке полимерных материалов с циклом лекционных и лабораторных работ, опробованный на кафедре «МБСП» АлтГТУ им. И.И. Ползунова показал, что большой объем часов аудиторных занятий практической направленности привлекает студентов возможностью личного участия в экспериментах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кученев В. О., Ракутько А. Г., Асадчев А. С. Сводная оценка коррозионной стойкости отдельных марок стали нефтегазопроводных труб для РУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «БЕЛОРУСНЕФТЬ» // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020, № 1, с. 94-101.

2. СТО Газпром 9.0-001-2009: Москва, 2009.

3. Мандров Б.И., Демин Е.А., Сухина С.Д., Путивский Сварка и контроль качества соединений противодиффузионных устройств // Ползуновский альманах, 2011, №4, с. 65-67.

4. Мандров Б.И. Расчет и проектирование сварных соединений: уч. пособие / Б.И. Мандров: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ.

5. Мандров Б.И. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Расчет и проектирование сварных соединений» для студентов направления 15.03.01 МАШИНОСТРОЕНИЕ (профиль) «Оборудование и технология сварочного производства», ч. 2 / Б.И. Мандров; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2022. - 61 с.

6. ГОСТ 16310-80 Соединения сварные полиэтилена, полипропилена и винилпласта. Основные типы, конструктивные элементы и размеры: дата введения 1980-03-24. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 26 с.

7. ГОСТ Р 59604.2-2021 Система аттестации сварочного производства Часть 2 Аттестация персонала. Правила: дата введения 2021-10-08. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. -73 с.

8. ГОСТ Р 59604.2-2021 Система аттестации сварочного производства Часть 2 Аттестация персонала. Правила: дата введения 2021-10-08. – Москва: Российский институт стандартизации, 2021. -73 с.

**Мандров Борис Иванович** – к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: [polimerbim@mail.ru](mailto:polimerbim@mail.ru);

**Маценко Илья Александрович** – учебный мастер кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: [tosenyuch@mail.ru](mailto:tosenyuch@mail.ru);

**Ощепков Алексей Александрович** – ассистент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: [leha1996\\_25@mail.ru](mailto:leha1996_25@mail.ru).

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЯЕМЫХ ВИК

Б. И. Мандров, И. А. Маценко, А. А. Ощепков,  
В. М. Дробот, И. С. Кошкарлов

Рассмотрены вопросы повышения конкурентной способности продукции за счет снижения дефектности сварных соединений. Показана необходимость выявления внешних дефектов не только при проведении визуального и измерительного контроля, но и на ранней стадии – на стадии проектирования технологии сборки и сварки конструкции. Предложено для этой цели использовать методы, используемые в системе управления качеством в машиностроении. Предложена процедура прогнозирования дефектов за счет применения FMEA и диаграммы причинно-следственных связей Каору Исикавы, до применения разработанной технологии сборки и сварки конструкции. На примере допускных стыковых сварных соединений труб показана разработка плана корректирующих мероприятий для предотвращения дефектов, выявляемых визуальным и измерительным контролем

**Ключевые слова:** конкурентная способность, внешние дефекты, визуальный и измерительный контроль, технология сборки и сварки, допускные стыковые сварные соединения, система управления качеством, прогнозирование образования дефектов, диаграмма Каору Исикавы, план корректирующих мероприятий

**Введение.** В условиях рыночной экономики большое значение имеет конкурентоспособность выпускаемой предприятием продукции, в основе которой лежит оптимальное соотношение её потребительских свойств и цены. Чем лучше потребительские свойства товара, выше его полезный эффект и ниже цена, тем выше реальная возможность его сбыта. В понятие «конкурентоспособность товара» входят понятия «качество товара» и «технический уровень продукции», которые являются важными ее составляющими. В стандарте ГОСТ Р ИСО 9000-2015 [1] качество определяется как степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям. Факторы, влияющие на качество продукции

### 1. Факторы внешней среды:

- уровень требований к качеству (потребители, прогресс, конкуренты);
- наличие поставщиков капитала, трудовых ресурсов, материалов, энергии, услуг;
- действующее законодательство в области качества и работа государственных органов.

### 2. Внутренние факторы предприятия:

- современная материальная база (инфраструктура, оборудование, материалы, финансы);
- Качество проекта (совершенство конструкции);
- применение передовых технологий, стабильность процессов;
- эффективный менеджмент (рациональная организация работ и умелое управление предприятием в целом и качеством в частности);
- квалифицированный персонал, заинтересованный в хорошей работе.

Качество выпускаемой продукции в основном определяется внутренними факторами предприятия. Для сварных конструкций это технология сборки и сварки (материалы, оборудование, персонал, условия выполнения сварочных работ). Для предотвращения попадания к потребителю некачественной продукции производится контроль качества готовой сварной конструкции (соединения) на соответствие требованиям нормативной документации (далее НД). Первым применяемым методом кон-

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЯЕМЫХ ВИК

троля является визуальный и измерительный контроль (далее ВИК), в задачу которого входит выявление внешних дефектов, превышающих нормы оценки. Для стандартных сварных швов и соединений размеры конструктивных элементов швов должны соответствовать стандарту или чертежу. Размеры дефектов не должны превышать нормы НД.

В случае выявления при ВИК брака дефектное место удаляется и производится его ремонт. Это повышает трудоемкость, энергоемкость и материалоемкость сварной конструкции.

В связи с тем, что контроль качества является завершающим этапом процедуры сварки для повышения качества продукции целесообразно при производстве сварных конструкций использовать принципы и методы менеджмента качества. Данная работа посвящена разработке мероприятий, корректирующих качество сварных соединений на стадии разработки технологии сборки и сварки конструкций.

### Полученные результаты и обсуждение.

Исследование вопроса проводилось в 4 этапа:

1. Разработка операционной карты сборки и сварки допусковых стыковых сварных соединений труб (далее ДС);

2. Определение групп и типов дефектов, которые могут образоваться при выбранной технологии сборки и сварки допусковых стыковых сварных соединений труб;

3. Причины возникновения дефектов при выбранной технологии; персонал действия которого могут привести к образованию каждого типа дефектов;

4. Разработка плана мероприятий, корректирующих образование каждого типа дефектов.

Рассмотрим каждый этап работы подробнее.

#### 1. Разработка операционной карты сборки и сварки допусковых стыковых сварных соединений труб.

Ниже кратко приведены условия

Сварной узел - **допускное сварное соединение (ДС),**

вид деталей - **труба  $\varnothing 133 \times 10$  - 125 мм, 2 шт.;**

Основной материал – **сталь 20;**

**ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 Т.2**

НД по сварке - **РД 2730.940.102-92, РД 153-34.1-003-01;**

Тип соединения - **С17 по ГОСТ 16037-80;**

Способ сварки - **ручная дуговая сварка;**

Сварочные материалы: **Э-50А, ЛБ-52У;**  
Положение при сварке - **Н45, неповоротное;**

Способ подготовки поверхности - **механический;**

Сварочное оборудование - **Lincoln INVERTEC 270 SX.**

#### Дополнительная информация

а) подготовка кромок по С17 централизованная,

б) подогрев заготовок при сборке и сварке не требуется,

в) очистку катушек от поверхностных загрязнений и зачистку до металлического блеска производит сварщик;

г) подготовку и хранение электродов в соответствии с требованиями НД осуществляет персонал специализированного участка.

Параметры режима сварки допусковых стыков труб приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры сварки КСС

номер валика (шва)	Марка электрода	$\varnothing$ , мм	Род и полярность тока	Сила тока, I <sub>св</sub> , А
Прихватка	ЛБ-52У	2,6	Пост. обратная	65-80
1 проход	ЛБ-52У	2,6	Пост. обратная	65-80
2-4 проходы	ЛБ-52У	3,2	Пост. обратная	85-115

2. Определение групп и типов дефектов, которые могут образоваться при выбранной технологии сборки и сварки допусковых стыковых сварных соединений труб.

Группы, к которым могут быть отнесены дефекты соединений при сварке допускных стыков определялись по ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Анализ групп дефектов: 1 - трещины; 2 - полости; 3 - твердые включения; 4 несплавление и непровар; 5 - отклонение формы и размера; 6 - прочие дефекты при сварке плавлением, указанных в [3] показал, что наиболее вероятны дефекты 2, 4, 5 групп и менее вероятны 6 группы.

Приведем перечень дефектов, относящихся к вышеуказанным группам:

- Полости - поверхностная пора, (пористость), незаваренный кратер.
- Несплавление и непровар - непровар в корне сварного шва.
- Отклонение формы и размера – подрез, превышение выпуклости (стыковой шов), неполное заполнение разделки кромок, линейное смещение труб, угловое смещение (перелом осей труб), неравномерная ширина шва,

- Прочие дефекты - брызги металла в трубе.

**3. Причины возникновения дефектов при выбранной технологии; персонал неквалифицированные действия которого могут привести к образованию каждого типа дефектов.**

Используя вышеприведенный перечень дефектов и данные работ [4 и 5], установим взаимосвязь между дефектами, выбранными в результате анализа и причинами их образования. Информация о дефектах и причинах их образования приведена в таблице 2. В вышеуказанных работах подробно рассмотрены причины возникновения дефектов, которые далее в работе будут объединены в несколько групп.

Таблица 2 – Причины образования дефектов

Наименование дефекта, его индекс	Причины возникновения дефекта
Поверхностная пора- <b>2017</b> ; поверхностная пористость- <b>2018</b>	Плохая очистка кромок, нарушение условий прокали и хранения электродов, избыточная длина дуги.
Незаваренный кратер- <b>2025</b>	Прекращение процесса сварки без заполнения кратера

Продолжение таблицы 2

Непровар в корне сварного шва- <b>4021</b>	Плохая очистка кромок, малая сила тока, высокая скорость сварки, (низкая квалификация сварщика), сложное пространственное положение шва
Подрез- <b>501</b>	Избыточная длина дуги (напряжение дуги), силы тока и скорости сварки, сложное пространственное положение шва
Превышение выпуклости- <b>502</b>	Низкая скорость сварки, сложное пространственное положение шва, неправильный режим сварки (низкая квалификация сварщика)
Линейное- <b>5072</b> и угловое смещение- <b>508</b> труб	Отсутствие приспособлений для закрепления деталей (низкая квалификация сварщика)
Неполное заполнение разделки- <b>511</b>	Низкая квалификация сварщика, сложное пространственное положение шва,
Неравномерная ширина сварного шва- <b>513</b>	Колебание напряжения питающей сети, сварка длинной дугой, неточное направление электрода (низкая квалификация сварщика), ВАХ источника не соответствует способу сварки
Ожог дугой- <b>601</b>	Зажигание дуги вне зоны шва (низкая квалификация сварщика)
Брызги металла в трубе- <b>602</b>	Чрезмерный ток при сварке корня шва, диаметр электрода не соответствующий корневому проходу (низкая квалификация сварщика)

Для составления плана мероприятий, корректирующих возможность образования дефектов и предотвращения попадания потребителю продукции не соответствующей заявленным характеристикам целесообразно провести анализ причин образования с помощью диаграммы Каору Исикавы [6]. Данный анализ визуализирован на рисунке 1. Для его формирования использовались данные операционной карты и таблицы 2. При этом для каждого блока указывался персонал, который мог быть причастен.

**ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 Т.2**

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДЕФЕКТОВ, ВЫЯВЛЯЕМЫХ ВИК

тен к возникновению брака или допустивший попадание некондиционной продукции к потребителю.

Проведенный анализ показал, что основной причиной возникновения дефектов, выявляемых ВиК являются неквалифицированные действия персонала: сварщика, термиста, работника склада, инженерно-технического персонала, контролеров, энергетиков. Из приведенного выше списка

основным лицом, ответственным за возникновение дефектов, является сварщик. Недостаточный уровень именно его квалификации приводит к дефектам формирования шва, подрезам, брызгам внутри трубы и т.п. В связи с этим был разработан план мероприятий, предотвращающих дефектов, выявляемых ВиК.

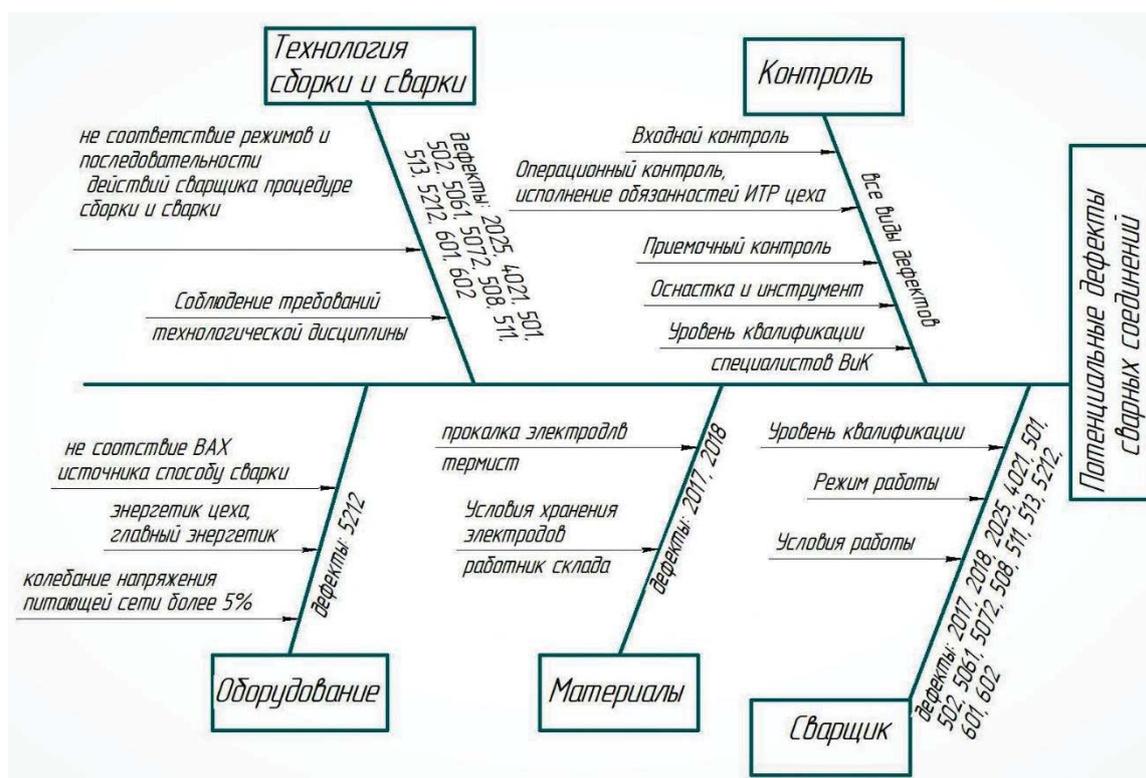


Рисунок 1 – Условия и причины возникновения дефектов в допусках стыках, выявленные с помощью диаграммы Каору Исикавы

### 4. Разработка плана мероприятий, корректирующих образование каждого типа дефектов

Для того чтобы снизить количество возникающих дефектов при сборке и сварке как допусковых стыков, так и в дальнейшем конкретной конструкции, нами был составлен план мероприятий, с помощью которых можно скорректировать появление вышеперечисленных дефектов. Данный план состоит из следующих пунктов:

1. Составить теоретические тесты и проверить их знания о причинах возникновения дефектов при способе сварки, используемом для допусковых стыков.

2. Проверить знание сварщиками всех трудовых действий процедуры сварки:

- а. Подготовки заготовок к сборке (очистка от поверхностных загрязнений, зачистка кромок до металлического блеска и т.п.);
- б. Выполнения сборки и прихваток;
- в. Особенности сварки в разных пространственных положениях сварочными электродами, указанными в технологической карте;
- г. Установки режима сварки для прихваток и корневого шва, заполняющих и облицовочного проходов;
- д. Сварки «короткой» дугой;

е. Проверки перед началом работы на-  
стройки сварочного источника с обязатель-  
ным выполнением пробного шва;

ж. Необходимости очистки от шлака  
прихваток и каждого прохода;

3. Проверить участок подготовки сва-  
рочных электродов и работающий на нем  
персонал;

4. Проверить напряжение электриче-  
ской сети участка на колебание питающего  
напряжения;

5. Дать указания ИТР цеха на проведе-  
ние систематического контроля выполнения  
сборочно-сварочных работ;

6. Проверить оснащение и качество  
контроля персонала, участвующего в про-  
ведении ВиК.

#### **Заключение.**

В результате выполнения работы была  
показана необходимость проведения не  
только контроля качества готовой продук-  
ции, но и контроля готовности производства  
к изготовлению сварных конструкций с по-  
ниженной дефектностью. Предложено рас-  
ширить применение методов управления  
качеством продукции на стадии подготовки  
производства. На примере сборки и сварки  
допусковых стыков труб показано примене-  
ние методов FMEA и диаграммы Каору Иси-  
кавы. Показано поэтапное формирование  
плана корректирующих качество мероприя-  
тий

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система ме-  
неджмента качества. Основные положения и  
словарь: дата введения 2015-09-28. – Москва:  
Стандартинформ, 2019. –54 с.

2. Огвоздин В. Ю. Управление качеством.  
Основы теории и практики: уч. пособие / В.Ю.

Огвоздин, 6-е издание.- Москва: Дело и Сервис,  
2009, 304 с.

3. ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. Сварка и род-  
ственные процессы. Классификация дефектов  
геометрии и сплошности в металлических мате-  
риалах. Часть 1. Сварка плавлением: дата вве-  
дения 2012-11-22. – Москва: Стандартинформ,  
2012. –54 с.

4. Технология электрической сварки ме-  
таллов и сплавов плавлением. Под ред. Б.Е.  
Патона. - Москва: Машиностроение, 1974, 727 с.

5. Юхин Н.А. Дефекты сварных соедине-  
ний / Н.А. Юхин.- Москва: Соуэло, 2007, 58 с.

6. Методы контроля качества Каору Исика-  
вы (7 старых инструментов контроля качества):  
[Электронный ресурс] // URL: <https://mydocx.ru/4-5362.html> (Дата обращения: 20.10.2022).

**Мандров Борис Иванович** – к.т.н., до-  
цент кафедры «Малый бизнес в сварочном  
производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им.  
И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail:  
[polimerbim@mail.ru](mailto:polimerbim@mail.ru).

**Маценко Илья Александрович** – учеб-  
ный мастер кафедры «Малый бизнес в  
сварочном производстве», ФГБОУ ВО  
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,  
Россия, e-mail: [tocenych@mail.ru](mailto:tocenych@mail.ru);

**Ощепков Алексей Александрович** – ас-  
систент кафедры «Малый бизнес в  
сварочном производстве», ФГБОУ ВО  
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,  
Россия, e-mail: [leha1996\\_25@mail.ru](mailto:leha1996_25@mail.ru);

**Дробот Валерий Михайлович** – ма-  
гистрант, гр.8МС-11, ФГБОУ ВО АлтГТУ  
им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия,  
e-mail: [valera.drobot.99@mail.ru](mailto:valera.drobot.99@mail.ru)

**Кошкаров Иван Сергеевич** - ма-  
гистрант, гр.8МС-11, ФГБОУ ВО АлтГТУ им.  
И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail:  
[ivan.koshkarov.99@mail.ru](mailto:ivan.koshkarov.99@mail.ru).

## ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

И. А. Маценко, А. А. Ощепков, Б. И. Мандров,  
Ю. С. Посылкин, А. Н. Дронов

Статья посвящена сравнению результатов определению скорости подачи проволоки при частично механизированной сварке в среде защитных газов при помощи нескольких методов. По расчетным и экспериментальным методам были определены скорости подачи для режимов сварки сплошной и порошковой газозащитной проволокой. Определена величина отклонения расчетных и экспериментальных данных. Выбран оптимальный метод определения скорости подачи проволоки.

**Ключевые слова:** сварка проволокой сплошного сечения, сварка порошковой газозащитной проволокой, частично механизированная сварка в углекислом газе, скорость подачи проволоки, система задания режима сварки, сварочный аппарат для частично механизированной сварки в защитных газах.

В настоящее время для производства сварных конструкций в строительстве и отраслях машиностроения используется около 70% производимого металлопроката. Во многом это связано с возможностью получения таких изделий, которые невозможно или более трудоемко изготовить другими способами. Правильный выбор режимов сварки оказывает огромное значение на качество производимой продукции.

В качестве способа сварки широко применяется частично механизированная сварка плавящимся электродом в среде защитного газа или газовой смеси. Основными параметрами для данного способа сварки являются:

- тип и диаметр проволоки;
- сварочный ток;
- скорость подачи проволоки;
- напряжение дуги;
- вылет электрода;
- расход защитного газа.

Знание величины скорости подачи проволоки наряду с технологическими характеристиками самой проволоки является неотъемлемой частью технико-экономических расчетов при обосновании выбора как способа сварки, так и сварочных материалов. Поэтому для определения данной величины могут быть использованы существующие расчетные формулы. В то же время современные сварочные аппараты для частично механизированной сварки в защитных газах, оснащенные блоком управления сварочным процессом, способны задать скорость подачи проволоки

в зависимости от диаметра и типа проволоки (сплошного поперечного сечения или порошковой) и величины сварочного тока. Следовательно, данная величина может быть взята согласно показаниям сварочного аппарата. Согласно принятому плану эксперимента, первоначально определялась скорость подачи и расход проволоки по расчетному, а затем экспериментальному методам.

В результате по полученным данным можно определить методику, согласно которой величина скорости подачи проволоки будет наиболее близка к экспериментальным данным при наименьших временных затратах по ее определению.

Расчетные методы основаны на определении длины расходуемой проволоки исходя из скорости подачи проволоки и времени выполнения сварки или наплавки. В одном случае скорость подачи проволоки может быть определена расчетным путем по формулам.

Для проволоки сплошного поперечного сечения скорость подачи может быть рассчитана по формуле (1) [1].

$$v = \frac{\alpha_p \cdot I_d}{3600 \cdot m_3} \text{ мм/сек}, \quad (1)$$

где  $\alpha_p$  - коэффициент расплавления электрода, г/А\*час;

$I_d$  - сварочный ток, А;

$m_3$  - масса 1 погонного см сварочной проволоки, г/мм.

В других источниках информации [2] для проволоки сплошного поперечного сечения

## ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

при сварке в углекислом газе скорость подачи предлагается рассчитывать по формуле (2).

$$V_3 = 1,9 * \frac{I_d}{d_3^2} + 2,5 * 10^{-3} * \frac{I_d^2}{d_3^2} \text{ м/ч,} \quad (2)$$

где  $d_3$  - диаметр электродной проволоки, мм.

Для порошковой проволоки скорость подачи может быть рассчитана через коэффициент расплавления оболочки и погонную массу оболочки по формуле (3) [3].

$$V_3 = \frac{\alpha_p^{об} \cdot I_d}{3600 \cdot m_{об}} \text{ мм/сек,} \quad (3)$$

где  $\alpha_p^{об}$  - коэффициент расплавления оболочки порошковой проволоки, г/А\*час

$m_{об}$  - масса 1 погонного см оболочки порошковой проволоки, г/мм.

Во втором случае скорость подачи проволоки берется согласно показаниям подающего механизма сварочного аппарата.

Для определения скорости подачи проволоки были выбраны следующие режимы, представленные в таблице 1. При расчетах были использованы средние значения тока и напряжения. В дальнейшем на данных режимах была произведена наплавка валиков на пластины с целью экспериментального определения скорости подачи проволоки.

Таблица 1 – Режимы наплавки валиков для определения скорости подачи проволоки

Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	Расход газа, л/мин
85-95	15-19	7-10
125-135	18-21	
175-185	21-23	10-15
215-225	24-26	

Результаты расчетов и показания с панели сварочного аппарата на установленных режимах представлены ниже в таблице 2.

Экспериментальное определение скорости подачи проволоки заключалось в нанесении на проволоку меток с установленным шагом, выполнении наплавки валика на установленных режимах и измерении оставшейся длины проволоки. Для этого из сварочной горелки выпускался участок проволоки, на

который наносились отметки с шагом 1000 мм. Общая длина маркируемого участка проволоки составляет 3000 мм. Далее выполнялась наплавка валика с измерением времени горения сварочной дуги. Для измерения времени сварки был выбран секундомер JOEREX 4504 позволяющий выполнять измерение с точностью 1/100 секунды. Наплавка выполнялась с применением сварочного аппарата для частично механизированной сварки в защитных газах Megmeet DEX PM3000. Данный аппарат оснащен блоком цифрового управления с выводом на дисплей режимов сварки включая - скорость подачи проволоки в зависимости от установленного режима сварки, типа и диаметра проволоки, 4-х роликовым подающим механизмом, предназначенным для подачи как сплошной, так и порошковой проволоки путем установки необходимых подающих роликов.

По окончании наплавки из сварочной горелки вновь выпускался участок проволоки и производилось измерение оставшейся части до граничной метки. Таким образом, располагая данными о расходуемой длине проволоки и времени наплавки была определена скорость подачи проволоки. Результаты представлены в таблице 2. Далее на рисунках 1 - 3 для наглядного сравнения представлены результаты по определению скорости подачи проволоки.

По результатам, представленным в таблице 2 и на рисунках 1 - 3, можно сказать о хорошей сходимости теоретических и экспериментальных методик определения скорости подачи проволоки. Стоит отметить, что полученные результаты отражают только среднюю величину скорости подачи проволоки. Это связано с тем, что в процессе сварки или наплавки невозможно обеспечить постоянную длину дуги, в результате чего происходит изменение ее длины, а, следовательно, и величины сварочного тока, что вызывает изменение скорости подачи проволоки.

Поскольку в дальнейшем предполагалось проведение серии экспериментов по импульсно-дуговой сварке, была определена скорость подачи электродной проволоки для этого способа сварки на сварочном оборудовании Megmeet DEX PM3000 и роботе FANUC Robot ARC Mate 100Diol на промплощадке АО «Барнаулметаллургмонтаж». В работе принимал участие сварщик-оператор робота Коваликов В.С.

Таблица 2 – Результаты определения скорости подачи проволоки

Сила сварочного тока, А (среднее значение)	Длина проволоки, мм		Длина расплавленной проволоки, мм	Время наплавки, с	Скорость подачи проволоки, м/ мин			Отклонение результатов, %
	до наплавки	после наплавки			Экспериментальная	Расчетная	Показания Megmeet DEX PM3000	
проволока сплошного сечения диаметром 1 мм								
90	3000	1670	1330	25	3,2	3,2	3,1	1,49
130	3000	1245	1755	22	4,8	4,8	4,8	0
180	3000	255	2745	20	8,2	7,1	8	6,16
220	3000	845	2155	12	10,8	9	10,7	8,12
проволока сплошного сечения диаметром 1,2 мм								
90	3000	2210	790	23,22	2	2,2	2	4,56
130	3000	2090	910	18,22	3	3,1	2,9	2,72
180	3000	2030	970	11,66	5	4,7	5	2,89
220	3000	840	1160	10,34	6,7	6,01	6,8	5,4
порошковая газозащитная проволока диаметром 1,2 мм								
90	3000	1850	1150	23	3	3,1	3,1	1,54
130	3000	880	2120	27	4,7	4,8	4,8	0,99
180	3000	1350	1650	13	7,6	7,7	7,7	0,61
220	3000	1370	1630	9,6	10,2	10,4	10,4	0,91

Таблица 3 – Значение скорости подачи  $V_{п.пм}$  проволоки сплошного сечения диаметром 1,2 мм при ИДС

Сварочный ток	Скорость, заданная программным модулем		Отклонение результатов
	Megmeet DEX PM3000	FANUC Robot ARC Mate 100/Diol	
А	м/мин		%
1	2	3	4
90	2,8	2,8	0
130	4,1	4,2	2,38
180	5,7	5,8	1,17
200	7,0	6,6	5,7

ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ  
ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

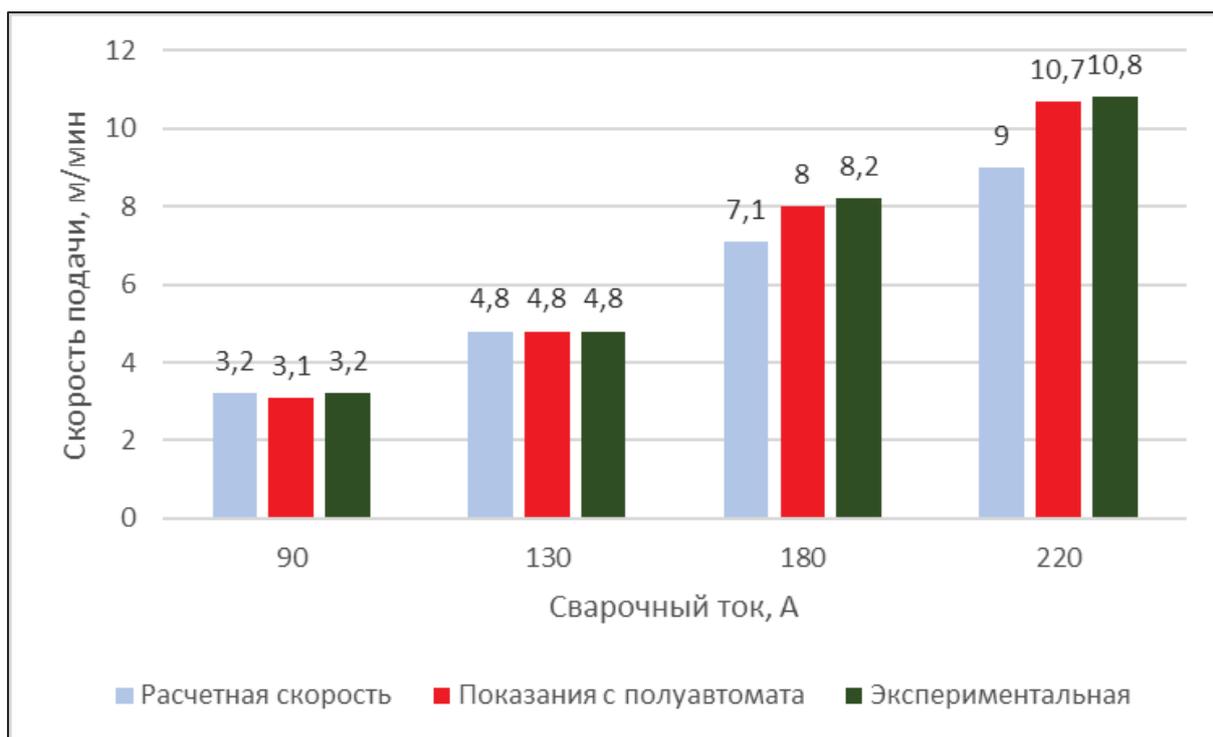


Рисунок 1 – Результаты определения скорости подачи проволоки сплошного сечения диаметром 1 мм

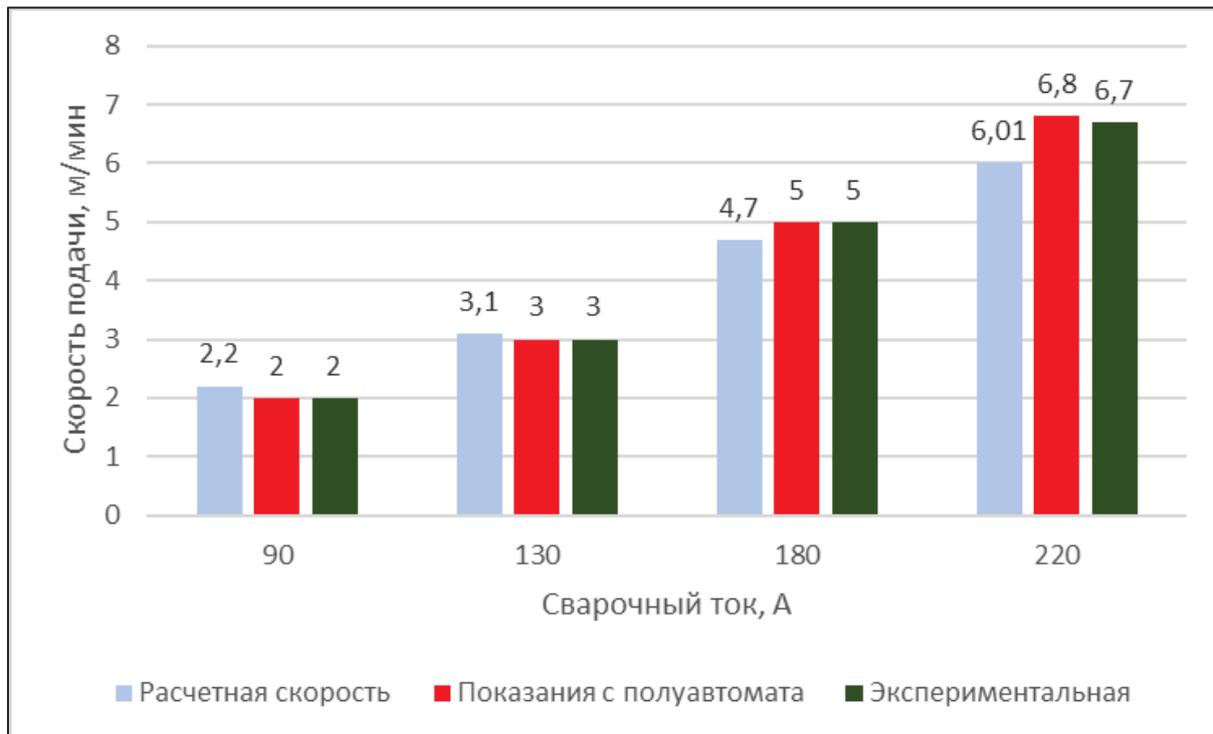


Рисунок 2 – Результаты определения скорости подачи проволоки сплошного сечения диаметром 1,2 мм

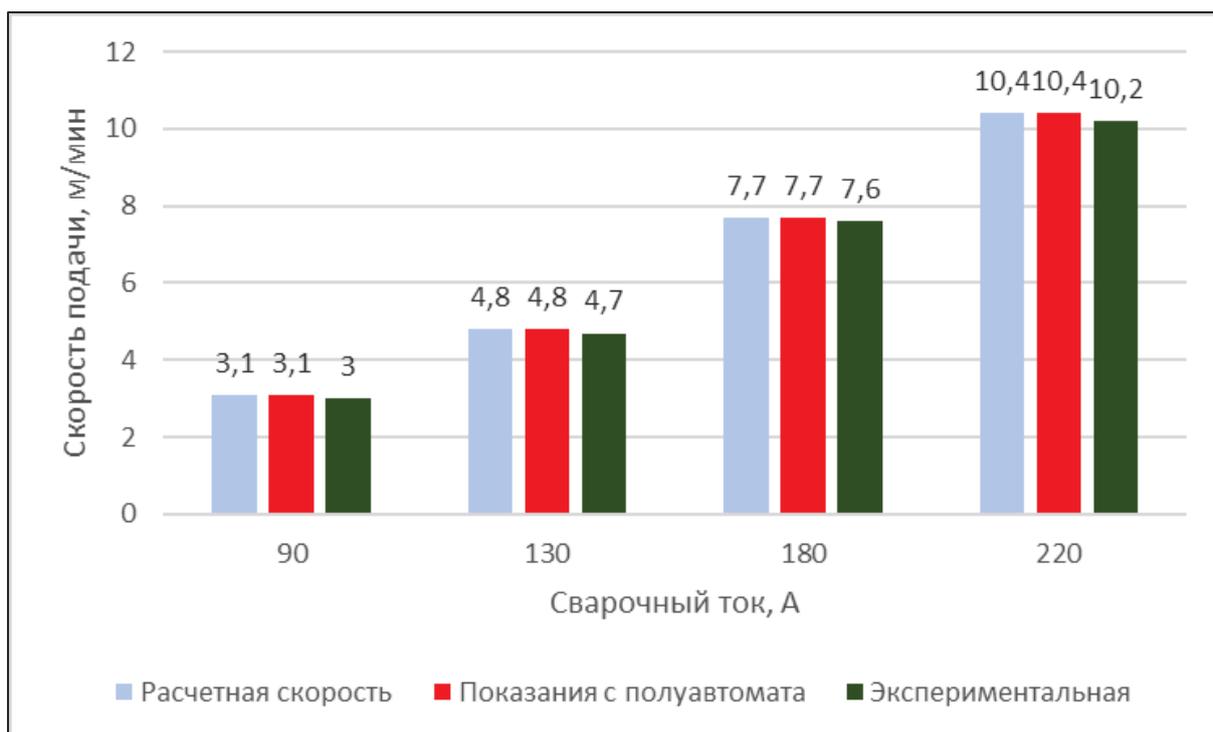


Рисунок 3 – Результаты определения скорости подачи порошковой газозащитной проволоки диаметром 1,2 мм

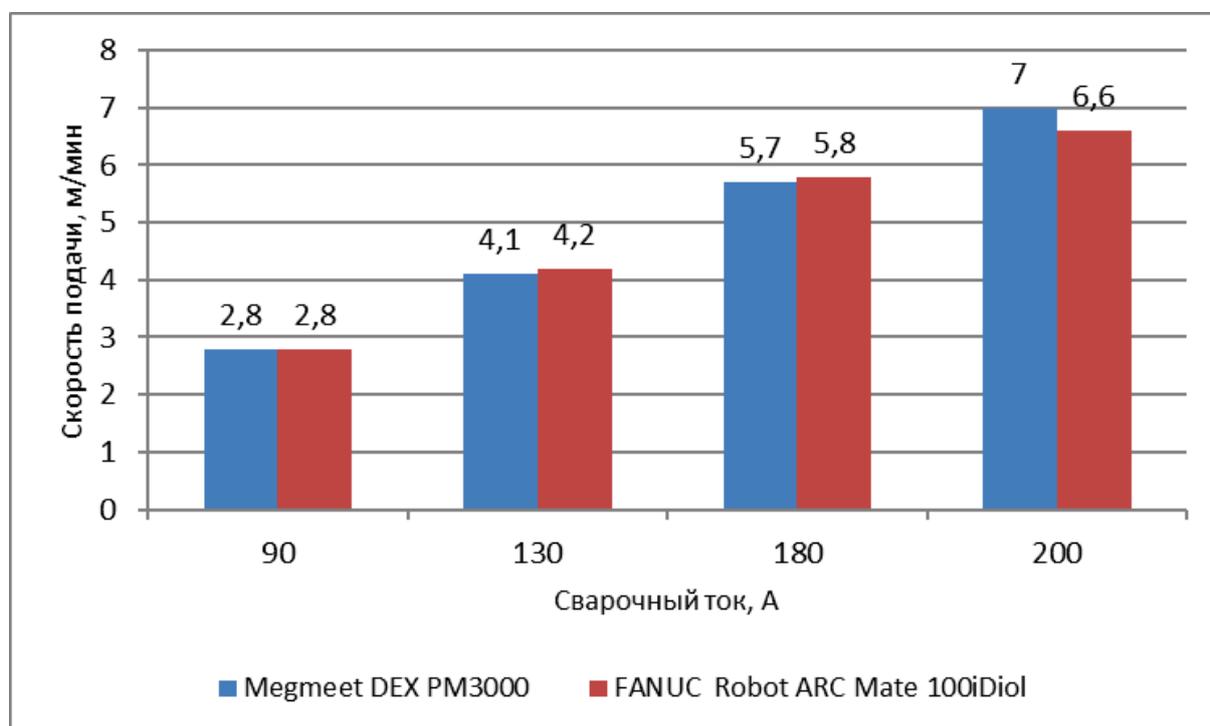


Рисунок 4 – Результаты определения скорости подачи проволоки сплошного сечения диаметром 1,2 мм при ИДС

## ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

По результатам, представленным в таблицах 2 - 3 и на рисунках 1 - 4, можно сказать о хорошей сходимости теоретических и экспериментальных методик определения скорости подачи проволоки. Стоит отметить, что полученные результаты отражают только среднюю величину скорости подачи проволоки. Это связано с тем, что в процессе сварки или наплавки невозможно обеспечить постоянную длину дуги, в результате чего происходит изменение ее длины, а, следовательно, и величины сварочного тока, что вызывает изменение скорости подачи проволоки.

### **Заключение:**

1. Результаты экспериментов позволяют определять расход сварочной проволоки по показаниям панели программного блока сварочного аппарата, тем самым исключить как необходимость проведения теоретических расчетов, так и необходимость предварительного и итогового измерений участков проволоки.

2. Установлено, что проволока сплошного сечения диаметром 1 мм и порошковая газозащитная проволока диаметром 1,2 мм имеют близкие по значению скорости подачи, поскольку близки по величине площади их поперечного сечений.

3. Показано, что при импульсно-дуговой сварке скорость подачи сварочной проволоки также может быть принята по показаниям программного блока, как сварочного полуавтомата марки Megmeet DEX PM3000, так и сварочного робота марки FANUC Robot ARC Mate 100Diol.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Окерблом Н.О. Проектирование технологии изготовления сварных конструкций / Н.О. Окерблом, В.П. Демянцевич, И.Л. Байкова Л.: Судпромгиз, 1963. – 600 с.

2. Шабалин В.Н. Сварочные процессы и оборудование: Учебное пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 175 с.

3. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. «Машиностроение», 1973. – 448 с.

**Маценко Илья Александрович** – *учебный мастер кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: toscenuch@mail.ru;*

**Ощепков Алексей Александрович** – *ассистент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: leha1996\_25@mail.ru;*

**Мандров Борис Иванович** – *к.т.н., доцент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: polimerbim@mail.ru;*

**Посылкин Юрий Станиславович** – *начальник цеха, ООО «Барнаулмеханомонтаж», Барнаул, Россия, e-mail: Pto.bamm@mail.ru;*

**Дронов Алексей Николаевич** – *гл. сварщик, ООО «Барнаулмеханомонтаж», Барнаул, Россия, e-mail: bamm-lab@mail.ru.*

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ В ВАКУУМЕ НА УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДНОЙ И ПАРОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

Ю. О. Шевцов

В статье показаны результаты исследований, разработки и применения электроннолучевой наплавки в вакууме на изнашиваемые поверхности трубопроводной и паровой котельной арматуры.

**Ключевые слова:** трубопроводная и паровая котельная арматура, уплотнительные поверхности, защитные покрытия, наплавка электронным пучком в вакууме.

Трубопроводная и паровая котельная арматура предназначена для управления движением, распределением и регулированием расхода потоков жидкостей, газов (паров) путем непосредственного на них воздействия.

По назначению арматуру можно разделить на следующие основные группы [1]: запорная, регулирующая, предохранительная, защитная, фазоразделительная.

Как показывает практика эксплуатации трубопроводной и паровой котельной арматуры, ее ресурс во многом зависит от качества уплотнительных поверхностей, которые работают в сложных эксплуатационных условиях. В настоящее время он меньше ресурса других основных элементов трубопроводов и энергетических установок.

В силу наиболее сложных эксплуатационных условий в работе рассматривалась первая группа, в частности вентили с условным диаметром прохода (номинальным диаметром отверстия в арматуре, служащий для прохода среды  $D_y = 100$  мм).

Для изготовления паровой котельной и трубопроводной арматуры в зависимости от ее назначения и условий работы используются конструкционные и легированные стали – сталь 20, 20ХМЛ, 15Х1М1ФЛ, 20Х1М11Ф11Р, 08Х18Н10Т, 20Х13 и многие другие.

Вентили арматуры выполняются с плоскими, конусными и сферическими уплотнительными поверхностями. Плоские уплотнения используются, в основном, в арматуре с  $D_y$  более 40 мм, предназначенной для пара и жидкостей средних и высоких давлений и температур. Конусные и шаровые (сферические) уплотнения работают в арматуре с  $D_y$  менее 40 мм, для пара и жидкостей высоких давлений и температур.

Шаровая запорная арматура (со сферическими уплотнительными поверхностями)

имеет следующие преимущества в сравнении с традиционными вентилями, задвижками, поворотными заслонками:

1. Низкое гидравлическое сопротивление (в 3...4 раза меньше).
2. Высокий уровень регулировки расхода, давления.
3. Быстрое время срабатывания.
4. Экономный расход жидкости или пара.

Запорную арматуру с такими поверхностями выгодно применять в пульпированных трубопроводах, где взвешенные частицы быстро засоряют обычные задвижки и вентили.

В настоящее время для увеличения срока службы арматуры защитные покрытия на рабочие поверхности наносят, в основном, методом наплавки. Для создания герметичного соединения поверхности притираются до шероховатости  $R_a 0,025$  и плотно сжимают нормальным усилием, что исключает наличие протечек рабочей жидкости или газа.

Уплотнительные поверхности работают в сложных условиях. В процессе работы они находятся в среде водяного пара или жидкости, рабочего давления и температуры. Запирание и отпирание запорных органов происходит многократно в условиях почти сухого трения при высоких контактных давлениях. При неработающем котле (парогенераторе) или трубопроводе уплотнительные поверхности подвергаются коррозионному воздействию конденсата или рабочего тела. Вышеперечисленные условия работы предъявляют определенные требования к уплотнительным поверхностям паровой котельной и трубопроводной арматуры, и материалам, применяемым для их изготовления. Наплавленный металл уплотнительных поверхностей должен отвечать следующим требованиям [2]:

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ В ВАКУУМЕ НА УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПОРОВОДНОЙ И ПАРОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

1. Иметь стабильную структуру и твердость в процессе длительной эксплуатации при рабочих температурах.

2. Быть плотным, не иметь трещин, пор, раковин, сколов и обеспечивать герметичность при эксплуатации.

3. Обладать стабильностью химических и физических свойств в течение установленного срока службы.

4. Обладать достаточным сопротивлением термической и малоциклового усталости.

5. Обладать стойкостью против образования горячих и холодных трещин при наплавке и иметь твердость больше 45 HRC.

6. Обеспечивать стойкость против задиоров при удельных давлениях 1200...1500 кгс/см<sup>2</sup>.

7. Обладать коррозионной и эрозийной стойкостью в рабочих средах (перегретый пар до температуры  $T = 515^{\circ}\text{C}$ , до давления  $P = 80 \text{ кгс/см}^2$ , насыщенный пар до  $T = 300^{\circ}\text{C}$ , до  $P = 93 \text{ кгс/см}$ , агрессивные жидкости).

Для удовлетворения жестких требований в отношении сопротивления изнашиванию, задирам, циклическим нагревам, ударным нагрузкам, коррозии, эрозии уплотнительные поверхности запорной арматуры упрочняются путем электродуговой наплавки под слоем флюса и в среде инертных газов, плазменной наплавки [3]. Наряду с этими традиционными методами все чаще применяют плазменную наплавку с подачей двух токоведущих присадочных проволок [4], импульснодуговую наплавку плавящейся электродной проволокой в среде аргона, а также лазерную наплавку [5]. В качестве наплавочных материалов в арматуростроении применяют следующие материалы:

1. Хромистые стали 48Ж-1 мартенситного класса.
2. Хромоникелевые стали – наплавка электродами ЦН-6Л, ЦН-6М.
3. Сплавы системы Fe-Cr-Ni-Si (Mo, В, Mn) – наплавка электродами ЦН-12Л, ЦН-12М, порошками ПН-АН 34.

4. Сплавы на основе Ni (колмонои).

5. Сплавы на основе Co (стеллиты).

Хромистые стали, широко применяемые для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры, обладают удовлетворительными коррозионными и эрозийными свойствами и имеют твердость наплавленного слоя менее 48 HRC. Но они используются только для наплавки поверхностей, работающих в паровой среде до  $400^{\circ}\text{C}$ , т.к. при более высоких температурах значительно снижаются их служебные свойства.

Более высокими коррозионными свойствами по сравнению с хромистыми сталями обладают хромоникелевые нержавеющие сплавы ЦН-6М, ЦН-6Л, но из-за низкой твердости наплавки (28...37 HRC) они также имеют ограниченное применение. Сплавы ЦН-12Л и ЦН-12М из-за неудовлетворительных технологических свойств и недостаточного сопротивления термоусталости не применяются для паровой котельной арматуры, подверженной частым переменным тепловым воздействиям.

Наиболее высокими служебными характеристиками обладают сплавы на основе кобальта – стеллиты (от названия фирмы Delloro Stellite Limited (Англия)). Их применяют для наплавки уплотнительных поверхностей арматуры фирмы Alfa-Laval (Франция), Siemens (Германия), Johnstone (США), Yamatake-Honeywell (Япония). Но они дороги и с трудом поддаются последующей механической обработке.

Для создания защитных покрытий на уплотнительных поверхностях запорной паровой котельной и трубопроводной арматуры – седла, тарелок и сфер – была предложена технология прямой порошковой электроннолучевой наплавки в вакууме (ЭЛН). Учитывая условия работы пары трения и необходимость обеспечения возможности последующей обработки, материалами для наплавки были выбраны хромоникелевый порошковый сплав ПГ-10Н-01 на тарелки и шаровые поверхности и бронзовый сплав ПГ-19М-01 на седла. Химический состав порошков показан в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав наплавленных порошков

Марка	C	Cr	Ni	Si	Fe	B	Al	Cu
ПГ-10Н-01	0,6-1	14-20	ост	4-4,5	3-7	2,8-4,2	-	-
ПГ-19М-01	-	-	-	-	до 5	-	8,5-10	ост.

Наплавка осуществлялась на электроннолучевой аппаратуре У-250А с использовани-

ем термонакальной пушки У-530М. Благодаря специально сконструированному манипулято-

ру изделия со сферическими рабочими поверхностями с радиусом  $R = 45$  мм в процессе наплавки вращались вокруг двух взаимоперпендикулярных осей относительно неподвижного луча и желоба питателя, что обеспечивало непрерывную наплавку валиков по винтовой линии с коэффициентом перекрытия валиков  $K_n = 30 \dots 40$  %.

Исходя из условий обеспечения прочного соединения наплавленного металла с основой и исключения их значительного перемешивания, в результате экспериментальных исследований были установлены следующие режимы ЭЛН:

- ускоряющее напряжение  $U_a = 22$  кВ;
- ток луча  $I_n$  - до 100 мА (удельная мощность в пятне нагрева  $q$  – до  $2,7$  Вт/см<sup>2</sup>) для тарелок и сфер и  $I_n$  до 120 мА ( $q$  – до  $3,4$  Вт/см<sup>2</sup>) для седел;
- окружная скорость вращения изделий – до 3 мм/с;
- массовый расход порошка  $G_n$  – до 1 кг/ч;
- развертка луча в две линии с амплитудой  $A = 5$  мм, частотой  $f = 25$  Гц и ускорением на концах отрезков.

Нанесение покрытий без предварительного подогрева изделий привело к появлению в наплавленном слое на сферических поверхностях сетки трещин из-за разности коэффициентов термического расширения наплавленного материала и материала подложки (сталь 20). Поэтому, чтобы исключить эти дефекты, заготовки перед направкой подогревали до температуры  $450 \dots 550$  °С.

Поддержание в процессе наплавки установленного рационального соотношения основных технологических режимов позволило обеспечить толщину наплавленного слоя  $1 \dots 2$  мм, минимальное проплавление подложки и незначительное разбавление наплавленного металла железом (доля материала подложки в наплавленном слое  $\gamma$  до 5 %).

Сочетание оптимальных режимов и процессов рафинирования и дегазации расплава, проходящих во время наплавки в вакууме, обеспечило, как показывают результаты ме-

таллографического и рентгеноструктурного анализа, получение плотной мелкозернистой структуры защитного покрытия (без пор, раковин, неметаллических и газовых включений) с требуемым уровнем функциональных свойств.

В результате экспериментальных исследований установлено, что наплавленный порошком ПГ-10Н-01 слой металла по технологичности, по стойкости против задиров при сухом абразивном трении и против образования трещин при резких сменах температуры превосходит сплавы на основе кобальта и железа, а использование для наплавки седел бронзового порошка ПГ-19М-01 позволило снизить коэффициент трения в паре седло-палец и седло-сфера до 0,15.

Твердость наплавленных материалов составила  $25 \dots 30$  HRC на седлах и  $45 \dots 50$  HRC на шарах и пальцах, что позволило обрабатывать покрытия на токарных станках с ЧПУ с последующей финишной операцией магнитно-абразивным способом.

На рис. 1 показана шаровая запорная арматура с рабочими поверхностями, наплавленными электронным лучом в вакууме.

Длительные производственные испытания на АО «ЭТЭМ» на базе Центрального котлотурбинного института им. И.И. Ползунова показали повышение стойкости пары трения палец – седло в 2,5 раза по сравнению с выполненными из стали 08Х18Н10Т.

Расчетный годовой экономический эффект от использования созданной технологии упрочнения уплотнительных поверхностей деталей котельной и трубопроводной запорной арматуры на АО «ЭТЭМ» составляет 850 тысяч рублей (в ценах 1990 г.)..

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ В ВАКУУМЕ НА УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПОРОВОДНОЙ И ПАРОВОЙ КОТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ



Рисунок 1 - Запорная арматура с уплотнительными поверхностями, упрочненным методом ЭЛН в вакууме

Применение в арматуростроении ресурсосберегающей экологически чистой технологии прямой порошковой электроннолучевой наплавки в вакууме позволяет повысить качество защитных слоев металла, достичь высокой надежности и долговечности защищенных узлов, уменьшить расход присадочных материалов, повысить производительность и улучшить условия труда за счет автоматизации процесса.

Полученные инженерные решения [6, 7] позволяют рекомендовать использование процессов наплавки электронным лучом в вакууме для решения проблемы износа деталей машин и механизмов в различных отраслях промышленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры.- М.: Машиностроение, 1981.- С. 5-11.
2. Андреев В.В. Общая технология судостроения.- Л.: Судостроение, 1984.- С. 10.
3. Фрумин И.И., Гладкий П.В., Переpletчиков Е.Ф. Опыт применения плазменной наплавки стеллита для ремонта крупных задвижек//Автоматич. сварка.-1981.-№1.-С.67-68.

4. Быховский Р.Г. Плазменная обработка металлов на ленинградских предприятиях // Сварочное производство.- 1983.- N 10.- С. 36.

5. Разработка лазерной технологии по наплавке уплотнительных поверхностей паровой котельной арматуры порошковыми материалами типа ПН-АН34 и ПН-68Х21С5Р: Отчет о НИР (предварит.) / ЛКИ; Руководитель Манько П.А.; Г.р. N 01860006879.- 1986.- 91 с.

6. Радченко, М.В. Практика использования концентрированных потоков энергии для сварки и создания защитных покрытий/ М.В. Радченко, С.Г. Уварова, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко, В.А. Марков // Ползуновский вестник, 2012.- № 1/1.- С. 248-254.

7. Шевцов, Ю.О. Прогнозирование свойств наплавляемых защитных покрытий с использованием регрессионного анализа//Ползуновский вестник, 2009.- №4.- С. 207-210.

*Шевцов Юрий Олегович – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru*

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ю. О. Шевцов

В статье показаны результаты исследований, разработки и применения электроннолучевого упрочнения и наплавки в вакууме на изнашиваемые поверхности двигателей внутреннего сгорания.

**Ключевые слова:** детали двигателей внутреннего сгорания, упрочняющие и защитные покрытия, наплавка, электронный пучок в вакууме.

Наиболее слабым местом поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС), особенно форсированных дизельных двигателей, как показывает практика их эксплуатации, являются зоны кольцевых канавок под компрессионные кольца. Образование предельного зазора между компрессионным кольцом и кольцевой канавкой поршня в основном и определяет ресурс двигателя до переборки, расход топлива и масла, а также затраты на ремонт. Поэтому, решение проблемы повышения моторесурса кольцевых канавок поршней является основным направлением для практического использования результатов научных исследований как в России, так и за рубежом.

Коллективом авторов в Проблемной лаборатории процессов сварки и создания защитных покрытий АлтГТУ им. И.И. Ползунова (рис. 1) на основе более чем 20-летнего опыта в области электроннолучевых технологий разработана технология электроннолучевого упрочнения наиболее технологически сложных поршневых алюминиевых сплавов заэвтектического состава марки АК21М2,5Н2,5. Технология упрочнения заключается в электроннолучевом переплаве слоя металла в том месте поршня, где в последующем выполняется проточка кольцевой канавки необходимых геометрических размеров.

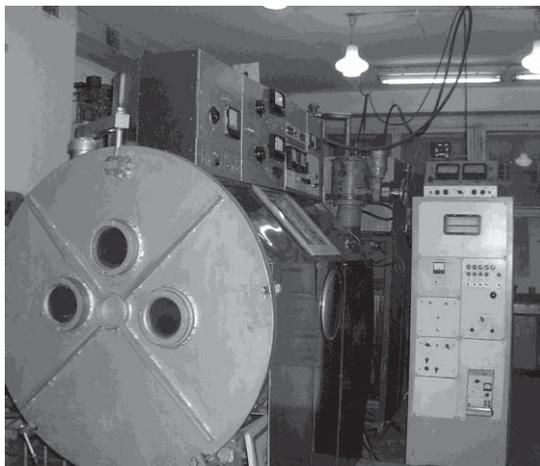


Рисунок 1 - Лабораторная аппаратура для электроннолучевой сварки и наплавки в вакууме

Упрочнение проводится на поршневых заготовках, полученных методом литья в кокиль. Предпочтительным является вариант использования технологии упрочнения как одной из технологических операций при производстве поршней. Перед упрочнением заготовку порш-

ня очищают от грязи, пыли, масла, затем закрепляют в приспособлении для обеспечения вращения заготовки вокруг своей оси. После закрепления проводят герметизацию вакуумной камеры до необходимого остаточного давления (не более 0,01 Па), и осуществляют

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

процесс упрочнения с легированием или без него.

Основными проблемами при электронно-лучевом переплаве в вакууме высококремнистого поршневого сплава, с которыми сталкиваются разработчики технологии, являются растрескивание зоны переплава и высокий уровень остаточной пористости металла.

Для анализа причин возникновения этих проблем были изучены технологии литья и дополнительной обработки алюминиево-кремниевых заготовок на специализированных предприятиях «Поршень» (г. Алма-Ата, Республика Казахстан) и Новосибирском авиационном производственном объединении им. В.П. Чкалова.

Разрешение этих проблем авторами данной статьи найдено в результате анализа структурообразования поршневых заготовок в процессе их отливки и модификации, анализа теплового состояния поршня в процессе переплава зоны упрочнения и рационального выбора траектории высокочастотного сканирования электронного луча.

Для осуществления принудительной дегазации жидкой металлической ванны и более равномерного распределения в ней легирую-

щих элементов было необходимо оснащение электронно-лучевых установок приборами управления луча (ПУЛ), позволяющими осуществлять перемешивание расплава за счет сканирования электронного луча по заданной траектории с определенной амплитудно-частотной характеристикой. Для решения последней задачи в течение 1,5...2 лет была разработана и изготовлена серия специализированных приборов управления электронным лучом, обладающих большим объемом памяти, широким диапазоном частот и траекторий перемещения электронного луча, независимым регулированием развертки по осям координат, плавным регулированием амплитуды и универсальностью в использовании различными типами электронно-лучевых пушек.

Такие характеристики ПУЛа позволяют выполнять технологические операции как исследовательского, так и производственного характера. Одна из конструкций таких приборов представлена на рис. 2.



Рисунок 2 - Панель прибора программного управления электронным лучом

В результате комплексных экспериментальных исследований установлены оптимальные технологические параметры режима упрочнения, позволяющие получать практически бездефектный металл в зоне переплава с высокими показателями износостойкости.

В процессе отработки опытно-производственной технологии электронно-лучевого упрочнения поршней для дизелей ОАО «Барнаултрансмаш» было выявлено, что в данной технологии существует серьезный резерв повышения износостойкости первой кольцевой канавки - а именно, упрочнение с легированием, что позволяет значительно расширить области применения данного способа упрочнения [1-5].

В случае дополнительного легирования алюминиевого сплава с целью получения еще более высоких показателей износостойкости в качестве легирующего материала предложено использовать нихромовую или медную проволоку, содержание которых в наплавленном металле определяет требуемые механические свойства, например твердость, износостойкость.

Внешний вид поршневых заготовок с упрочненными зонами под кольцевую канавку показан на рис. 3. Геометрические размеры данных поршней составляют: диаметр 150 мм, высота 120 мм. Геометрические размеры компрессионных колец: радиальная ширина - 6,05<sub>-0,2</sub> мм, толщина - 3,0 мм. Данными поршнями комплектуются быстроходные форсированные дизельные двигатели.



Рисунок 3 - Заготовки поршней из сплава АК21М2,5Н2,5 с упрочненными зонами под проточку кольцевых канавок (указаны стрелками)

Практическая реализация разработанного способа упрочнения кольцевых канавок осуществлена на заводе ОАО “Барнаултранс-маш”, где был спроектирована и изготовлена электроннолучевая аппаратура с 14-ти позиционным манипулятором под данный типоразмер поршней. С использованием электроннолучевой пушки с “холодным катодом” и манипулятором, внешний вид которых показан на рис. 4 и 5, выполняли производственную программу упрочнения поршней методом элек-

троннолучевой технологии без легирования.

Проведенные производственные испытания упрочненных поршней при работе на форсированных дизелях показали повышение их моторесурса в 3 раза. Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 200 рублей на 1 упрочненный поршень в ценах 2000 г.



Рисунок 4 - Заводская электроннолучевая установка с пушкой с “холодным катодом” и прибором управления лучом

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

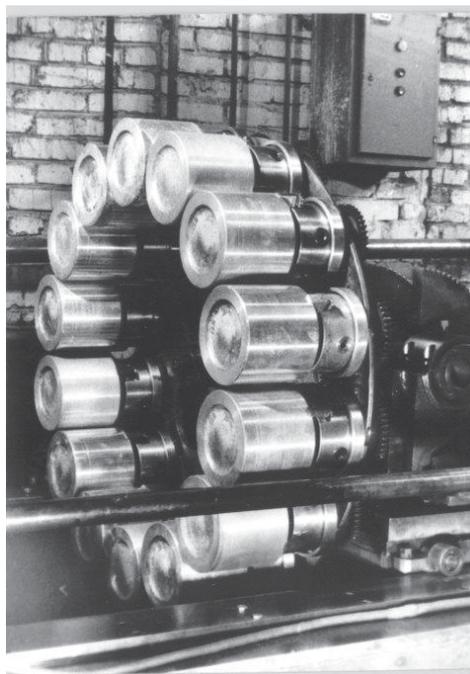


Рисунок 5 - 14-ти позиционный манипулятор для сварки и упрочнения поршней

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о перспективности применения электроннолучевой технологии с легированием для упрочнения алюминиевых поршней двигателей внутреннего сгорания.

Разработанная технология может быть рекомендована к внедрению на предприятиях края, специализирующихся в области двигателестроения или производства деталей и комплектующих для двигателей внутреннего сгорания.

Одной из проблем, возникающих при эксплуатации поршней, является сокращение их срока службы по причине растрескивания днища поршня вследствие термоусталостных напряжений. Существует ряд способов снижения термоусталостных напряжений, в том числе за счет изменения конструкции поршней, в частности создания в зоне первой поршневой канавки дополнительной полости, по которой циркулирует моторное масло.

В такой конструкции поршня благодаря более интенсивному охлаждению за счет циркуляции моторного масла, от днища поршня происходит более равномерный отвод тепла, что приводит к снижению термоусталостных напряжений и предотвращению растрескивания алюминиевого сплава вблизи днища поршня.

Предложенная авторами технология производства сварного поршня имеет определенные преимущества перед аналогичными технологиями, используемыми для образования

полости охлаждения в днище поршня, например, метод заливки соляных стержней. Использование электроннолучевой сварки в вакууме обеспечивает кинжальное проплавление, что предотвращает создание напряжений и последующих деформаций.

Такого рода конструкторские и технологические работы принципиально были известны ранее по результатам исследований германских (фирма "Мале") и российских ученых-конструкторов, в том числе сотрудников ЦКБ ОАО "Барнаултрансмаш". Однако во всех случаях использование электроннолучевой технологии относилось только к низкокремнистым алюминиевым поршневым сплавам, т.н. благополучным в отношении металлургических дефектов при переплаве высококонцентрированными потоками энергии (плазменные струи, электронные лучи).

Авторами была разработана и прошла успешное тестирование технология производства составного поршня из высококремнистого алюминиевого сплава АК21М2,5Н2,5, изготовленного из двух частей с последующей их сваркой электронным лучом. Результаты комплексного тестирования качества металла и всей конструкции поршней в целом показали практическое отсутствие каких либо дефектов, что явилось принципиальным доказательством возможности использования данной технологии производства поршней с полостью охлаждения, как показано на рис. 6.

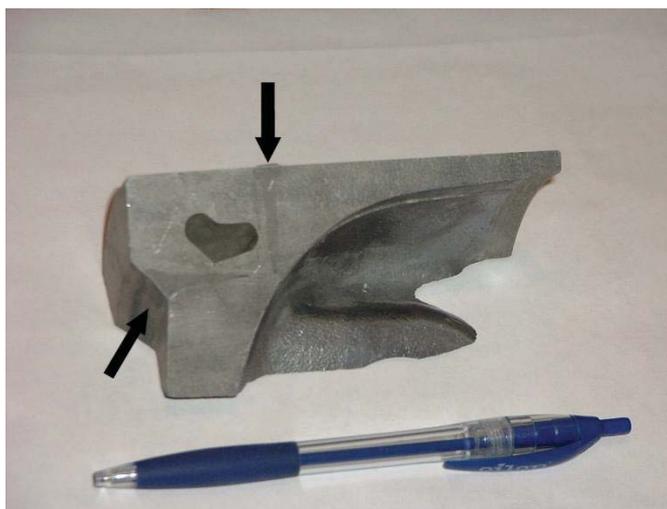


Рисунок 6 - Темплет составного сварного поршня с полостью охлаждения (стрелками указаны сварные швы)

Разработанная технология электронно-лучевой сварки алюминиевых поршней рекомендована для дальнейшего использования на предприятиях страны, специализирующихся в области двигателестроения.

В связи с относительно высокой стоимостью оборудования, использование высококонцентрированного источника нагрева – электронного луча в вакууме – для сварки и создания упрочняющих и защитных покрытий целесообразно в тех случаях, когда оно приводит к получению качественно новых результатов, свойств сварных, упрочненных и наплавленных изделий, а также когда невозможно использовать другие методы поверхностного нагрева. В частности, авторами работы для предприятия ОАО «Барнаултрансмаш» был выполнен комплекс технологических работ по электроннолучевой сварке тела гильзы цилиндра с посадочным буртом. Это определило экономию дорогостоящей легированной стали 38Х2МЮА до 40 % за счет резкого уменьшения толщины стенки заготовки и устранения операции токарной обработки [6].

В развитие электроннолучевых технологий метод наплавки электронными пучками низких энергий (до 5 кэВ), разработанный коллективом авторов, благодаря сочетанию преимуществ порошковых материалов и вакуумной защиты металла позволяет создавать уникальные по эксплуатационным свойствам упрочняющие слои на поверхностях различных деталей дизелей [7-11].

Весьма эффективно с помощью упрочнения и наплавки электронным лучом создание защитных слоев на поверхности деталей с вы-

соким уровнем функциональных свойств (твердость, износо- и коррозионная стойкость) на деталях или заготовках из относительно дешевых малоуглеродистых сталей. Благодаря возможности подачи энергии точной дозировки с помощью наплавки электронным лучом (ЭЛН) формируются равномерные по толщине слои с минимальным проплавлением основы, исключаются деформации нежестких деталей. Прочность сцепления с основой наплавленных методом ЭЛН покрытий, находится на уровне металлической связи. Поэтому в отличие от напыленных они не растрескиваются и не отслаиваются в результате воздействия интенсивных многоцикловых контактных нагрузений. Возможна многократная наплавка после перешлифовки наплавленных деталей. Как показывает практический опыт, стоимость ремонта деталей составляет порядка 30% от стоимости новых при существенно более высоких функциональных показателях свойств поверхности [12? 13].

Например, упрочнение с оплавлением рабочих кромок матриц для горячего деформирования распылителей дизельного топлива позволило на ОАО «Алтайдизель» повысить разгаростойкость поверхности в 2 раза.

Особенно актуальным является практическое использование электроннолучевой технологии наплавки высоколегированных порошковых сплавов на основе системы Ni-Cr-B-Si для ремонта и восстановления изношенных поверхностей тяжело нагруженных деталей: коленчатых и распределительных валов ДВС (рис. 7, 8), крестовин, шаровых опор, толкателей распределительного валика, ступиц шки-

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ И НАПЛАВКИ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ВАКУУМЕ ИЗНАШИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

вов клиноременных передач, ходовых винтов и др.

Использование высококонцентрированных электронных пучков для сварки, упрочнения с оплавлением и прямой порошковой на-

плавки является перспективной областью, в которой накоплен достаточно большой практический конструкторско-технологический опыт.

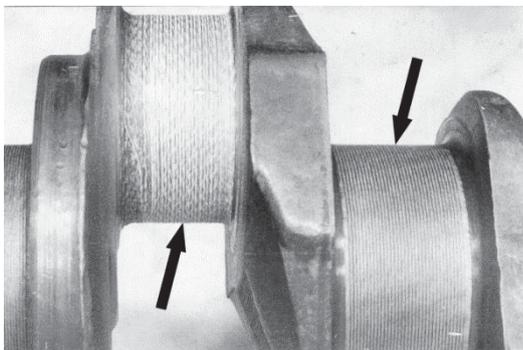


Рисунок 7 - Коленчатый вал форсированного дизеля с коренными и шатунными шейками, упрочненными методом электроннолучевого оплавления (стрелками указаны места упрочнения)



Рисунок 8 - Распределительный вал ДВС после ремонта методом электроннолучевой наплавки (стрелкой указано место износостойкой наплавки)

Перспективным представляется создание на тяжелонагруженных деталях дизелей с наплавленными композиционными покрытиями, когда каждая из фаз – пластичная матрица и твердые упрочняющие частицы карбидов, боридов, силицидов тугоплавких элементов – выполняет определенные функции, создавая в комплексе материалы с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Разработанные технологии могут быть рекомендованы к внедрению на предприятиях края, специализирующихся в области двигателестроения при производстве новых или восстановлении и ремонте изношенных деталей и комплектующих для двигателей внутреннего сгорания.

Хорошая воспроизводимость результатов упрочнения и наплавки в автоматизированном

режиме, возможность полной автоматизации технологического процесса с компьютерным управлением, экологическая чистота, возможность существенного улучшения свойств поверхностного слоя изделий в сочетании с наличием выпускаемого в России и странах ближнего зарубежья надежного, апробированного в течение 30-35 лет оборудования, значительно расширяет диапазон технологических операций обработки деталей дизелей с использованием электронных пучков в вакууме.

Наличие на предприятиях края внедренных электроннолучевых технологий сварки и создания упрочняющих и защитных покрытий определяет приоритет Алтая в этой области.

В 2007 г. коллективу авторов за разработку и внедрение на предприятиях региона электроннолучевых технологий сварки, упрочнения

и наплавки была присвоена премия Алтайского края в области науки и техники.

Полученные инженерные решения позволяют рекомендовать использование процессов сварки, упрочнения и наплавки электронным лучом в вакууме для решения проблемы износа деталей машин и механизмов в различных отраслях промышленности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2148750. Способ упрочнения зон кольцевых канавок поршня двигателя внутреннего сгорания / М.В. Радченко, Н.И. Батырев, К.С. Кровяков, Ю.О. Шевцов. Заявл. 21.12.1998. Оpubл. 10.05.2000.
2. Радченко, М.В. Исследование структуры и свойств поршневого алюминиевого сплава, обработанного электронным лучом/М.В. Радченко, К.С. Кровяков // Сварочное производство. 1998. № 11. С.9-12.
3. Радченко, М.В., Получение упрочненных слоев на поверхности поршней из силуминов методом электронно-лучевой наплавки / М.В. Радченко, В.Г. Радченко, К.С. Кровяков// Сварочное производство. 1999. № 11. С.48-51.
4. Кровяков К.С. Упрочнение кольцевых канавок поршня дизеля электронно-лучевой обработкой // К.С. Кровяков, М.В. Радченко//Техника машиностроения. 2000. № 3. С.23-25.
5. Радченко М.В., Зубков А.В., Косоногов Е.Н. Электроннолучевое упрочнение поршневого сплава АК21.- В кн.: Электроннолучевая сварка. М. 1986. С.27-30.
6. Радченко М.В., Батырев Н.И. О структурообразовании в процессе электроннолучевого упрочнения стали 55Х2Н2МФА с оплавлением поверхности.- Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. № 4. Вып. 1. 4 с.
7. Ольшанский, Н.А, Электроннолучевая сварка гильзы цилиндров дизельных двигателей/Н.А. Ольшанский, В.Г. Радченко, М.В. Радченко, Р.Ф. Балаян, // Материалы 8 Всесоюзной конф. по электроннолучевой сварке. М. 1983. С.16-19.
8. Radchenko M.V., Shevtsov Yu.O., Batyrev N.I. Metallurgical coating made by electron beam surfacing/ 5 Int. Conf. On Electron beam techn. Varna, Bulgaria, 1991. P.487.
9. Радченко, М.В. Оценка твердости и пластичности слоев, созданных электронно-лучевым наплавлением в вакууме/ М.В. Радченко, В.Г. Радченко, А.М. Кириенко, Ю.О. Шевцов // Металлург. 1997. № 8. С. 33-35.
10. Радченко М.В. Исследование характера коррозионного износа защитных покрытий, выполненных методом электроннолучевой наплавки порошковых сплавов в вакууме/ М.В. Радченко, Т.Н. Беянина // Перспективные материалы. 1997. № 6. С.56-60.
11. Радченко, М.В. Комплексный анализ износостойких защитных покрытий, наплавленных электронными пучками в вакууме / М.В. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.Г. Радченко//Ползуновский вестник. 2005. № 2 (ч. 2). Барнаул: изд-во АлтГТУ. С.67-71.
12. Шевцов, Ю.О. Разработка технологических основ износостойкой электронно-лучевой наплавки в вакууме самофлюсующихся порошковых материалов.- Автореф... к.т.н.- Барнаул, 1994. -193 с.
13. Радченко М.В. Анализ основных технологических параметров комбинированных способов создания защитных покрытий/М.В. Радченко, Т.Б. Радченко, Ю.О. Шевцов, В.С. Киселев, О.И. Хомутов / Ю.С. Борисов, С.В. Петров// Ползуновский вестник, 2011.-№ 2-2. С. 236-243.

*Шевцов Юрий Олегович – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: yuoshevtsov@mail.ru*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

А. Г. Кулагин

*Разработана математическая модель, объединяющая методы энтальпии, эффективной вязкости и объема жидкости для анализа процесса переноса металла в дуговой сварке в защитных газах. Данной моделью описывается влияние на профиль капли силы тока, сил поверхностного натяжения и силы тяжести. Также возможно моделирование неизотермических явлений, таких как теплопередача и изменение фаз. С применением данной математической модели рассматривается форма границ плавления сварочной проволоки, колебания капли на кончике проволоки, характеристика соответствующих физических переменных и их влияние на перенос расплавленного металла. Применение высокоскоростной фотографии, а также лазерно-теневой визуализации и металлографического анализа дают возможность проверить математическую модель. В данной статье даются рекомендации по темам, которые требуют дальнейшего рассмотрения, для построения более точной математической модели переноса металла и самого процесса дуговой сварки в среде защитных газов.*

**Ключевые слова:** Математическая модель, сварка в среде защитных газов, перенос расплавленного металла, капельный перенос без короткого замыкания, струйный перенос, капельный перенос с коротким замыканием, перенос металла в виде паров (брызг), метод объема жидкости, метод энтальпии, метод эффективной вязкости.

Перенос металла в дуговой сварке относится к процессу переноса материала сварочной проволоки в виде капель расплавленной жидкости в сварочную ванну. Перенос металла играет важную роль в стабильности процесса и качестве сварного шва. В зависимости от условий сварки перенос металла может происходить в четырех основных режимах: капельный перенос без короткого замыкания, струйный, капельный перенос с короткими замыканиями дугового промежутка, перенос металла в виде паров (брызг). Поскольку процесс сварки часто сопровождается чрезмерным разбрызгиванием, капельный перенос без короткого замыкания используется только при сварке неотчетливых конструкций. Перенос металла в виде паров, где диаметр капли меньше диаметра проволоки, происходит при среднем и высоком токе. Это очень стабильный и эффективный процесс, широко используемый при сварке толстых стальных пластин и алюминиевых деталей. Короткозамкнутый перенос - это особый режим переноса, при котором расплавленная капля на кончике проволоки непосредственно соприкасается с заготовкой или поверхностью сварочной ванны. Он характери-

зуется многократным прерывистым гашением дуги и повторным зажиганием. Это требует низкого тепловыделения и, следовательно, обычно используется при сварке тонких листов. В связи с широким использованием дуговой сварки в защитных газах в промышленности, было разработано множество моделей для изучения процесса переноса металла [1-14].

Учитывая влияние поверхностного натяжения, силы тяжести и электромагнитной силы, эти модели смогли предсказать частоту переноса металла или форму капли в одном или нескольких режимах переноса. Однако эффекты теплопередачи и изменения фазы в этих моделях игнорировались, и рассматриваемым объектом, была расплавленная капля жидкости, висящая на сплошной проволоке с плоским концом. Фактически, плавление, где поверхность не является ни плоской, ни устойчивой, а эффекты переноса тепла и фазового перехода оказывают существенное влияние на металл, описывают процесс переноса металла и не предсказывают геометрические формы переноса. В результате, эти модели не могут адекватно определить границы раздела плавления, саморегулирование

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

удлинения и образование конуса при более высоком токе.

Новая модель описывает динамическую форму капли и частоту отрыва, предсказывает геометрию границы плавления и неизо-термические процессы. Такие как теплопередача и изменение структуры. С помощью этой модели можно глубоко изучить физику процесса, особенно механизмы отделения кап-пель, образования конусов и капельно-распылительного переноса. Общность алго-ритмов теплопередачи, изменения структур-ной фазы, скорости потока жидкости, дефор-мации поверхности и электромагнитных сил позволяет распространить ее на полную мо-дель сварочного процесса, одновременно моделируя динамику переноса металла и об-разования сварочной ванны. Полная модель предоставит математическую платфор-му для дальнейшего изучения физики сварки, харак-теристик микроструктуры и создания автома-тической системы при управлении сварочным процессом с обратной связью. Из-за ограни-чения длины этой статьи будут представлены только капиллярный и капельно-распылительный перенос.

### Математическая формулировка и численная процедура.

Двумерная осесимметричная система координат используется для моделирования переноса металла в процессе сварки, как показано на рисунке 1, где пунктирная линия указывает вычислительную область. Внутренняя граница области расположена на оси симметрии; верхняя граница прикреплена к нижней поверхности контактного наконечника и проходит через сварочную проволоку; внешние и нижние границы расположены так, чтобы включать в себя полное удлинение проволоки и образование капли в вычислительной области. Отдельная капля изначально включается в вычисления, но стирается, когда приближается к нижней границе. Это упростит алгоритм, поскольку мы сосредоточим наше внимание на физике образования и отрыва капель.

В дополнение к условию симметрии были сделаны следующие упрощения:

(а) Жидкий металл представляет собой несжимаемую ньютоновскую жидкость.

(б) Свойства материала в той же фазе являются постоянными.

(в) Химическая реакция и испарение металла незначительны.

(г) Граничные условия теплового потока и плотности тока назначаются, как представлено ниже

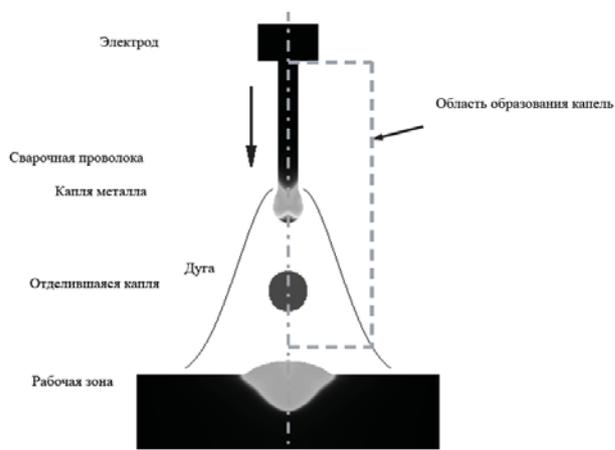


Рисунок 1 – Схема процесса переноса металла

Среди этих упрощений некоторые фак-торы, например, испарение металла и пред-полагаемое граничное условие теплового по-тока могут в большей степени влиять на пе-ренос металла.

(а) Жидкая фаза:

Уравнение неразрывности массы:

$$\nabla * \vec{\vartheta} = 0; \quad (1)$$

Уравнение импульса:

$$\frac{\partial \vec{\vartheta}}{\partial t} + \vec{\vartheta} * \nabla \vec{\vartheta} = -\frac{1}{\rho} P + \vartheta_e (\nabla \vec{\vartheta})^2 - \vec{J} \vec{B} + \vec{g}; \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{\vartheta} * \nabla h = k \nabla^2 T + \frac{\vec{J}_1 * \vec{J}_2}{\sigma}; \quad (3)$$

Уравнение неразрывности:

$$\nabla * (\sigma \nabla V) = 0; \quad (4)$$

Уравнение Максвелла:

$$\oint \vec{B} d\vec{s} = \mu_0 I \quad (5)$$

Закон Ома:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla V; \quad (6)$$

Соотношение энтальпия-температура:

$$\begin{cases} T_m + \frac{n}{c_s}; & (H \leq 0) \\ T_m; & (0 < H < L) \\ T_m + \frac{h-L}{c_1}; & (H \geq L) \end{cases} \quad (7)$$

Эффективная вязкость:

$$v_e = \begin{cases} v; & (T \geq T_m) \\ 10^8 * v & (T < T_m) \end{cases} \quad (8)$$

Где:  $\vartheta$  - скорость жидкости,  $P$  - гидро-динамическое давление,  $J$ -плотность тока,  $B$  - магнитное поле,  $T$  - температура,  $h$  - энталь-пия,  $V$  - напряжение тока,  $I$  – сила тока. Свой-ства материала: плотность  $\rho$ , эффективная вязкость  $\vartheta_e$ , кинематическую вязкость  $\vartheta$ , теп-лопроводность  $k$ , электропроводность  $\sigma$ , тем-пература плавления  $T_m$ , скрытая жара  $L$ , спе-

цифическая жара твердого  $c_s$ , и удельная теплоемкость жидкого  $c_l$ .

Проницаемость свободного пространства  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  и ускорение свободного падения  $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$ .

**Граничные условия.**

Существуют два типа граничных условий. Один находится на границе вычислительной области, а другой - на свободной поверхности. Граничные условия в области конечных разностей показаны на рисунке 2. Верхняя граница представляет собой входное отверстие для проволоки, сила тока и напряжение которых известны. Ось симметрии показана пунктирной линией, где радиальные градиенты физических переменных равны нулю. Как упоминалось ранее, при перемещении расплавленного металла каплями или распылением отделенные капли стираются, когда приближаются к нижней части вычислительной области. Следовательно, никакая жидкость не может достичь нижней и внешней границы. Следовательно, никаких граничных условий в этих местах не требуется. На рисунке 2  $v_{n/p}$  - скорость подачи проволоки,  $R_{\text{пров}}$  - радиус сварочной проволоки, а  $U$  - приложенное напряжение.

Граничные условия на свободной поверхности следующие:

а) нормальное напряжение вызывается поверхностным натяжением:

$$\vec{n} * \underline{\tau} * \vec{n} = -\gamma * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad (8)$$

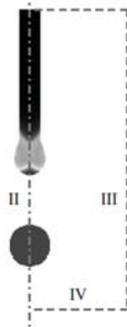


Рис. 2. Граничные условия конечно-разностной области.

Уравнения для зоны I:

$$v_z = \begin{cases} -v_{\frac{\partial n}{\partial z}} & (r \leq R_{\text{пров}}) \\ 0 & (r > R_{\text{пров}}) \end{cases} \quad (9)$$

$$v_r = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$T = T_{\text{пом-я}} \quad (12)$$

Уравнения для зоны оси симметрии II:

$$v_r = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

или

$$-P + 2\mu * \frac{\partial v_n}{\partial n} = -\gamma * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad (17)$$

где  $\tau$  - тензор напряжения,  $n$  - вектор направления нормали,  $n$  - скалярное расстояние вдоль вектора  $n$ ,  $\gamma$  - коэффициент поверхностного натяжения,  $\mu$  - динамическая вязкость ( $\mu = \rho * \nu$ ),  $v_n$  - составляющая скорости в нормальном направлении,  $R_1$  и  $R_2$  - два основных радиуса кривизны.

(б) Касательные напряжения принимаются равными нулю:

$$\vec{n} * \underline{\tau} * \vec{t} = 0 \quad (18)$$

или

$$\mu \left(\frac{\partial v_n}{\partial t} + \frac{\partial \mu_t}{\partial n}\right) = 0 \quad (19)$$

Где  $\vec{t}$  - касательный вектор приложенных напряжений,  $t$  - скалярная величина  $\vec{t}$ , и  $v_t$  скорость вдоль  $\vec{t}$ . Эффект Марангони (напряжение сдвига за счет поверхности градиент натяжения) игнорируется в этой статье по двум причинам:

1. Влияние эффекта Марангони на отрыв капель намного меньше, чем влияние силы Лоренца. В сварочной ванне эффекты Марангони и Лоренца сравнимы (хотя Коу и Сун [19] обнаружили, что сила Лоренца оказывает большее влияние на конвекцию сварочной ванны). Но из-за колоколообразного распределения дуги, плотность тока на капле намного выше, чем на поверхности ванны. Мы знаем, что сила сжатия (горизонтальная сила Лоренца) примерно пропорциональна квадрату плотности тока.

$$F_r = -J_z B_\theta = -J_z \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \approx -J_z^2 \frac{\mu_0 r}{2} \quad (20)$$

Таким образом, сила Лоренца на капле усиливается. Нет, данных показывающих сильную зависимость коэффициента Марангони от плотности тока.

2. Согласно Кобину и Бургеру [21] и Немчинскому [22, 23], самая высокая температура на поверхности капель находится вблизи или выше точки кипения, и на поверхности происходит сильное испарение. Следовательно, измерение и моделирование эффекта Марангони очень сложны.

(в) Плотность тока на поверхности аппроксимируется выражением функция, линейная по осевой составляющей  $z$ .

$$J_n(z) = \frac{I * z}{\int z * dA} \quad (21)$$

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

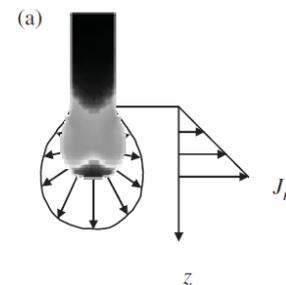
где  $I$  - сварочный ток,  $dA$  - площадь локальной поверхности, а  $z$  - вертикальное расстояние, измеренное от точки плавления на поверхности проволоки до местоположения  $dA$ , как показано на рис. 3 (а). С помощью этой функции мы видим, что ток не покидает сварочную проволоку из точек выше температуры плавления как предложено и протестировано Чой. [12] Обнаружено, что предсказанные результаты с этой функцией подтверждались экспериментально.

(г) Тепловой поток вокруг расплавленной капли и сварочной проволоки является сложным. Простой способ приблизить распределение теплового потока - использовать линейную функцию, аналогичную распределению плотности тока. Однако эта функция устранил весь теплообмен на нерасплавленной части сварочной проволоки. Поскольку температура дуги может достигать 20 000 К, дуга нагревает расплавленную каплю, прежде чем она достигнет границы плавления. Подвод тепла как важный фактор в переносе металла или теплопередаче, а также для расплавления сварочной проволоки при повышенной температуре рассматривался многими исследователями [24-26]. Мы обнаружим, что, как будет показано позже, пренебрежение подводом тепла к нерасплавленной проволоке приведет к плохому моделированию образованию конуса при высоком сварочном токе и относительно большим расхождениям в прогнозируемой частоте переноса металла. Тепловой поток на нерасплавленной проволоке, мы представляем линейной функцией, чтобы поток был несколько больше, чтобы включить часть нерасплавленной проволоки в начальную точку, расположенную на небольшом расстоянии  $\Delta z$  над зоной плавления. Чтобы сохранить математическую простоту, мы упрощаем тепловой поток, но рассмотрим степень нагрева поверхности проволоки. Другими словами, мы используем линейную функцию, распределение теплового потока на поверхности:

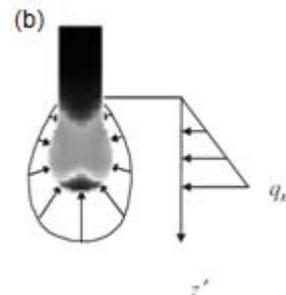
$$q_n(z') = \frac{nn_d U I z'}{\int z \cdot dA} \quad (22)$$

где  $U$  - напряжение дуги,  $n$  - КПД дуги или отношение тепла, поглощенного расплавленным металлом, к теплу, генерируемому дугой,  $n_d$  - отношение тепла, поглощенного каплей, к общему количеству тепла, поглощенного расплавленным металлом. и  $z'$  - вертикальное расстояние, измеренное от начала координат, расположенного на небольшом расстоянии,  $\Delta z$ , выше точки плавления на поверхности проволоки, или  $z' = z + \Delta z$ , как показано на

рисунке 3 (b). Для большей части вычислений в этой статье выбран  $\Delta z = R_{\text{пров}} / 2$ , так как обсуждение показывает, что данное условие дает хороший прогноз как геометрии поверхности плавления, так и переноса расплавленного металла. Согласно Гронгу [27].  $n \approx 0,7$  в механизированной сварке в защитных газах; и согласно Ван и Цай [18],  $n_d \approx 0,3$ .



Распределение плотности тока



Распределение теплового потока

Рисунок 3 – Граничные условия для плотности тока и теплового потока на свободная поверхность:

- а) источник распределения плотности тока находится в точке плавления на поверхности проволоки;
- б) происхождение распределение теплового потока находится на небольшом расстоянии,  $\Delta z$  выше, чем точка плавления так, что передача тепла на нерасплавленной проволоки входит в расчет

### Вычисления.

Численная процедура проводилась методом дискретизации определяющих уравнений и граничных условий. Используется равномерная сетка с ячейками размером 36 x 400 пунктов, поскольку неоднородные сетки не дают особых преимуществ, они значительно увеличивают сложность модели и время вычислений. Радиус сварочной проволоки покрывается 12 ячейками, а время приращения составляет  $5 \times 10^{-6}$ с. Данные значения выбраны потому, что дальнейшее разделение размера ячейки и приращения по времени не привело к значительному повышению точности. Сварочная проволока изна-

чально имеет комнатную температуру и полусферический наконечник, температура которого совпадает с температурой плавления проволоки. По мере продолжения вычислений на каждом временном шаге выполняются следующие операции:

- a) решение уравнений непрерывности массы и импульса.
- b) использование метода объема жидкости для определения положения и формы свободной поверхности.
- c) расчет уклона, радиусов кривизны и поверхности натяжения свободной поверхности.
- d) определение плотности тока и распределения теплового потока на свободной поверхности.
- e) решение уравнения неразрывности тока.
- f) решение уравнения энергии для энтальпии и температуры.
- g) получение результатов и переход к следующему этапу.

Когда капля отсоединяется от кончика проволоки, ее объем и время отрыва регистрируются. Частота переноса металла затем рассчитывается на основе усредненного времени отрыва. Первые несколько капель, исключаются из расчета, поскольку их результаты в значительной степени зависят от предполагаемых начальных условий.

### Результаты и обсуждение

Моделирование было выполнено для сварочной проволоки из мягкой стали диаметром 1,6 мм, свойства материала перечислены в таблице 1. Предсказанные результаты частоты переноса металла и геометрии поверхности плавления сравнивались с экспериментами. Анализ, основанный на численной модели, был сделан для изучения физики переноса металла, а также характеристик соответствующих физических переменных и механизмов формирования конусности и капельно-распылительного перехода.

Таблица 1 – Физические свойства сварочных материалов

Плотность, $\rho$	6250 kg/m <sup>3</sup>	[11]
Кинематическая вязкость, $\nu$	$2.8 \times 10^{-7}$ m <sup>2</sup> /s	[12]
Температура плавления, $T_m$	1723K	[16]
Внутреннее тепло, L	$2.5 \times 10^5$ J/kg	[16]
Удельная теплоемкость твердого тела, $c_s$	700 J/(kg K)	[18]

Продолжение таблицы 1

Удельная теплоемкость жидкости, $c_l$	780 J/(kg K)	[18]
Коэффициент поверхностного натяжения, $\gamma$	1.2Nm <sup>-1</sup>	[11]
Электропроводность, $\sigma$	$8.54 \times 10^5$ ( $\Omega$ m) <sup>-1</sup>	[12]

### Динамические изменения профиля капли, границы раздела расплава и потока жидкой фазы.

На рисунках 4 и 5 показаны смоделированные профили капли, границы раздела расплава и поля скоростей в капельном переносе и переносе распылением, соответственно. В целях иллюстрации на каждом рисунке показан только один период передачи и используются нерегулярные интервалы времени. На рис.4 ток составляет 175 А, а прогнозируемая частота передачи составляет 5 капель в секунду; на рис. 5 ток равен 350 А, а прогнозируемая частота передачи составляет 320 капель в секунду.

На рисунках 4 и 5 также показано, что граница плавления сварочной проволоки не является плоской, и она взаимодействует с потоком расплавленного металла в капле. Поток жидкого металла влияет на форму границы раздела посредством конвекции тепла. Поскольку сварочная проволока плавится в результате резистивного нагрева и анодных реакций, и, в некоторой степени, также в результате дугового нагрева, поверхность проволоки, которая непосредственно подвергается воздействию дуги, имеет тенденцию плавиться быстрее, чем внутренний металл. Следовательно, поверхность плавления имеет выпуклую форму. Однако вблизи конечной стадии отрыва капли может возникнуть локальное углубление в центре границы раздела плавления из-за восходящего потока расплавленного металла, вызванного несбалансированным поверхностным натяжением. Когда это происходит, поверхность плавления приобретает форму кратера, как показано на последнем графике на рисунке 4. Это положение в форме кратера длится несколько миллисекунд в каждом периоде переноса.

Металлографические эксперименты были проведены для проверки формы плавящейся ванны. На рис. 6 показаны типичные изображения поперечного сечения под микроскопом. Подобно поперечному сечению сварного шва, расплавленный, но затвердевший металл имеет микроструктуру, отличную от нерасплавленного металла. Изоб-

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

ражения доказывают, что поверхность плавления в большинстве случаев была не плоской, а выпуклой.

Когда капля отсоединяется, сильно деформированная поверхность создает большое поверхностное натяжение жидкого металла, которая остается на конце проволоки. Несбалансированное поверхностное натяжение вызывает откат и колебания жидкости. На рисунке 7 показана эволюция профиля поверхности и поля скоростей из-за отдачи и колебаний. Когда оставшаяся жидкость колеблется, оторвавшаяся капля также меняет форму, как показано на рисунке 8. Сразу после отрыва отскок жидкости вблизи точка разрыва создает небольшое углубление на поверхности.

По мере того как вдавливание быстро восстанавливается, капля также деформируется и колеблется в осевом направлении. Колебание затухает в течение нескольких миллисекунд из-за вязкого демпфирования. После этого капля продолжает перемещаться в сварочную ванну с относительно постоянной формой.

### Характеристики физических переменных и их роли в переносе металла

Перенос металла зависит от ряда физических переменных, включая температуру, плотность тока, электрический потенциал, магнитное поле, электромагнитная сила и давление.

На рис. 9 показано распределение переменных при росте капли при силе тока 175 А. На графике температуры, прогнозируются V-образные или U-образные изотермические контуры. Высокая температура расположена в нижней части и около поверхности

капли. Это вызвано концентрированным нагревом на анодном пятне и характером конвекции внутри капельки. Под непрерывным нагревом от сварочной дуги, температура поверхности капли достигнет температуры кипения и металл начнет испаряться. Поскольку охлаждающее действие испарения металла игнорируется в настоящей модели, предсказанная температура на поверхности капли может быть выше точки кипения. Это говорит о том, что испарение металла заслуживает дальнейшего рассмотрения в ходе будущих разработок более точной модели переноса металла. На графике скорости, жидкий металл около оси капли движется вниз от корня капли и завихряется вверх вдоль течения свободной поверхности. На графике плотности тока большая часть тока течет вниз и параллельна оси симметрии, но существует небольшое расхождение вблизи поверхности капли. Электрический потенциал или напряжение, имеет почти одномерное распределение. Поскольку течение тока направлена вдоль оси, напряжение также падает в этом направлении. На графике магнитного поля, центр капли имеет низкое значение, а поверхность, особенно область, близкая к корню капли, имеет высокое значение. Сила Лоренца, также достигает максимального значения на поверхности у корня капли, и имеет относительно низкое значение в центре капли. Это объясняет, почему образование шейки капли происходит вблизи корня капли. На графике давления, локальное давление вблизи поверхности зависит от кривизны поверхности.

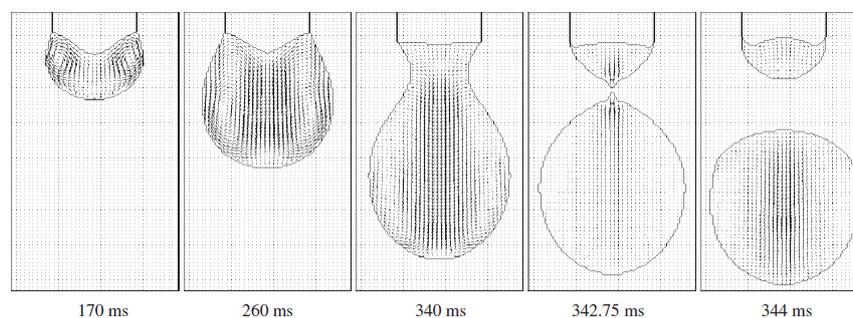


Рисунок 4 – Предсказанный профиль капли (проволока 1.6 мм, 175 А, 22В, 95 imp или 0.0402 m/s, аргон)

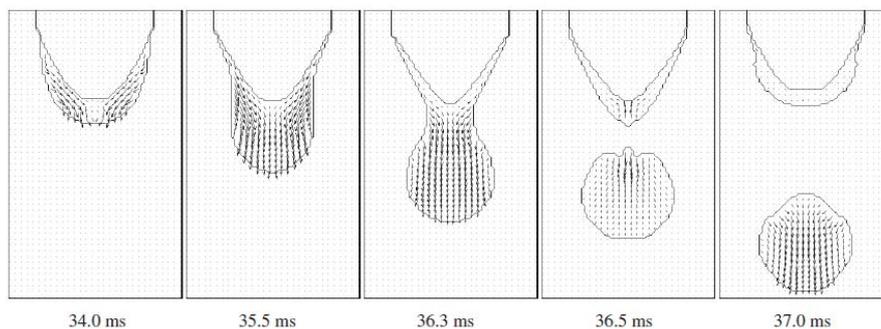
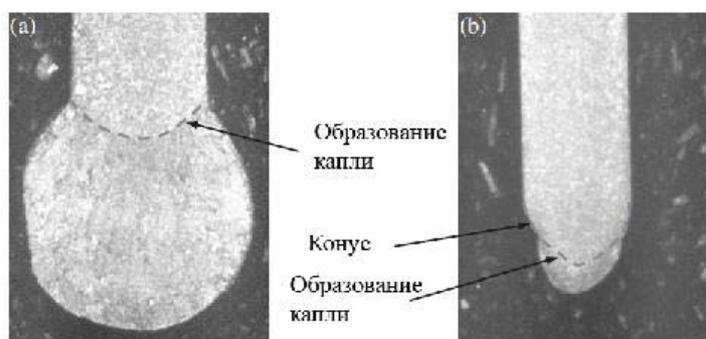


Рисунок 5 – Предсказанный профиль капельки, плавя интерфейс, и поле скорости в режиме передачи брызг (провод 1.6мм, 350А, 30.5В, 218 имр или 0.0925 м/с, аргон)



Капля в капельном переносе

Капля в переносе распылением

Рисунок 6 – Металлографические изображения криволинейной поверхности плавления при проволочный наконечник

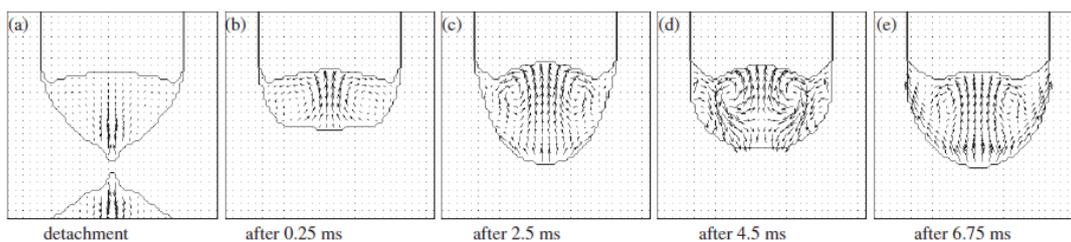


Рисунок 7 – Жидкое колебание на кончике проволоки после отрыва капли (175 А)

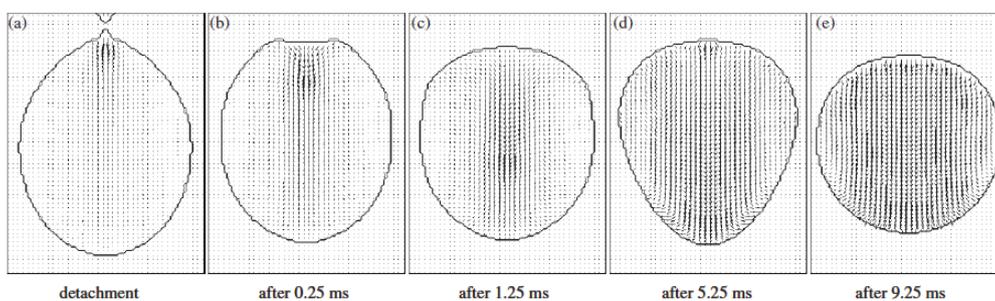


Рисунок 8 – Форма капли после отрыва (175 А)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

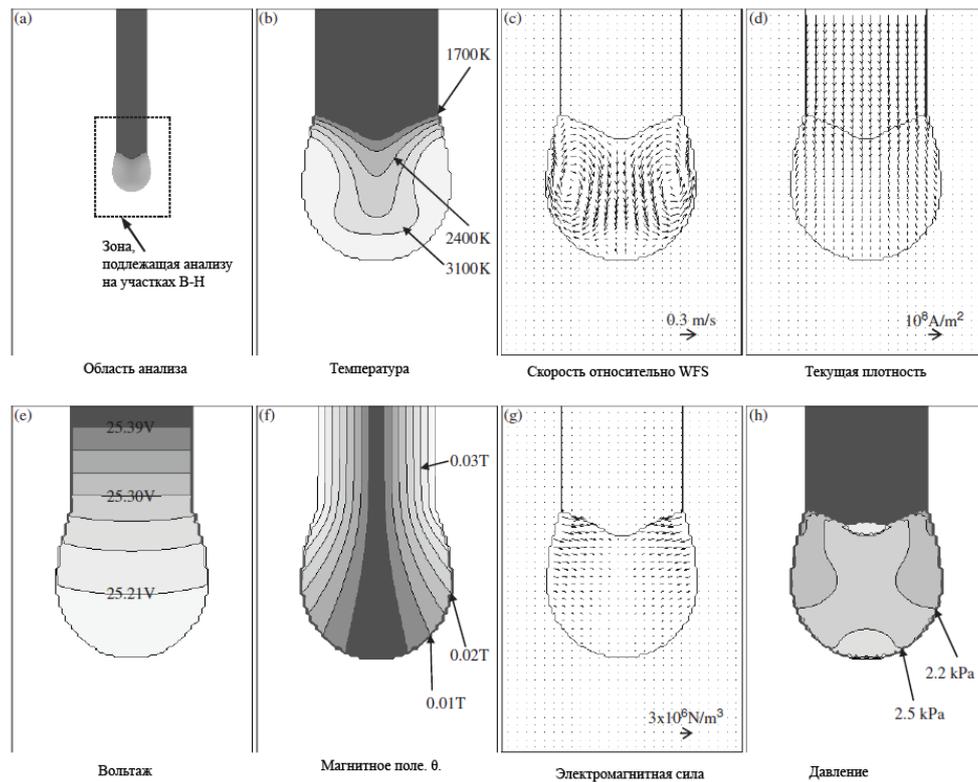


Рисунок 9 – Распределение физических переменных во время роста капли (175 А)

На рис. 10 показано распределение этих переменных в момент отделения. На температурном графике самая высокая температура по-прежнему находится в нижней части капли и вблизи поверхности капли. Температура в центре шейки капли умеренная. Эпюра скорости движения жидкости в шее капли имеет высокую скорость в направлении от проволоки к поверхности, а жидкость выше шейки капли циркулирует вверх, вблизи оси симметрии и вниз по течению вблизи поверхности капли. Центр шейки – точка застоя скорости циркуляции жидкости. В горизонтальном направлении относительно данной точки жидкость движется к центру, а затем идет либо вниз, либо вверх. На графике плотности тока ток на конце проволоки

сначала сходится к шейке капли, а затем расходится после прохождения через данную точку. Плотность тока в центре шейки более чем в 50 раз выше, чем плотность тока в проволоке. Из-за высокой концентрации плотности тока и значительно повышенного электрического сопротивления, падение напряжения на шейке капли значительно больше. Несмотря на физическую связь, разница потенциалов между границей раздела твердое тело-жидкость и центром капли может достигать нескольких вольт в момент перед разрывом. Высокая плотность тока на шейке также создает высокое магнитное поле и большую электромагнитную силу.

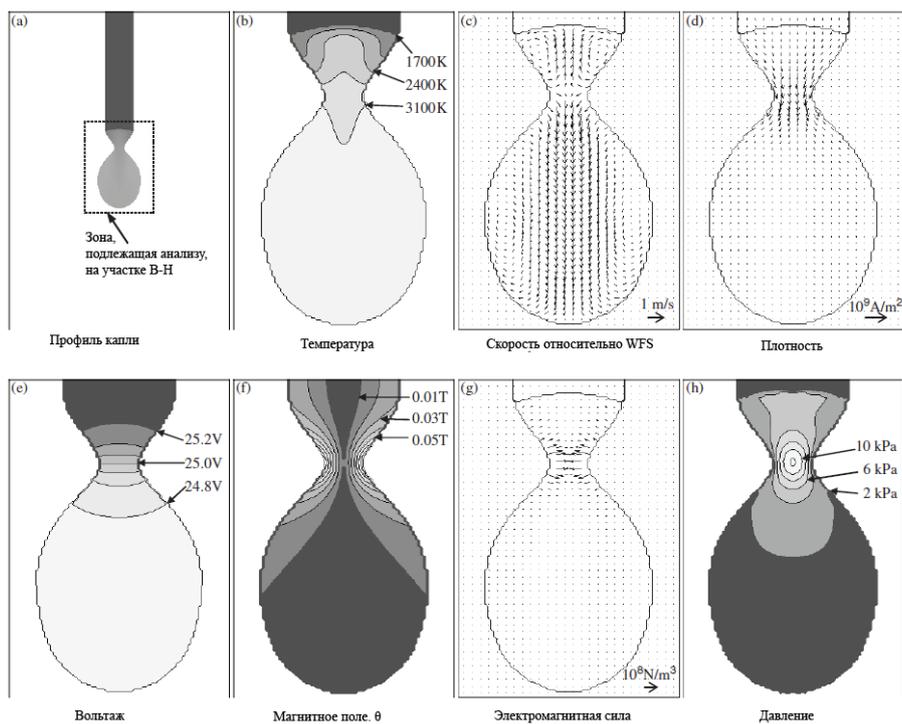


Рисунок 10 – Распределение физических переменных перед отрывом капли (175 А)

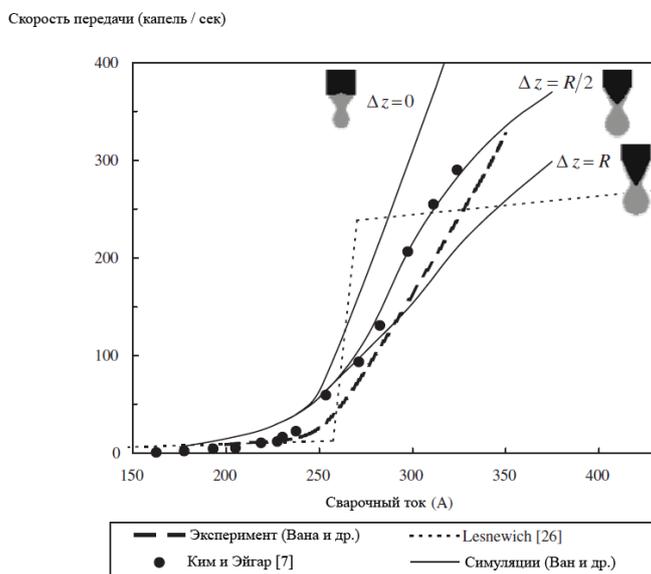


Рисунок 11 – Сравнение результатов моделирования и эксперимент

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

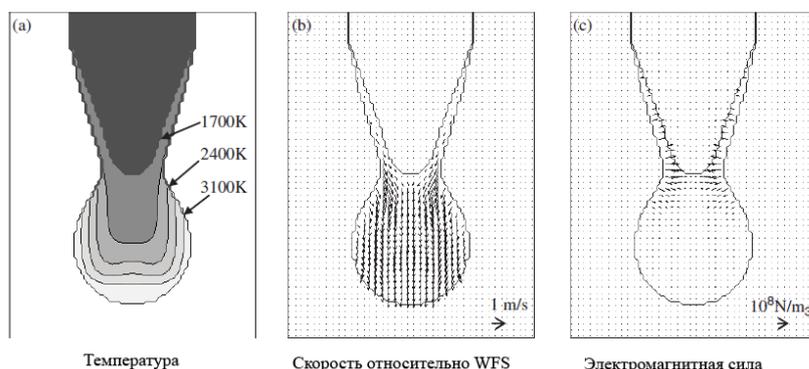


Рисунок 12 – Формирование конуса на конце проволоки при переносе расплывлением (350 А). Тонкий слой расплавленного металла движется вдоль наклонной границы плавления

Максимальное значение электромагнитной силы более чем в  $10^4$  раз превышает значение силы тяжести. В результате большой электромагнитной силы и силы поверхностного натяжения из-за локальной кривизны давление достигает пикового значения в центре шейки капли. Это вызывает выдавливание жидкости из шейки и, таким образом, ускоряет процесс отрыва капли.

### Механизм конусообразования и капельного распыления.

Переход от капельного переноса жидкого металла к переносу расплывлением является важной темой электродуговой сварки в среде защитных газов. Однако есть два дифференциальных наблюдения этого явления. Долгое время общепринятое наблюдение, совершенное в 1958 г. Лесневичем [28], который описал переход как резкое изменение тока в очень узком диапазоне 10 А, как показано тонкой пунктирной линией на рис. 11 Но в 1993 году Ким и Эйгар [7] обнаружили, что переход гораздо более плавный, чем было принято считать. Их результаты показаны на рисунке 11 в виде черных точек. Поскольку существуют различные описания этого явления, существуют также различные объяснения механизма, который вызывает переход от капиллярного переноса металла к переносу металла расплывлением. Основное различие этих объяснений связано с ролью конусообразного образования. Аллум [5] рассматривал образование конуса как важный фактор в данном переходе, поскольку он уменьшает эффективный диаметр жидкости и ускоряет отрыв капли. Тем не менее, Чой [12], предсказал данное явление без явного моделирования уменьшения диаметра проволоки, вызванного конусностью. Другими словами, он полагал, что причиной была повышенная электромагнитная сила из-за более высокого

тока, а результатом было образование как конуса, так и капиллярно-распылительного перехода. Мы провели эксперименты по наблюдению переноса металла с использованием высокоскоростного анализатора движения и метода визуализации лазерных теней [29]. Частота переноса металла рассчитывается путем подсчета количества оторвавшихся капель в единицу времени, результат показан на рисунке 11 жирной пунктирной линией. Сравнение между этой кривой и двумя кривыми, упомянутыми ранее, показывает, что наше наблюдение ближе к результату Кима и Эйгара, то есть, капиллярно-распылительный переход является постепенным, а не внезапным процессом. Как будет показано позже, вывод о постепенном переходе капле-брызги подтверждается математическим моделированием.

На рисунке 11 также показаны три кривые моделирования, каждая из которых имеет различное значение  $z$ , указывающее степень охвата тепловым потоком (см. Рисунок 3). Когда ток ниже 250 А (капиллярный перенос), прогнозируемая частота переноса металла не зависит от  $z$ . Но когда ток выше 250 А,  $z = 0$  дает более высокие частоты передачи, чем измеренные значения, а  $z = R$  дает более низкие частоты, чем измеренные значения, где  $R$  - радиус сварочной проволоки. Когда  $z = R / 2$ , предсказанная частотная кривая очень хорошо согласуется с нашими экспериментами и экспериментами, проведенными Кимом и Эйгаром. Следовательно, мы используем  $z = R / 2$  в большинстве наших расчетов в этой статье. Наряду с тремя кривыми моделирования также представлены изображения моделируемых профилей капель и геометрии кончиков проволоки. Экспериментальное наблюдение показывает, что при высоком уровне тока на кончике проволоки образуется конус. Но если мы смоделиру-

ем процесс с  $z = 0$ , или если мы полностью проигнорируем подвод тепла на расплавленной проволоке, никакой конусности предсказать невозможно. Напротив, если мы используем  $z = R / 2$  или  $z = R$ , моделируется конусность. Это означает, что тепловой баланс на расплавленной сварочной проволоке играет важную роль в формировании конусности. Это может быть видно из рисунка 12, показывающего геометрию кончика проволоки, а также распределение температуры, скорости и электромагнитной силы в капле при формировании конуса. Подвод тепла к нерасплавленной части проволоки предварительно нагревает поверхность проволоки до повышенной температуры, так что поверхность проволоки имеет тенденцию плавиться быстрее, чем внутренний металл. Когда ток увеличивается, высота выпуклой границы плавления также увеличивается. Повышенная электромагнитная сила сжимает расплавленную жидкость и заставляет ее двигаться по наклонной поверхности к нижней части кончика проволоки. из-за течения жидкого металла по наклонной поверхности на поверхности образуется тонкий слой жидкости. Этот тонкий жидкий слой позволяет теплу дуги проникать так, что плавление происходит в направлении, перпендикулярном наклонной поверхности проволоки. Рисунок 12 также показывает, что образование конуса отличается от образования шейки столба расплавленного металла. Для образования шейки столба расплавленного металла диаметр расплава уменьшается из-за внешних сил. Но для формирования конуса сплошная проволока сначала становится конусообразной, а расплав движется вдоль конического сердечника и уменьшается по внешнему диаметру. Хотя на рисунке 11 конус не прогнозируется, когда  $z = 0$ , частотная кривая демонстрирует быстрое увеличение, когда ток выше 250 А. Это означает, что переход от капиллярного переноса металла к переносу металла в виде паров-брызг не вызван образованием конуса, а увеличением электромагнитной силой. Тем не менее, на рисунке 11 показано, что образование конуса влияет на переход от капиллярного

переноса металла к переносу металла в виде паров, изменяя наклон кривой частоты. Мы обнаружили, что существование конусности не ускоряет перенос металла, а скорее замедляет данный процесс и снижает частоту переноса. Когда конус не образуется, большая часть тока проходит через шейку капли и генерирует большую электромагнитную силу. Расположение шейки близко к поперечному сечению, которое передает максимальный ток. Но когда образуется длинный конус, часть тока покидает поверхность капли до того, как она достигает места образования шейки, следовательно, электромагнитная сила на шейке уменьшается, и процесс отсоединения замедляется.

### **Генерация спутниковых капель.**

При отсоединении капли тонкий жидкий мостик, соединяющий каплю и конец проволоки, также может отделиться и эволюционировать в одну или несколько крошечных капель. Эти капли известны как спутниковые капли. В дуговой сварке в среде защитных газов объем падения спутника составляет около 1% от всего объема падающих капель, это можно наблюдать с помощью высокоскоростной камеры. На рисунке 13 показан пример формирования спутника [30]. С более мелкой сеткой формирование спутника также можно моделировать с помощью числовой модели, разработанной в этой статье, как показано на рисунке 14. Генерация капель спутника является не желательным явлением, так как маленькие капли могут прилипнуть к заготовке или газовому соплу. Управление формированием спутника требует дальнейшего понимания данного механизма. Эмпирические формулы, основанные на безразмерных числах, были получены для предсказания образования спутника в каплях воды [31]. В то время как аналогичные процедуры могут быть использованы для получения эмпирических уравнений для дуговой сварки в среде защитных газов, численное моделирование может также использоваться для прогнозирования образования спутниковых капель.

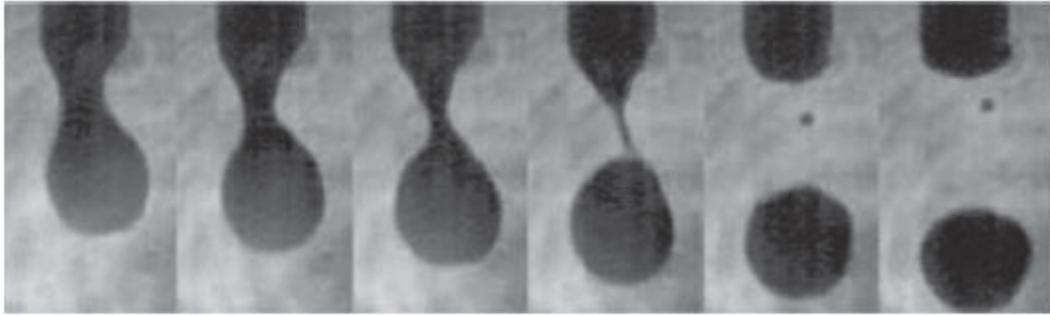


Рисунок 13 – Формирование спутниковой капли (источник: Джонс 1998 [30])

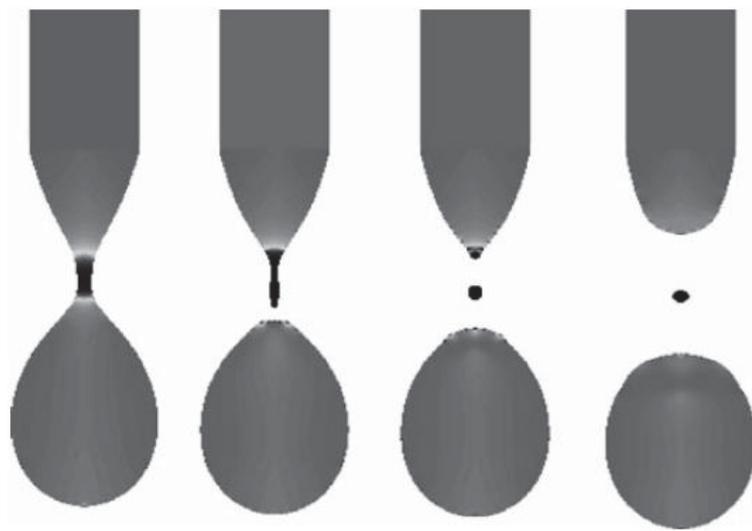


Рисунок 14 – Моделирование формирования спутника

### Выводы

1. Разработана неизотермическая численная модель для моделирования процесса переноса металла в процессе сварки. Эксперименты с высокоскоростной фотографией, лазерно-теневого визуализацией и металлографическим анализом показывают, что результаты моделирования находятся в широком соответствии с фактическим процессом сварки. Модель также может быть легко распространена на сварочную ванну, так что можно разработать единую систему моделирования для описания всего процесса сварки.

2. Используя численную модель для изучения физики переноса металла, мы обнаружили, что образование конуса при более высоком сварочном токе тесно связано с подводом тепла к нерасплавленной части сварочной проволоки; Переход от капиллярного переноса металла к переносу металла в виде паров-брызг происходит в основном из-за увеличения тока и силы электромагнитного сжатия, образование конуса влияет на этот переход, замедляя процесс переноса; Гео-

метрия поверхности плавления сварочной проволоки испытывает динамические изменения в течение периода переноса металла и взаимодействует с потоком жидкости в капле; Перед отрывом капли центр шейки капли испытывает большую плотность тока, магнитное поле, электромагнитную силу и гидродинамическое давление; После отрыва капли неуравновешенное поверхностное натяжение вызывает откат оставшейся жидкости и колебания на конце проволоки; Спутниковые капли могут генерироваться после отделения первичных капель.

3. Дальнейшее улучшение модели может быть достигнуто путем интеграции следующих эффектов: (а) испарение металла на поверхности капли; (б) модель плазмы, которая вычисляет, электрические и тепловые потоки; (с) эффект Марангони и эффекты сопротивления на поверхности капель.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Lancaster J F 1986 Физика сварки 2-е изд (Нью-Йорк: Пергамон)
2. Greene W J 1960 Анализ дугового переноса в сварке в защитных газах. Пер. AIEE Часть II 79 194–203
3. Amson J C 1962 Анализ системы дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов Br. Weld. J. 41 232–49
4. Allum C J 1985 Перенос металла при дуговой сварке как нестабильность: I. Неустойчивость в токонесящем жидком цилиндре с поверхностным зарядом J. Phys. D: Appl. Phys. 18 1431–46
5. Allum C J 1985 Перенос металла при дуговой сварке как нестабильность: II. Разработка модели для дуговой сварки J. Phys. D: Appl. Phys. 18 1447–68
6. Маруо Н, Хирата Y и Гото N 1992 Феномен преодоления переноса проводящей капли- влияние силы электромагнитного поля на перенос по мосту. J. Japan Weld. Soc. 10 43–50
7. Kim Y S и Eagar TW 1993 Анализ переноса металла в сварке Weld. J. 72 269-e-78-e
8. Немчинский В А 1994 Размер и форма капли расплавленного металла на расплавленном наконечнике дугового электрода J. Phys. D: Appl. Phys. 27 1433–42
9. Simpson S W и Zhu P 1995 г. Образование расплавленных капель на аноде в сварочной дуге J. Phys. D: Appl. Phys. 28 1594–600
10. Hirata Y, Osamura T, Goto N и Ohji T 1997 Математическая модель процесса передачи с коротким замыканием в сварке Proc. 7th Int. Conf. on Computer Technology in Welding (San Francisco, California, 8–11 July 1997)
11. Jones L A, Eagar T W и Lang J H 1998. Динамическая модель отрыва капель от электрода для дуговой сварки в среде защитных газов J. Phys. D: Appl. Phys. 31 107–23
12. Choi B K, Yoo C D и Kim Y S 1998 Моделирование динамики переноса металла - Часть 1: капиллярный и распылительные режимы переноса металла. J. 77 38-e-44-e
13. Choi B K, Ko S H, Yoo C D и Kim Y S 1998. Динамическое моделирование переноса металла - часть 2: режим короткозамкнутого переноса, сварка. J. 77 45-e-51-e
14. Zhang Y M и Liguo E 2000. Численный анализ динамического роста капель при дуговой сварке. Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci. 214 1247–58
15. Haidar J и Lowke J J 1996. Прогнозы образования капель металла при дуговой сварке J. Phys. D: Appl. Phys. 29 2951–60
16. Fan H G и Kovacevic R. 1998 Динамический анализ капельного переноса металла при дуговой сварке - сравнение численных и экспериментальных результатов J. Phys. D: Appl. Phys. 31 2929–41
17. Fan H G и Kovacevic R 1999 Образование капель, отслоение и удары по расплавленной ванне при дуговой сварке Mater. Trans. B-Process Metall. Mater. Process. Sci. 30 791–801.
18. Wang Y и Tsai HL 2001 Удар капель наполнителя и динамика сварочной ванны в процессе дуговой сварки Int. J. Тепломассообмен 44 2067–80
19. Kou S и Sun D K 1985 Поток жидкости и проплавление при дуговой сварке. Trans. A 16 203–13
20. Hirt C W и Nichols B D 1981 Метод объема жидкости (VOF) для динамики свободных границ J. Comput. Phys. 39 201–25
21. Cobine J D и Burger E E 1955 Анализ электродных явлений в сварочной дуге J. Appl. Phys. 26 895–900
22. Немчинский В.А. 1997 Теплообмен в капле жидкости, висящей на конце электрода при дуговой сварке. J. Phys. D: Appl. Phys. 30 1120–4
23. Немчинский В.А. Испарение электродов в дуге с импульсным током J. Phys. D: Appl. Phys. 30 2895–9
24. Kim Y S и Eagar T 1989 Распределение температуры и энергетический баланс во время электродуговой сварки в среде защитных газов. Последние тенденции в науке и технике сварки: Учеб. 2-я Международная конференция «Тенденции в исследованиях сварки» (Gatlinburg, Tennessee, 14–18 May 1989) ed S A David and J M Vitek (Ohio: Materials Park) pp 13–18.
25. Jonsson P G, Eagar T W и Szekely J 1995 Перенос тепла и металла при дуговой сварке с использованием аргона и гелия. Mater. Trans. B 26 383–95
26. Zhu P, Rados M и Simpson S W. 1997 Теоретические предсказания пусковой фазы при сварке Weld. J. 76 269-e-74-e
27. Grong O. 1997 Металлургическое моделирование сварки (London: The Institute of Materials)
28. Lesnewich A 1958 Контроль скорости плавления и переноса металла при дуговой сварке в защитных газах: часть II - контроль переноса металла Weld. J. 37 418-s–25-s
29. Rhee S и Kannatey-Asibu E 1992 г. Наблюдение переноса металла при дуговой сварке Weld. J. 72 381-s – 5-s
30. Jones L A, Eagar T W и Lang J H 1998 Магнитные силы, действующие на расплавленные капли при дуговой сварке J. Phys. D: Appl. Phys. 31 93–106
31. Zhang X 1999 Динамика роста и распада подвесных капель в воздухе J. Colloid Interface Sci. 212 107–22

*Кулагин Александр Геннадьевич – магистр техники и технологии машиностроения, выпускник ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия; Инженер-технолог, Бюро Сварки ООО "Сибэнергомаш - БКЗ"*

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А. Г. Кулагин

Раскрыта проблема эрозийного повреждения рабочих лопаток, как один из основных вопросов эксплуатации паровых турбин. В статье описаны основные моменты генерации электроэнергии на тепловых электростанциях. Применение традиционных решений ремонта паровых турбин заменой изношенных рабочих лопаток. Предложен инновационный метод плакирования рабочих лопаток «на месте», с применением лазерных технологий, который позволяет производить восстановительный ремонт изношенных частей лопаток без их демонтажа. Благодаря гибкой настройке лазера подвод энергии сводится к минимально необходимым значениям, что позволяет избежать перегрева кромок и уменьшить деформации формы лопатки. Применение компактной подающей коаксиальной лазерной головки, связанной с полупроводниковым лазером гибкой оптоволоконной передающей линией способствует равномерной подаче порошка под любым углом, что открывает возможности применения в условиях монтажных работ. Питатель порошком Sulzer Metco позволяет точно подавать порошок стеллита-6 в зону лазерного пятна, обеспечивая оптимальное сплавление основного и наплавляемого металла. Стеллит-6 является сверхтвердым сплавом на основе кобальта и хрома, использующийся в качестве стеллитовой наплавки. При традиционном методе нанесения стеллитовой защиты наплавка присоединяется к лопатке с применением серебряной пайки.

**Ключевые слова:** ремонт лопаток; паровые турбины; плакирование лазером; эрозия; входные кромки лопаток; выходные кромки лопаток; восстановление лопаток; стеллит-6; эрозийный износ; деформация лопаток.

При традиционном методе генерации электроэнергии на тепловых электростанциях (ТЭС), работающих на органическом топливе, выработанный в энергетическом котле перегретый пар поступает в турбину, где его внутренняя энергия используется для вращения вала турбины, соединенного с генератором. Перегретый пар не содержит влаги и не причиняет механических повреждений лопаткам. В типовой паротурбинной установке высоких параметров свежий пар поступает в цилиндр высокого давления (ЦВД), с температурой 545 °С и давлением 16,5 МПа. Частично отработанный пар поступает в цилиндр среднего давления турбины с параметрами 545°С и 4,5 МПа, а после него – на вход цилиндра низкого давления (ЦНД). К этому моменту температура пара снижается до 215°С. Давление на выходе турбины падает до 5-7 кПа, при этом давлении отработанный пар сбрасывается в конденсатор [1].

Давление пара на выходе турбины может быть достаточно низким для начала образования мелких капель влаги. Это зависит от конструкции турбины и соотношения

температуры и давления на выходе, а также режимов эксплуатации. Для турбины частицы влаги могут быть причиной эрозии входных кромок лопаток последней или двух последних ступеней ЦНД. В ЦНД пар обычно подводится к середине цилиндра и противотоком (разделяясь на два противоположно направленных потока) движется к выхлопам, что обуславливает дублирование ступеней цилиндра [1].

Одной из важных проблем эксплуатации паровых турбин является повреждение входных кромок рабочих лопаток ступеней низкого давления в результате капельной эрозии. Несмотря на применение различных способов снижения эрозийного износа, актуальность этой проблемы со временем только возрастает. Эрозийный износ рабочих лопаток ступеней низкого давления остается главной причиной, ограничения их ресурса, и одной из основных снижающих надежность и экономичность паровых турбин. [2]

Традиционным решением является замена изношенных рабочих лопаток. Однако, очевидно, неразумно заменять очень до-

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

рогостоящее изделие новым только потому, что на трети его длины образовались узкие поврежденные участки, в то время как вся рабочая лопатка находится в хорошем состоянии. [2]

На рисунке 1, 2 показана схема износа рабочих лопаток паровой турбины. После 10-12 лет эксплуатации возникает необходимость их замены по причине уменьшения хорды пера, не допустимого по технологическим условиям – на отдельных рабочих лопатках оно достигает 7-11 мм. На этой стадии эрозионные повреждения имеют глубину до 3 мм на ширине до 30 мм от входной кромки и на длине до 450 мм от периферийного конца рабочей лопатки. Достаточно обширные, но неглубокие повреждения по входной («губчатый» износ) и по выходной кромке практически не снижают экономичности и надежности рабочей лопатки [4].

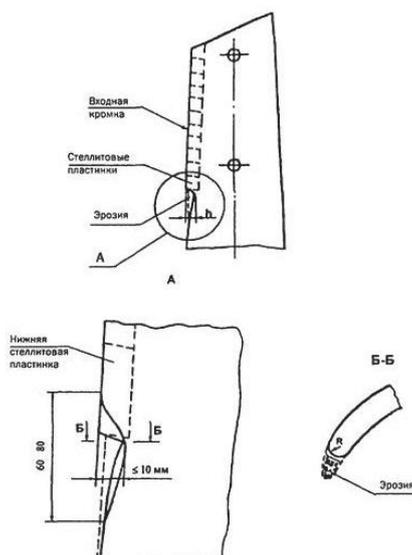


Рисунок 1 – Эрозия входной кромки лопатки ниже стеллитовых пластин (для К-300-240-1 АО «ЛМЗ»)

Традиционный материал для изготовления лопаток паровой турбины – нержавеющая мартенситная сталь UNS 42000. Её типичные механические характеристики: предел текучести – 345 МПа, предел прочности на разрыв – 650 МПа и растяжение на отрыв – 25%. Проблема эрозии, вызываемая частицами влаги, известна давно. Производители турбин вынуждены решать её защитой зон лопаток, подверженных эрозии. Из всех опробованных материалов наиболее удачным является стеллит-6 – сверхтвёрдый сплав на основе кобальта и хрома с содержанием 28% хрома (Cr), 4,5% вольфрама (W), 1,2% угле-

рода (C), 1% марганца (Mn), 3% никеля (Ni), и 3% железа (Fe). Часто он используется в качестве щитка (стеллитовой наплавки), присоединяемого к лопатке серебряной пайкой. Такая защита продлевает срок эксплуатации лопаток, но сама наплавка всё равно подвергается эрозии (рисунок 3), поэтому приходится менять лопатки или устанавливать новую защиту. По традиционным методам, в обоих случаях, для ремонта требуется извлечение лопаток из вала. [5].



Рисунок 2 - Эрозионный износ ступени № 25 турбины Т-185/220-130-2. Кировской ТЭЦ-5 (вид с вогнутой стороны пера)

Известные в настоящее время технологии восстановления рабочих лопаток с поврежденными кромками используют сварочные методы. В общем виде они укладываются в схему, показанную на рисунке 4.

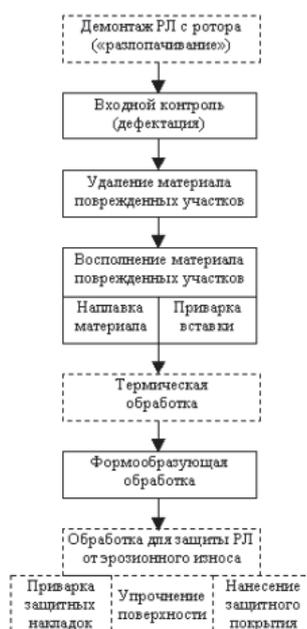


Рисунок 3 – Схема технологического процесса восстановления рабочих лопаток (пунктиром указаны этапы, которые могут отсутствовать) [3]

**Лазерное восстановление лопаток паровых турбин «на месте»**

Технология лазерного плакирования заключается в наплавлении лазером металла на детали агрегатов с целью повышения их устойчивости к износу, окислению, эрозии и коррозии. Преимущества метода по сравнению с традиционными: низкое энергопотребление, малая степень деформации обрабатываемой детали, сохранение правильной кристаллической структуры наплавляемого слоя и значительная экономия средств благодаря отсутствию необходимости перевозки турбины или ее частей к месту ремонта [5].

После удаления старых изношенных щитков производится наплавка поверхностей входных кромок лопаток, выходных кромок и их защиты. Технология обеспечивает одновременно минимальную деформацию профилей и достаточно объемное восстановление их кромок. После наплавки лопатки производится шлифование поверхности с восстановлением первоначальных профилей сечений.

Сложность ремонта закрепленных в роторе лопаток обусловлена массогабаритными характеристиками турбоагрегата. Например, общая масса ротора ЦНД составляет порядка 27 тонн. Лопатки последних ступеней (они самые большие в турбине) имеют высокую степень реактивности и практически вертикальное расположение поверхностей при их обработке, то есть плакирование выполняется в крайне стесненных условиях. Однако, несмотря на указанные сложности, технология выполнения восстановительных работ лазером «на месте» - в условиях электростанции – была разработана и успешно внедрена. Для лазерной наплавки лопаток ротора низкого давления, подвешенного в опорной раме, были интегрированы полупроводниковый лазер «Laserline» мощностью 3кВт с оптоволоконной линией передачи, питатель порошок Sulzer Metco и робот-манипулятор Motoman [5]

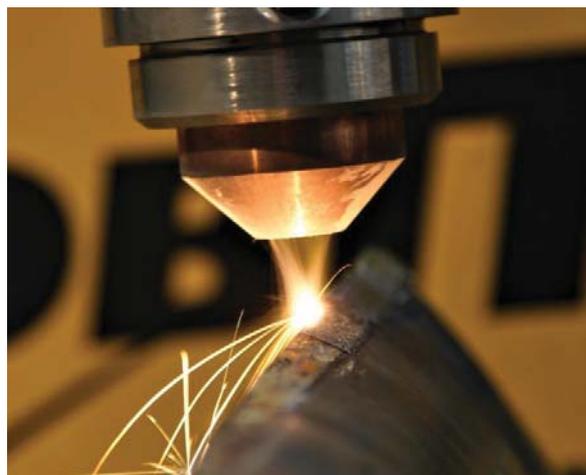


Рисунок 4 – Процесс лазерного плакирования лопаток

**Деформация лопаток.**

Основная причина, вызывающая искривление, это разные коэффициенты температурного расширения нержавеющей мартенситной стали ( $11,7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) и стеллита-6 ( $15,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ), что при охлаждении заставляет лопатку выгибаться к материалу с большим температурным расширением.

Сравнение остаточной деформации после термической обработки материала показало, что главной причиной деформации профиля лопатки является различие коэффициентов температурного расширения материалов.

Одной из причин их деформации также является постепенный перегрев материала. Это указывает на то, что:

- 1) подвод энергии должен быть сведен к минимуму снижением мощности лазера, чтобы избежать перегрева кромок;
- 2) должна быть минимизирована толщина наплавки отдельных слоёв.

Технология лазерного плакирования лопаток паровых турбин стеллитом-6 с помощью компактной коаксиальной лазерной наплавляющей головки, связанной с полупроводниковым лазером оптоволоконной передающей линией. Конструкция головки способствует равномерной подаче порошка под любым углом даже в труднодоступные места и имеет модульную конструкцию облегчающую ремонт или смену при изменении режима работы.

Технология лазерного плакирования «на месте» позволяет ремонтировать лопатки без демонтажа, что значительно сокращает общий простой, связанный с ремонтом [5].

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фадеев, И.П. Эрозия влажнопаровых турбин / И.П. Фадеев. Л. : Машиностроение, 1974. 206с.

2. Амелюшкин, В. Н. Эрозия титановых рабочих лопаток паровых турбин/ В. Н. Амелюшкин // Тяжелое машиностроение. 1992. №11. С. 25-26

3. Исанбердин А. Н. Технологические особенности восстановленных свойств титановых лопаток паровых турбин /Смылова М.К., Исанбердин А.Н. // Вестник УГАТУ. 2006. № 1. С. 103-109

4. Замена и ремонт лопаток последних ступеней паровых турбин / Щедролубов В.Л., Зельяков В.А., Шкотов Ю.Д. // Энергетик. 2002. №2. С. 37-39

5. «Лазерное восстановление лопаток паровых турбин «на месте»». Основные области применения технологии. Энергия и Менеджмент (ЭиМ) № 4 – 5 (73-74) Июль-Октябрь 2013.

6. Тополянский П.А. Повышение эрозионной стойкости входных кромок лопаток ступеней низкого давления паровых турбин (обзор) // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции 16-18 апреля 2002 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГТУ. 2002. - С. 30-49

7. Кусаиынов К.К. Кавитационный износ лопаток паровых турбин Т-100/120-130 / Амирбеков Д. А., Кусаиынов К.К.// Вестник КГУ. 2014. №2(74)/2014 Серия Физика. С. 36-40

8. СО 153-34.17.462-2003. Инструкция о порядке оценки работоспособности рабочих лопаток паровых турбин в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта. –Введен 2004. –М.:Изд-во инструкции, 2004. -Приложение 8. С. 47-51

9. Татарина Н.В. Оценка повреждений и эрозионного износа рабочих лопаток последних ступеней турбины Т-185/220-130 Кировской ТЭЦ-5/ Захарова К.С., Татарина Н.В. науч.-практ. конф.: сб. статей, 18-29 апреля 2018 г. Киров : Вят. гос. ун-т, 2018. С. 379-383

*Кулагин Александр Геннадьевич – магистр техники и технологии машиностроения, выпускник ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия; Инженер-технолог, Бюро Сварки ООО "Сибэнергомаш - БКЗ"*

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОМУ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Д. И. Галкин, М. П. Клейзер, А. Е. Шубочкин

Новый универсальный шаблон специалиста неразрушающего контроля «TapiRUS», созданный в Научно-исследовательском институте интроскопии (АО «НИИИН МНПО «Спектр») предназначен для визуального и измерительного контроля (ВИК) качества сварных соединений, обеспечивает жесткие требования нормативных документов к погрешности измерения размеров обнаруженных дефектов и параметров сварных соединений.

Впервые средство измерения, применяемое в ВИК сварных соединений обеспечено учебным пособием с методикой измерения сварных соединений на всех этапах их изготовления и эксплуатации с использованием УШС НК TapiRUS; калькулятором для расчёта калибров и параметров, не подлежащих прямому измерению; андроид приложением для использования методики и калькулятора без сети.

Разработанная методика позволяет производить с точностью, требуемой в нормативных документах, более 40 измерений. Методика доступна в ПК и мобильной версии сайта и для скачивания.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, визуальный и измерительный контроль, сварные соединения, универсальный шаблон, Tapiрус, УШС НК «TapiRUS», цифровизация НК.

Визуальный и измерительный контроль (ВИК) сварных конструкций является первым методом неразрушающего контроля, который стоит на страже качества выпускаемой продукции. Именно на этапе проведения ВИК относительно просто может быть собрана ценнейшая информация о несоответствиях продукции требованиям нормативной документации, благодаря чему производство получит возможность локализовать проблемные участки.

Правильное использование результатов ВИК делает возможным осуществить точечное вмешательство в производственный процесс, приводящее к максимальному эффекту для улучшения качества продукции. Дополнительно повышается культура производства, что способствует уменьшению количества выявленных проблем другими методами неразрушающего контроля (ультразвуковым, радиационным и т.д.), снижению производственных издержек, повышению удовлетворённости потребителя.

Несмотря на столь существенную значимость ВИК, долгое время его потенциал не мог быть использован в полной мере. Все дело в том, что метод ВИК не был обеспечен приборной и методической базой, применение которой позволяло бы получить повто-

ряемые результаты с необходимой для производства погрешностью измерений [1, 2].

Все, чем располагал специалист по ВИК – это, штангенциркуль, позволяющий уверенно определить лишь ширину выпуклости сварного шва, и шаблоны сварщика, не обеспечивающие необходимые погрешности измерений. Кроме того, как ни парадоксально, методика применения данных средств для измерения параметров сварных швов была представлена в форме картинок в [3] или в паспортах на шаблоны, и даже не имела подробного описания. Это явилось причиной сформировавшегося на многих производствах отношения к ВИК как к обязательной, но несущественной операции в процессе проведения неразрушающего контроля сварных конструкций.

Ситуация изменилась с появлением универсального шаблона специалиста неразрушающего контроля TapiRUS, который был разработан Научно-исследовательским институтом интроскопии «Спектр» для решения обозначенных проблем [3].

На сегодняшний день УШС НК TapiRUS (рисунок 1) не имеет аналога в мире по точности и количеству измеряемых параметров и включен в «Инфраструктурный лист международного строительного чемпионата (WCC)» в индивидуальной номинации «Неразрушаю-

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОМУ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

щие методы контроля» (рисунок 2). На УШС НК ТаріRUS получен патент на изобретение РФ [4].

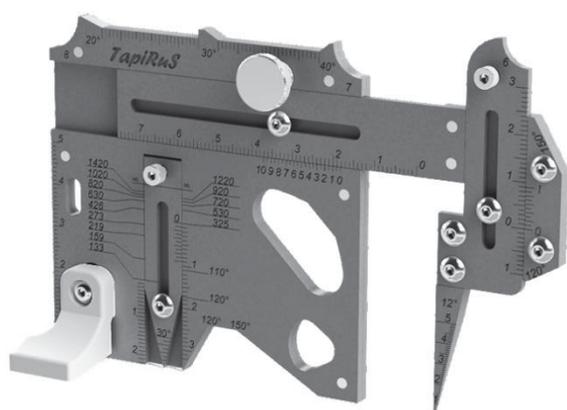


Рисунок 1 – Универсальный шаблон НК ТаріRUS



Рисунок 2 – Примерение УШС НК ТаріRUS на Международном строительном чемпионате

Все этапы разработки и подготовки к производству с использованием аддитивных технологий были проведены исключительно в цифровом формате. При производстве шаблонов ТаріRUS применяются новейшие лазерные и аддитивные технологии: используются станки высокоточной лазерной резки в инертном газе, пятиосевые обрабатывающие ЧПУ центры, пружинонавивочные станки-мультиформеры, сверхточная цветная лазерная гравировка всего изделия в собранном виде, 3D выборочное лазерное спекание (SLS).

В шаблоне реализована двухуровневая фиксация подвижных элементов и адаптивная установка по нормали к поверхности контролируемого объекта (рисунок 3), что позво-

ляет значительно снизить ошибку позиционирования и исключает смещение шкал при контроле труднодоступных участков.

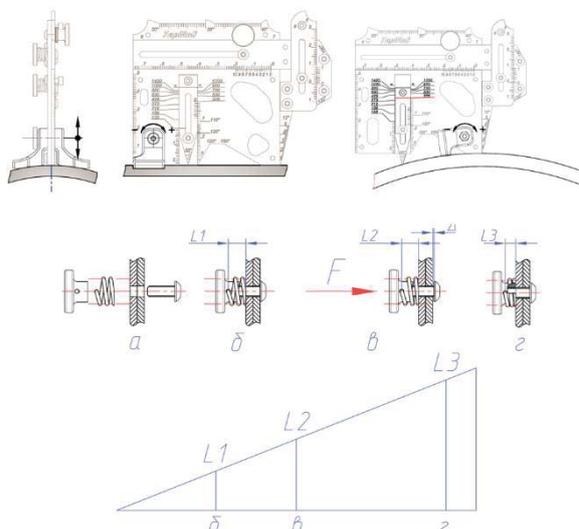


Рисунок 3 – Конструктивные преимущества УШС НК ТаріRUS

Высокая точность измерения ( $\pm 0,1$  мм) обеспечивается тремя шкалами с использованием одно- и двух- направленных нониусов (рисунок 4).

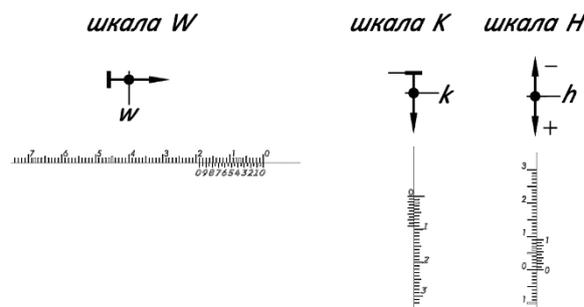


Рисунок 4 – Шкалы с нониусом в нулевом положении

Горизонтальная шкала W и двунаправленная H позволяют произвести контроль практически всех геометрических параметров сварного соединения и обнаруженных дефектов при одной установке, поскольку диапазоны их измерения охватывают часть полупространства перекрывающее контролируемую область. Шкала K обеспечивает контроль таврового сварного соединения и установку шаблона на цилиндрическую поверхность по образующей.

Следует отметить, что Универсальный шаблон специалиста НК ТаріRUS является единственным средством измерения внесен-

ном в государственный реестр средств измерения РФ (ГРСИ РФ № 82433-21) обеспечивающее требуемую стандартами организаций и руководящими документами точность измерения большинства параметров сварных соединений [5].

Остальные отечественные и зарубежные шаблоны и калибры ВИК, представленные на рынке, либо имеют узкую специализацию, значительные измерительные и конструктивные погрешности, либо не внесены в ГРСИ. Шаблоны, не обеспечивающие требуемую погрешность, не позволяют достигнуть необходимой стабильности результатов измерений, и поэтому их использование для проведения оценки соответствия контролируемого объекта требованиям нормативной документации является необоснованным.

Шаблон TapIRUS является достаточно сложным измерительным устройством и для облегчения освоения работы с ним в НИИ Интроскопии разработана полноценная методика, являющаяся не только руководством по эксплуатации шаблона, но и полноценным учебным пособием для визуального и измерительного контроля сварных соединений [6]. В методике описывается конструкция шаблона, схемы измерения при контроле сварных соединений типа лист-лист, продольных и поперечных швов труб и тавровых соединений на всех этапах их изготовления и эксплуатации. Приведены фотографии с примерами измеряемых параметров и соответствующие им схемы сварных соединений.

Некоторые из геометрических параметров объектов контроля не могут быть определены прямыми измерениями. Требования к таким параметрам определены в документации, однако средства измерения либо отсутствовали, либо являлись недоступными для большинства предприятий из-за их уникальности. УШС НК TapIRUS позволил закрыть и этот пробел в технологии ВИК.

Шаблон позволяет определить при его однократной установке координаты базовых точек конструкции по взаимно перпендикулярным шкалам W и H, а затем становится возможным рассчитать искомый параметр. На рисунке 5 приведен пример определения параметра сложной разделки толстостенного сварного соединения на этапе сборки металлоконструкции.

Рассчитать угол можно и самостоятельно, но пользователям TapIRUS доступен специализированный калькулятор для расчета величин.

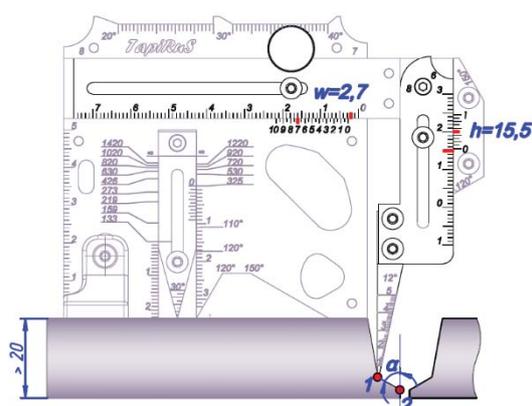


Рисунок 5 – Измерение внутреннего угла сложной разделки

Онлайн версия калькулятора размещена на сайте <https://www.tapirus.info> [7] и <https://www.tapirus.ru> [8]. В калькуляторе представлены расчеты величин, не подлежащих прямому измерению и определения значений калибров.

Еще одной сложной задачей ВИК является измерение параметров продольных (заводских) сварных соединений труб. Проблема состоит в том, что измерение должно проводиться по нормали к поверхности, а перемещения всех измерительных шкал устройств осуществляются по прямой, а не по образующей к поверхности. На рисунке 6 показан способ установки УШС НК TapIRUS на образующую цилиндрического объекта контроля (ОК). Упор обеспечивает установку измерительной иглы по нормали к поверхности, а опоры предотвращают отклонение шаблона от плоскости, образующей ОК.

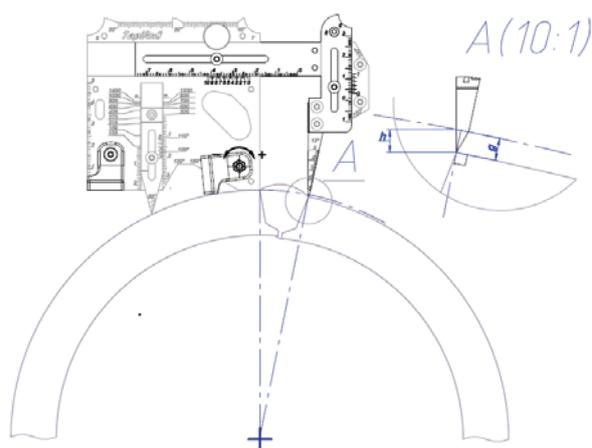


Рисунок 6 – Измерение g - смещение кромок, h – измеренная величина

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОМУ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При смещении измерительной иглы по шкале  $W$  накапливается ошибка в определении искомой величины  $g$  (с учетом поправки на отклонение от нормали к поверхности).

Для получения корректного результата измерения смещения кромок также используется калькулятор TapiRUS «ВЫСОТА/ГЛУБИНА (ПРИ УСТАНОВКЕ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЫ)».

Если при проведении измерения игла TapiRUS перемещается вверх от нулевого положения, то:

$$= \left| \sqrt{w^2 + \left(\frac{d}{2} + |h|\right)^2} \right| - \frac{d}{2},$$

где:  $d$  – диаметр контролируемого объекта по шкале диаметров  $D$  [133...1420].

$w$  – измерение по горизонтальной шкале  $W$  [0...55].

$h$  – значение по двунаправленной вертикальной шкале  $H$ .

При проведении измерения игла TapiRUS перемещается вниз от нулевого положения.

$$= \left| \sqrt{w^2 + \left(\frac{d}{2} - |h|\right)^2} \right| - \frac{d}{2}.$$

Если рассчитанная величина  $g < 0$ , то отклонение от цилиндрической поверхности радиуса  $d/2$  – в тело изделия.

ИЗМЕРЯЕМЫЙ ПАРАМЕТР - ВЫСОТА/ГЛУБИНА (ПРИ УСТАНОВКЕ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЫ)

**H = -2,81 MM**

\* при измерении глубин дефектов (подрезов, коррозионных язв и т.п.) TapiRUS необходимо устанавливать на с той стороны шва, на которой выявлен дефект. Для большей точности измерений целесообразно располагать TapiRUS на неповрежденной поверхности на минимальном расстоянии от точки осуществления измерения

w = 18  
h = -2,2  
d = 530

\*\* Допустимые значения измеряемых параметров  
\*\*\* отрицательное значение соответствует случаю, когда при измерении игла смещается вверх от нулевого положения

Рассчитать

- Выдвините упор 2 из основания 1, совместив риску со значением, соответствующим диаметру контролируемой трубы
- Зафиксируйте положение упора, затем гайку на установочном винте 5
- Для большей устойчивости TapiRUS при проведении измерений используйте опоры
- Выдвините плунжер 3 таким образом, чтобы игла 5 оказалась над точкой выполнения измерения
- Опустите щуп 4 таким образом, чтобы игла 5 коснулась поверхности объекта контроля в точке выполнения измерения
- По горизонтальной шкале W считайте показания параметра w.
- По вертикальной шкале H считайте показания параметра h.

Рисунок 7 – Внешний вид калькулятора на сайте [tapiurus.info](http://tapiurus.info)

В представленном на рисунке 7 примере расчета с использованием онлайн калькулятора при диаметре  $d = 530$  мм и отклонению по шкале  $w = 10$  мм, измеренная величина  $h = -2,2$  мм, а искомое значение  $H = -2,81$  мм. Таким образом, без приведения измеренного значения к нормали риск недобраковки значительно возрастает.

В сварных соединениях существуют и параметры, вообще не подлежащие прямым измерениям. К ним относится высота выпуклости сварного шва при сварке разнотолщинных элементов. Данный параметр может быть рассчитан после измерения координат двух точек с использованием УШС НК TapiRUS (Рисунок 8).

На данном рисунке шаблон представлен в виде замещающей схемы. В таком варианте отображены большинство схем измерения в методике УШС НК TapiRUS. На схеме отображаются только шкалы участвующие в из-

мерении и постановке шаблона на объект контроля.

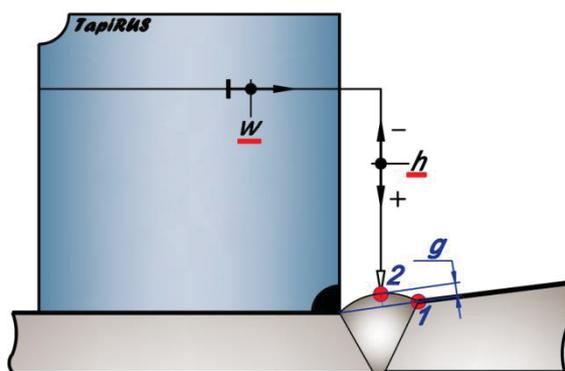


Рисунок 8 – Определение высоты возвышения сварного шва разнотолщинных элементов

На сегодняшний день удобство и эффективность использования УШС НК

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 Т.2

TarIRUS на своих объектах подтверждено многочисленными положительными отзывами организаций РФ, таких как ООО «Газпром газнадзор», ГНЦ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», АО «НИКИМТ-Атомстрой», ООО «ГАЦ МР НАКС», АО «Мособлгаз», АО «Мосгаз» и пр.; учебными центрами по подготовке специалистов НК: ФГАУ «НУЦК при МГТУ им. Н.Э. Баумана», ООО «НУЦ Качество», Lavender International (UK) и др., а также экспертами в области НК из сорока стран мира, принимавшими участие в судействе международного чемпионата «WorldSkills Kazan -2019».

Для более быстрого освоения функционала УШС НК TarIRUS в НИИ Интроскопии были спроектированы 3D-модели образцов, каждый из которых, несмотря на незначительные размеры, содержит более 20 измеряемых параметров сварных соединений. Впоследствии 3D-модели были материализованы с использованием аддитивных технологий. Таким образом, были получены образцы с полной воспроизводимостью геометрических характеристик, определяемых с высокой стабильностью результатов при помощи УШС НК TarIRUS. Такой подход позволяет применять УШС НК TarIRUS в комбинации с образцом в целях обучения или проверки практических навыков специалистов НК (рисунок 9). Так в 2022 году подобная практика была реализована при проведении финального этапа Всероссийского конкурса по неразрушающему контролю «Дефектоскопист 2022» [9] (рисунок 9).



Рисунок 9 – Использование УШС НК TarIRUS в комплекте с «клонированными» образцами на Всероссийском конкурсе «Дефектоскопист 2022»

Тем не менее авторы решили не останавливаться на достигнутых результатах и развивать цифровой потенциал УШС НК TarIRUS.

Во многих случаях контроль проводится на объектах, расположенных в местах, где отсутствует мобильный интернет и локальная сеть. В таких случаях калькулятор на сайте становится недоступным для использования.

Было принято решение, во-первых, создать скачиваемую версию сайта, на которой калькулятор останется доступным для всех типов устройств в формате html (скачать данную версию можно на сайте [8]), а также создать приложение для мобильных андроид устройств (Рисунок 10).



Рисунок 10 – Экраны приложения УШС НК TarIRUS

Приложение работает офлайн на устройствах с ОС Android версии 6.0 и выше.

Структура навигации (меню) обеспечивает удобный доступ к разделам. Для каждого вычисляемого параметра приведены замещающие схемы шаблона, методика измерения и осуществляется контроль ввода измеренных значений для расчета искомого параметра. Реализована возможность копи-

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ВИЗУАЛЬНОМУ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

рования результатов вычислений и экспорт результатов вычислений в требуемый файловый формат.

Приложение написано на языке программирования Kotlin с использованием фреймворка Jetpack Compose. Средства разработки были выбраны как одни из самых современных и перспективных с большими возможностями расширения функционала приложения.

Кроме вычисляемого параметра, пользователям доступен следующий функционал: определение параметров отбраковки в соответствии с выбранным нормативным документом с учетом характеристик объекта контроля (толщина, класс качества и пр.), офлайн методика измерения соответствующего параметра, а также описание самого измерительного устройства.

Таким образом, использование разработанного в научно-исследовательском институте Интроскопии УШС НК TapIRUS позволяет получить максимально информативные и стабильные результаты при проведении ВИК сварных соединений, что делает возможным раскрыть производственный потенциал этого метода контроля.

Отдельно следует отметить, что УШС НК TapIRUS дополнен инструментами, необходимыми для его быстрого освоения и правильного применения, а его цифровые возможности делают доступной нужную при проведении ВИК информацию.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шубочкин А. Е. О погрешности измерения геометрических параметров сварного соединения с использованием шаблонов / Зусман Г.В., Кантер Б. М., Прилуцкий М. А. ISSN 2071-5234. Сварка и Диагностика. 2019. № 6 с.41-45.
2. A E Shubochkin Measuring error of geometric parameters of welded joint using gauges / B M Kanter, G V Zusman, A Kh Vopilkin, V G Badalyan et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1636 012018.
3. Инструкция по визуальному и измери-

тельному контролю (РД 03-606-03). Серия 03. Выпуск 39 / Колл. авт. - М.: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2004.

4. Патент на изобретение RU 2714458 С1. Универсальный шаблон специалиста неразрушающего контроля: N 2017105030: Заявка № 2019126215 от 20.08.2019: опубликовано 18.02.2020 / Шубочкин А.Е., Галкин Д.И., Ефимов А.Г., Юрченко А.А. — 22 с. : ил. — Текст : непосредственный.

5. Галкин Д. И. Универсальный шаблон специалиста по неразрушающему контролю / Шубочкин А.Е., Галкин Д.И., Ефимов А.Г., Уланов В.В., Шестаков Р.А. Деловой журнал Neftegaz.RU. 2021. № 3 (111). С. 42-46.

6. Галкин Д. И. Визуальный и измерительный контроль сварных соединений с использованием универсального шаблона специалиста неразрушающего контроля / Толстых О. А., Перфильев И. В., Шубочкин А. Е. ISBN 978-5-4442-0162-6, 2021, Издание: 1-е, 68 стр.

7. Универсальный шаблон специалиста «TapIRUS» электронный ресурс / НИИИН МНПО «Спектр». URL: <https://www.tapirus.info/> (дата обращения 01.12.2022).

8. Калькулятор для универсального шаблона специалиста «TapIRUS» электронный ресурс / НИИИН МНПО «Спектр». URL: <https://www.tapirus.ru/> (дата обращения 01.12.2022).

9. Итоги Всероссийского конкурса РОНКТД «Дефектоскопист 2022» электронный ресурс / РОНКТД. URL: <https://ronktd.ru/news/2022/1173/> (дата обращения 01.12.2022).

**Галкин Денис Игоревич** – канд. техн. наук, генеральный директор АО «НИИИН МНПО «СПЕКТР», г. Москва, Россия, e-mail: [galkin@niiin.ru](mailto:galkin@niiin.ru).

**Клейзер Михаил Петрович** – студент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия, e-mail: [miv738@gmail.com](mailto:miv738@gmail.com);

**Шубочкин Андрей Евгеньевич** – д-р техн. наук, руководитель отдела АО «НИИИН МНПО «СПЕКТР», г. Москва, Россия, e-mail: [sae@niiin.ru](mailto:sae@niiin.ru)

# MODERNIZATION AND DESIGN OF METAL STRUCTURES FOR FRICTION STIR WELDING

Yu. G. Ludmirsky, S. P. Kamyshanov, S. S. Assaulenko

The issues of modernization of obsolete metal structures, which were manufactured by fusion welding, are considered. Structural and technological methods of transition to the manufacture of structures using friction stir welding, which is carried out in the solid phase, are proposed. Structural forms and technologies for manufacturing structures are shown that retain the service purpose of structures, provide the required durability and allow obtaining products with minimal labor and time.

**Key words:** structural modernization, friction stir welding, joint types, stress distribution, fusion welding, aluminum alloys.

Currently, a large number of metal structures designed and manufactured in the 60-70 years of the last century are in operation in our country, which are at the stage of exhaustion of the working capacity resource, requiring modernization or design and manufacture of new ones [1].

When upgrading outdated metal structures, it is necessary to take into account the revealed operational shortcomings, develop recommendations for their elimination through the use of rational structural and technological solutions. At the same time, it is necessary to find such constructive forms and technologies of their manufacture that will preserve their official purpose, provide the required durability, reliable operation in operation and will allow you to obtain products at minimal cost of materials and manufacturing. The best satisfaction of these requirements is the main criterion when choosing a modernization option and when manufacturing new structures.

The widely used steels and alloys are being replaced by new materials with high performance properties: aluminum, titanium, magnesium and other alloys.

The main methods of their connection were fusion welding methods, which, due to high heating, cause softening of the joints. This leads to the fact that 65-75% of the static and fatigue strength of the base metal is realized in the structure.

In 1991. The Welding Institute of Great Britain (TWI) has patented a new method of friction welding carried out in the solid phase – friction stir welding (FSW).

The main advantages of FSW are noted in the works [2, 3, 4, 5, 6]:

- butt joints provide 90-95% of the strength of the base metal;

- deformations are 6-7 times less than in electric arc welding processes;

- the weight of the product is reduced, since no filler materials are used, there is no bulge of seams or rivet heads;

- energy consumption is reduced by 3-4 times;

- cost-effectiveness of the process by reducing the use of welding materials and high welding speed  $V_w = 60$  m/h;

- environmental friendliness of the process and a number of other advantages.

FSW technology is most widely used for welding aluminum alloys, but it can also be used for welding: copper, magnesium, titanium and their alloys, and for welding steels of different classes.

Disadvantages of the FSW process:

- high cost of equipment;

- sometimes there is an incompleteness at the root of the seam;

- a remaining blind hole is formed at the end of the seam;

-when welding, rigid fastening of parts is required;

-with FSW, it is not possible to introduce a filler material, therefore, most types of joints made with angular seams (angular, T-shaped, overlapping), it is desirable to upgrade (change) to butt or weld, without changing the purpose of the structure, improving its manufacturability and operational qualities.

The purpose of the work. To develop constructive and technological recommendations for the modernization of previously created structures and for the creation of new structures in which it is advisable to use friction welding with mixing, ensuring minimal costs for materials and for the production of works.

Let's consider the main types of welded joints performed by fusion welding using filler materials, and the possibility of replacing them

## MODERNIZATION AND DESIGN OF METAL STRUCTURES FOR FRICTION STIR WELDING

with welded joints performed by FSW without filler materials.

The upper part of Fig. 1 shows butt and lap joints performed by fusion welding, and the lower part of the figure shows joints adapted to FSW.

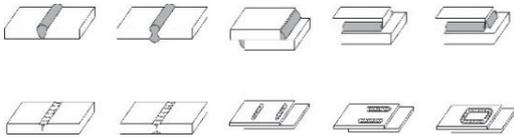


Figure 1 - Designs of butt and lap joints made by fusion welding and similar designs made by friction welding with mixing

The design of butt joints has not changed much. The only change is the fact that cutting edges is not required and the gap when assembling parts for welding should be no more than 0.3 mm. The benefits associated with the transition to FSW are described earlier.

The design of the overlapping joints has not changed, but when performing the FSW, the corner seams have been replaced with "floating" ones. With properly selected FSW modes, the structural strength of the overlapping joints does not decrease.

Figure 2 shows the welded corner joints: 2 (a) - the seams are made by melting welding; Figure 2 (b, c, d) - the designs of corner joints that are technologically suitable for their implementation by FSW.

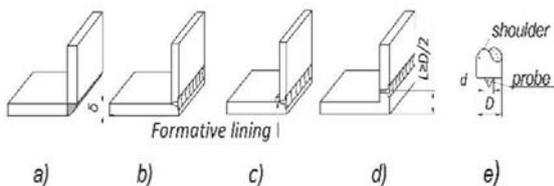


Figure 2 - Constructions of angular joints: a – seams made by fusion welding; b, c, d – seams made by FSW

The angular connection shown in Fig. 2b can be switched to if the thickness  $\delta$  is more than half the diameter of the tool shoulder (the diameter of the tool shoulder varies within 10-20 mm depending on the thickness to be welded). To ensure high strength of the angular joint, it is recommended to perform the FSW on the forming lining, as shown in Fig. 2b. If the angular joint is required to provide strength equal to the base metal, it is recommended to perform the welded joint shown in Fig. 2g. In this case, the rectilinear section of length  $L$  should be more than half the diameter of the tool shoulder.

Fig.3 shows the T-joints made: a – one-sided melting welding with cutting edges, b - two-sided melting welding without cutting edges. To obtain similar T-joints, but performed using FSW, Fig.3b and Fig.3b show one-sided and two-sided T-joints. In these joints, an extruded profile is used, which made it possible to switch from corner seams to butt seams to ensure the strength of the T-joints, which is not inferior to the strength of the base metal.

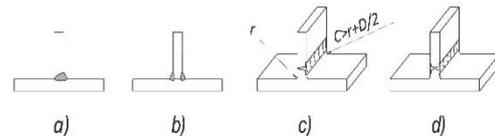


Figure 3 - Designs of T-joints made: a) – one-sided melting welding with cutting edges, b) - two-sided melting welding without cutting edges, connections c) and d)- made by FSW

To ensure the quality of the FSW, the design size is  $C > r + D/2$ , where  $r$  is the radius of the profile and  $D$  is the diameter of the tool shoulder.

A large number of overlapping heterogeneous joints can be performed by joint venture, and the remaining hole in a more plastic material does not reduce the strength of the joint if it is located as shown in Fig.4.

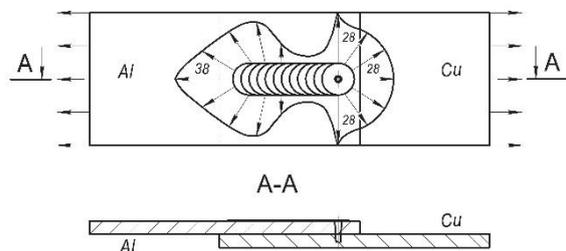


Figure 4 - Stress distribution in heterogeneous joint (Al+Cu), when performing a weld in the direction from the aluminum plate to the copper plate

When performing heterogeneous overlapping joints with weld seams, welding should begin from the side of the aluminum plate and finish from the copper side. The location of the hole in the planed seam above the copper plate causes an increase in stresses at the edge of the hole (28 MPa), however, they are significantly lower than the stresses in the same joint on the side of the aluminum plate (38MPa). Thus, the location of the hole above the copper plate does not reduce the load-bearing capacity of the overlapping heterogeneous joint.

Conclusions:

1. The designs of joints performed by fusion welding are considered, the ways of their modernization for the transition to welding in the solid phase (to friction welding with mixing) are shown.
2. The advantages of FSW, which form economic advantages when welding structural elements, are considered.
3. The most tangible advantages are achieved when welding dissimilar metal structures.

Referenes

1. Aleshin N.P. Role, meaning, present and future of welded metal structures // Welder-Professional. 2005. No.2. S. 2.
2. Strikman M.M. The state and development of the friction welding process of linear joints. Part1 / M.M. Strikman // Welding production. – 2007. – No. 9. – pp.35-40
3. Lukyanov V.F. Production of welded structures (manufacturing in factory conditions) / V.F. Lukyanov, V.Ya. Kharchenko, Yu.G. Ludmirsky – Rostov n/A: Terra Print LLC, 2006. – 336 p.
4. Kottlyshev R.R. Friction welding with mixing. Rostov n/A: publishing center of DSTU, 2012. - 135 p.
5. Frolov V.A. Friction welding with mixing – pros and cons / V.A. Frolov [et al.]// Welding production. – 2008. -No.10. –pp. 12-19.
6. Sergeeva E.V. Friction welding with mixing in the aerospace industry // Automatic welding. - 2013. No. 5.- pp. 58-62.

*Людмирский Юрий Георгиевич – д.т.н., профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: lyudmirskiy40@mail.ru*

*Камышанов Станислав Пелович – студент ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: kamushanov.stas@bk.ru;*

*Ассауленко Семен Семенович – старший преподаватель кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: assaulenko\_s@mail.ru*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОИСКА УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Е. А. Иванайский, А. И. Щёткин, А. А. Иванайский

Рассмотрена сущность корреляционного метода течеискания. Указаны основные условия, приводящие к уменьшению вероятности обнаружения утечек в трубопроводах. Предложено использовать нейронные сети для выявления наличия течи. Разработана методика «токенизации» аудио сигналов и подобрана оптимальная архитектура нейронной сети. Предложен метод обработки исходных сигналов для получения обучающих и тестовых баз данных. Авторам удалось добиться 100% точности распознавания наличия утечек нейронной сетью.

**Ключевые слова:** акустические сигналы, корреляционное течеискание, виброакустические датчики, автоматическая обработка, математический анализ, современная городская среда, трубопроводы тепловых сетей, техногенные шумы, спектрограмма сигнала, Launch CorreluxView, нейронные сети, плавающее окно Бартлетта, базы данных, Dropout, Flatten Batch Normalization, Dense.

Одним из основных методов поиска утечек в подземных трубопроводах является корреляционное течеискание. Для определения места утечки на концах обследуемого участка, на поверхность трубы или запорной арматуры устанавливаются два виброакустических датчика, которые фиксируют звуковые сигналы, распространяющиеся от течи по воде внутри трубы. Сигналы от датчиков передаются на блок оператора, где осуществляется автоматическая их обработка с целью подавления различных шумов и проведения математического анализа, позволяющего определить местоположение сигнала. Считается, что место расположения утечки будет совпадать с максимумом корреляционной функции.

Предположим, что вытекающая под давлением вода будет являться источником акустических сигналов, распространяющихся в сторону датчиков, установленных на начале и конце трубы как показано на рисунке 1.

Тогда к первому датчику единичный импульс от течи придёт через время  $t_1$ :

$$t_1 = L_{\partial} / V_{\partial} \quad (1)$$

где:  $V_{\partial}$  – скорость распространения звука по воде.

$L_{\partial}$  - расстояние от точки распространения импульса до датчика «1».

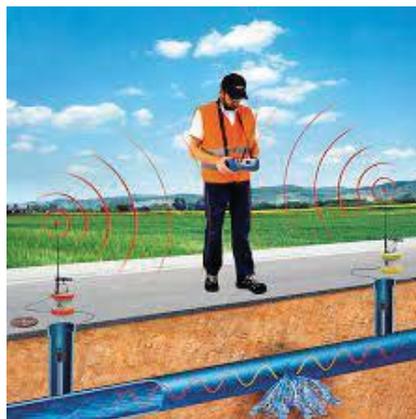


Рисунок 1 – Принцип корреляционного течеискания

К второму датчику импульс придёт через время  $t_2$ :

$$t_2 = (L - L_{\partial}) / V_{\partial} \quad (2)$$

Сравнивая данные, полученные с двух датчиков, необходимо определить разность прихода волн, т.к. сам момент единичного импульса нам неизвестен.

$$t_3 = t_2 - t_1 = (L - 2L_{\partial}) / V_{\partial} \quad (3)$$

После умножения обеих частей уравнения на скорость ультразвуковой волны  $V_{\partial}$ , имеем:

$$L_{\partial} = L / 2 - V_{\partial} \times T_3 / 2 \quad (4)$$

На рисунке 2 схематично изображен принцип корреляционного течеискания. Имеются сигналы от единичного импульса на шкале времени для датчика «1» и «2».

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОИСКА УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Используем функцию взаимной корреляции:

$$G(\tau) = 1/T \int f(t) \times g(t - \tau) dt \quad (5)$$

где:  $G(\tau)$  – значение функции взаимной корреляции;

$f(t)$  – математическое представление записи по датчику «1»;

$g(t)$  – математическое представление записи по датчику «2».

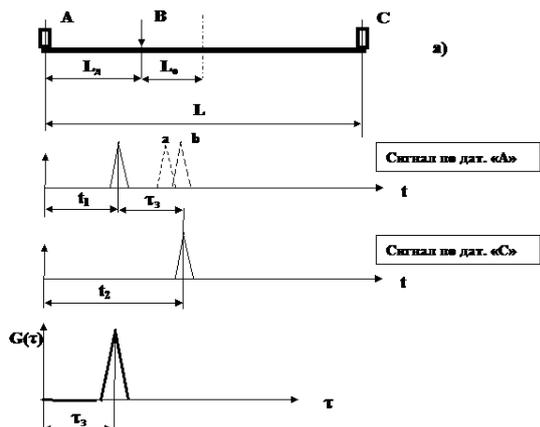


Рисунок 2 – Использование корреляционной функции для обнаружения места утечки

График полученной корреляционной функции приведен на рисунке 2г.

В начальный момент времени  $t=0$  суммируем произведений значений функций  $f$  и  $g$  для каждого момента времени  $t_i$ .

Получаем:

$$0 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + \dots + (0.2 \cdot 0 + 0.5 \cdot 0 + \dots) + 0 \cdot 0 + \dots + (0 \cdot 0.2 + \dots) + \dots = 0 \quad (6)$$

Т.е. на графике  $G(\tau)=0$  если  $f(t)=0$  или  $g(\tau)=0$ .

Далее берется следующее значение  $t=t_i$ , что при расчете равносильно смещению во времени записи по одному датчику относительно аналогичной по-другому на  $t_i$ .

В рассматриваемом примере, значение функции взаимной корреляции  $G(\tau)$  будет равно нулю до тех пор, пока верхний график не начнет «наползать» на нижний. По мере «наползания» значение  $G(\tau)$  будет увеличиваться и достигнет максимума, когда импульс по датчику «1» будет точно над импульсом по датчику «2». При этом максимальное значение функции  $G(\tau)$  имеет место при сдвиге верхнего графика на искомую величину времени задержки  $t_3$ .

Из-за особенности корреляционной обработки сигнала полученный результат будет иметь положительные и отрицательные значения, характеризующие положение утечки справа или слева от центра трубы. При этом в центре трубы достаточно часто возникает ложный сигнал, который в некоторых случаях может «маскировать» утечку.

К сожалению, современная городская среда имеет крайне высокий уровень техногенных шумов, затрудняющих использование метода корреляционного течеискания. В качестве примера на рисунке 3 приведены сигналы, снимаемые одновременно с датчика «1» и «2».

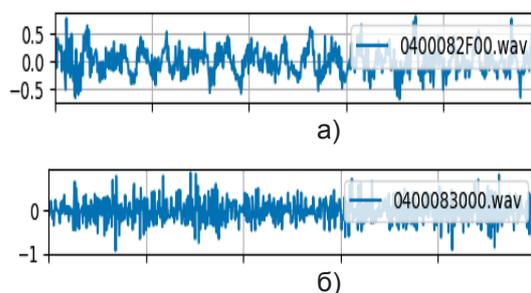


Рисунок 3 – Изменение амплитуды аудиосигнала<sup>а</sup> на датчиках во времени  
а) датчик 1; б) датчик 2

Для наглядности сигнал с датчика «1» представлен в виде спектрограммы на рисунке 4. При этом явно наблюдаются временные аномалии, затрудняющие расшифровку и искажающие корреляционную функцию.

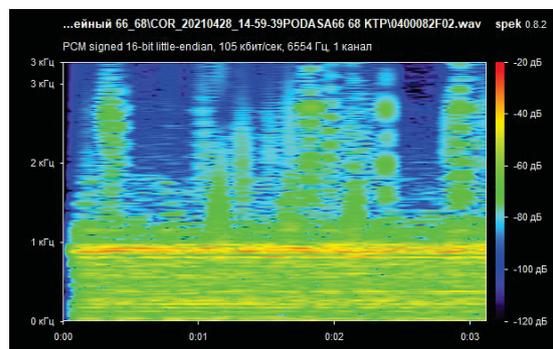


Рисунок 4 – Спектрограмма сигнала полученного с датчика

Использование стандартного программного обеспечения, например, про-

граммы Launch CorreluxView в этом случае затруднено, (рисунок 5) вследствие возник-

новения значительного количества ложных пиков корреляционных функций.

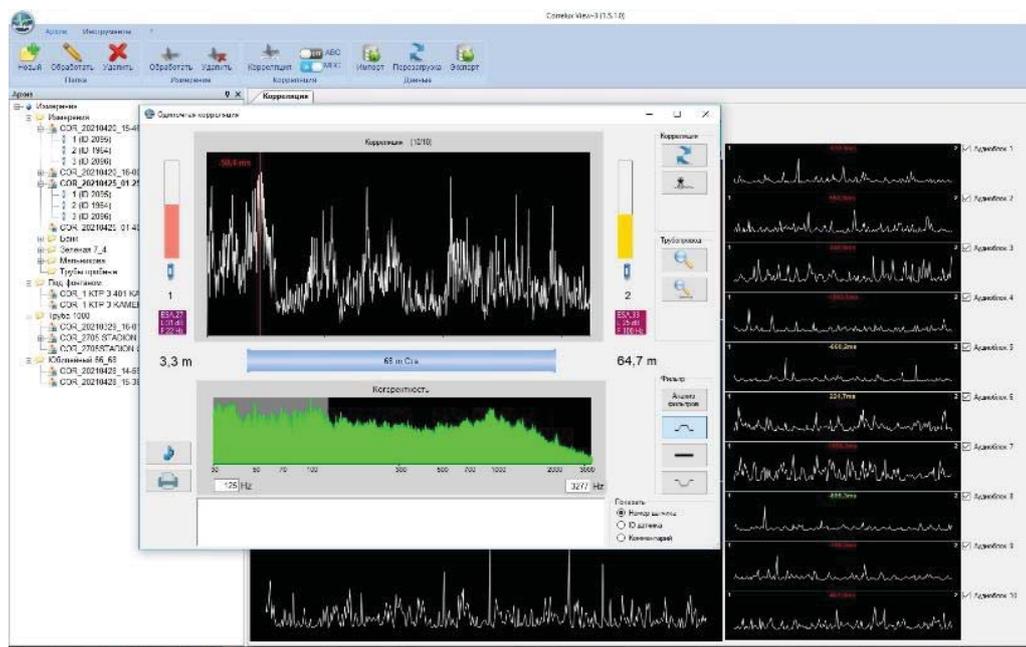


Рисунок 5 – Результаты обработки сигналов с использованием программы Launch CorreluxView

Еще одной особенностью, значительно снижающей точность обнаружения утечки является сдвиг корреляционного максимума, в зависимости от используемого частотного фильтра. Фактически это вызывает ошибку в определении координаты утечки до 10...15 м, что фактически обнуляет практическую пользу от проведенного контроля.

Если увеличить масштаб графика, приведенного на рисунке 3, можно будет увидеть некоторую повторяемость сигналов, которая наблюдается визуально, но не имеет четко выраженного характера (Рисунок 6). В связи с чем было предложено использовать нейронные сети для обнаружения сигнала утечки, на фоне других шумов.

В настоящее время нейронные сети начинают находить широкое применение для задач классификации, при этом особенно интересно их использования для извлечения нечетких правил из множества данных.

Задача была решена в несколько этапов. Во-первых, была выдвинута гипотеза, предполагающая, что наличие повторяющихся сигналов должно сказываться на форме кривой аудиосигнала, поэтому был введен критерий «пересечение через ноль». Все сигналы, находящиеся по одну

сторону оси абсцисс, объединялись в одну группу. После смены знака сигналы объединялись в следующую группу. Для обработки сигналов использовался язык Python. Расчеты проводились в Google Colaboratory.

С использованием плавающего окна Бартлетта проводилось «сглаживание» формы аудиосигнала, усреднение значений амплитуды и отсев единичных выбросов сигнала.

Следующим предположением являлось то, что каждая группа сигналов была объявлена отдельным словом, и задача свелась к типичной задаче на анализ тональности текста. При этом фактически задавалась два уровня тональности: «Наличие течи» и «Отсутствие течи».

Выполнялась токенизация обрабатываемого аудио. Для этого количество сигналов в группе принималось равным количеству букв в слове, а амплитуда сигнала принималась равным порядковому номеру буквы в алфавите. Для токенизации использовались стандартные библиотеки keras и tensorflow.

В итоге аудиосигнал получал следующий вид: [408, 678, 974] [864, 744, 970] [1184, 1182, 1090, 1014] [1036, 1166, 1220] [1086, 926, 936, 1000, 794, 526, 612] [778,

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПОИСКА УТЕЧЕК В ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

734, 656, 628, 570] [638, 844, 798, 474, 432, 762, 932, 864] [952, 940, 1122] [1358, 1264, 1188] [1444, 1492, 1126, 916, 984].....

Очевидным недостатком такого представления является неодинаковое количество «Букв» в каждом «Слове», поэтому все слова, приводились к единой длине, путем дописывания нулей к концу слова. В результате получалась матрица

[[408, 678, 974,0,0,0,0,0] [864, 744, 970, 0,0,0,0,0] [1184, 1182, 1090, 1014,0,0,0,0].....]

Далее формировался частотный словарь, показывающий насколько часто то или иное сочетание сигналов встречалось в аудиозаписи. После чего формировался многомерный массив для загрузки в нейронную сеть.

Важнейшим фактором, определяющим успешное использование нейронных сетей, является правильно подготовленная и размеченная база данных. При этом следует учитывать, высокую стоимость и трудоемкость получения экспериментальных данных при поиске утечек, особенно сложно организации выполнять корреляционный контроль на участках трубопровода, заведомо не имеющих утечек. Фактически в распоряжении авторов имелось несколько десятков аудиофайлов от бездефектных участков, и пара сотен файлов от участков с дефектами, что, во-первых, катастрофически мало для создания обучающего датасета, а во-вторых, имеющиеся данные имеют значительный дисбаланс.

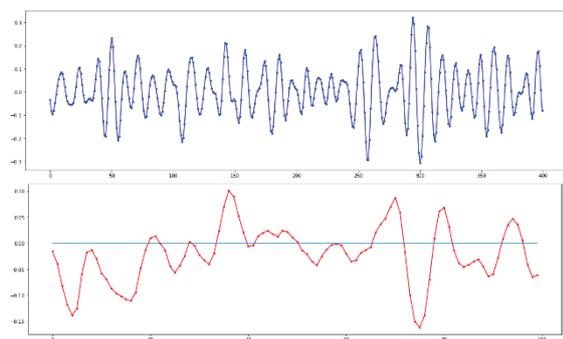


Рисунок 6 – Примеры амплитуды аудиосигналов

Частота дискретизации аудиофайлов составляла 11025 Гц. Это означает, что в записи длиной 1 секунду будет содержаться 11025 значений амплитуд сигналов, кото-

рые после токенизации дадут нам несколько тысяч значений «слов».

Имеющиеся аудиофайлы «разрезались» на файлы меньшей длины с некоторым сдвигом по времени. Например, тридцатисекундный аудиофайл при делении на части длиной по 1 секунде со сдвигом 0,1 секунды позволял подготовить для датасета 300 файлов. Таким образом, удалось сформировать подготовленный датасет, содержащий порядка 60 000 файлов в тренировочных данных и 6 000 файлов в проверочных данных.

При проектировании архитектуры нейронной сети стремились максимально снизить затраты времени и вычислительных ресурсов, необходимых для обучения и работы сети. Одна из наиболее удачных конфигураций приведена на рисунке 7.

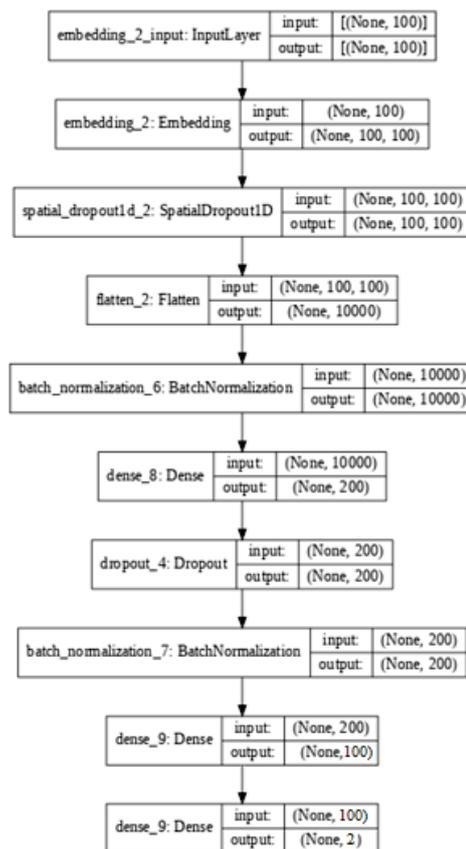


Рисунок 7 – Архитектура нейронной сети

Подготовленные данные из входного слоя передаются на Embedding-слой, который преобразует индексы в плотные векторы фиксированного размера. В нашей ней-

ронной сети использовались тензоры с 2-D размерностью. Для предотвращения переобучения использовался слой Dropout, исключающий некоторое количество нейронов из сети. С использованием слоя Flatten уменьшали размерность используемых данных. Слой Batch Normalization использовался для нормализации характеристик данных. Далее использовался один или несколько полносвязных Dense слоёв.

После обучения предложенной нейронной сети удалось достигнуть точность распознавания утечки в аудио файле на уровне 65...70%. Процесс обучения нейронной сети приведен на рисунке 8.

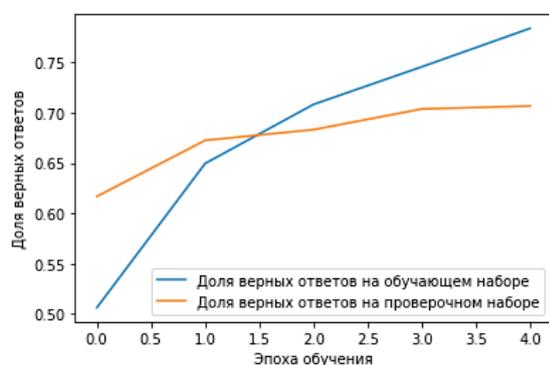


Рисунок 8 – Результат обучения нейронной сети

Увеличение точности распознавания более 75% требовало значительного увеличения времени на обучение и вычислительных мощностей. Поэтому было принято решение загружать в нейронную сеть не 1 аудио файл, а пакет, состоящий из 10 аудиофайлов меньшего размера, извлеченных из исходного файла.

Таким образом, проанализировав пакет файлов нейронная сеть на последнем слое получала массив содержащий, например, 7 значений об наличии утечки, и 3 значения об отсутствии утечки, и принимала решение на основе этих данных. Это позволило добиться 100% точности распознавания наличия сигнала утечки в анализируемом аудио файле.

Использование предлагаемого способа поиска утечек с использованием нейронных сетей в первую очередь может быть использовано для обнаружения течей с малым расходом жидкости. Считаем возможным так же использовать его для локализации утечек в частично подтопленных коммуникациях.

Представляет безусловный интерес использование нейронных сетей для поиска утечек в трубопроводах с ППУ изоляцией, при не работающей СОДК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 59277-2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта: дата введения 2020-12-23. – Москва, 2021. – 12с.

**Иванайский Евгений Анатольевич** – к.т.н. доцент, директор ООО "Научно-учебный центр "Металлы и композиты". г. Москва, Россия, e-mail: [iva.ewg@mail.ru](mailto:iva.ewg@mail.ru), тел: 8-977-353-38-72.

**Щёткин Александр Игоревич** – старший преподаватель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: [aleksandr.shetkin@inbox.ru](mailto:aleksandr.shetkin@inbox.ru), тел: 8-961-977-80-84.

**Иванайский Александр Анатольевич** – к.т.н. доцент, директор ООО "Контрольно-диагностический центр", г. Москва, Россия, e-mail: [1@8131.ru](mailto:1@8131.ru), тел: 8-977-979-81-31.

УДК 621.791.754

## ШАГ В БУДУЩЕЕ, ДУГОВАЯ СВАРКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ АОТАИ, ИСТОЧНИК СЕРИИ AMIG350P-Y

С. Ю. Останин

В источниках тока серии AMIG используется инверторная технология IGBT. Эта система управления использует цифровой сигнал, который обеспечивает очень быстрый отклик и реакцию на изменения параметров сварочной дуги для очень точного контроля сварочного процесса и получения сварных швов наивысшего качества.

**Ключевые слова:** шаг в будущее, дуговая сварка в среде защитных газов, точный контроль сварочного процесса, быстрый отклик, сварные швы наивысшего качества.

Источники тока этой серии имеют микропроцессорное управление и используют технологию MCU + DSP для максимальной точности контроля (рисунок 1). Цифровое управление обеспечивает очень высокую стабильность дуги и длину вылета проволоки, даже при колебаниях руки сварщика достигается отличный результат сварки.

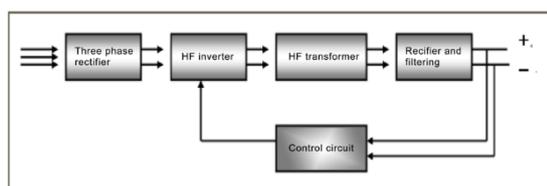


Рисунок 1 – Рабочая схема

Аппараты этой серии могут выполнять различные виды сварки и подходят для сварки большинства металлов: углеродистой стали, нержавеющей стали, алюминия и его сплавов, а также для сварки-пайки оцинкованной стали кремнистой медью и др.

Основные области применения: автомобильная промышленность, химическая промышленность, сварка сосудов, работающих под давлением, судостроение и буровые платформы, энергетика, транспорт и грузоперевозки, тяжелое машиностроение.

Для удобного ознакомления была разработана вводная инструкция по работе с панелью управления источника (рисунок 2), технические данные отражены в таблице.

Сварочная наука не стоит на месте. Разрабатываются все новые и новые способы, которые позволяют уберечь производителя от перерасхода энергии и расходных материалов. Современное оборудование имеет значительно больше КПД, чем устаревшие установки. При равной скорости работы, старое оборудование может расходовать до 2 раз больше электрики и материалов. Как видим, старое оборудование постепенно теряет рентабельность использования, что приводит к убыткам. Импульсные режимы сварки (Pulsed MIG, Double Pulsed MIG). Компактный аппарат со встроенным механизмом подачи проволоки. Сварка углеродистых, нержавеющих сталей, алюминиевых сплавов, тонкостенных и оцинкованных конструкций в режиме MIG-пайка. Многоуровневая защита от перегрева и скачков напряжения. Режимы управления 2Т/4Т/сварка прихватками. Большой выбор синергетических программ. Возможность сохранения до 100 режимов сварки. Включение вентилятора охлаждения только при нагреве.

Полностью цифровое управление аппаратом под управлением DSP. Возможность использования цифровых сварочных горелок. Может комплектоваться интерфейсом для подключения к роботу (опция). Простота в эксплуатации, низкие эксплуатационные расходы и отличные характеристики сварки.

Среди основных преимуществ можно выделить их легкость, компактность, низкое энергопотребление и надежность конструкции. Эти и ряд других преимуществ и объясняют растущую популярность нового типа сварочных аппаратов и большинство профессионалов сегодня отдают им предпочтение.

## ШАГ В БУДУЩЕЕ, ДУГОВАЯ СВАРКА В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ AOTAI, ИСТОЧНИК СЕРИИ AMIG350P-Y

ПВ рассчитывается по времени горения дуги в течение 10-минутного цикла, при котором аппарат может варить без перегрева. При перегреве включается защита от перегрева, сварка остановится, вентилятор продолжает работать. Подождите 15 минут, пока вентилятор охладит аппарат.

После перегрева рекомендуется снизить силу тока или увеличить время отдыха аппарата (рисунок 2).

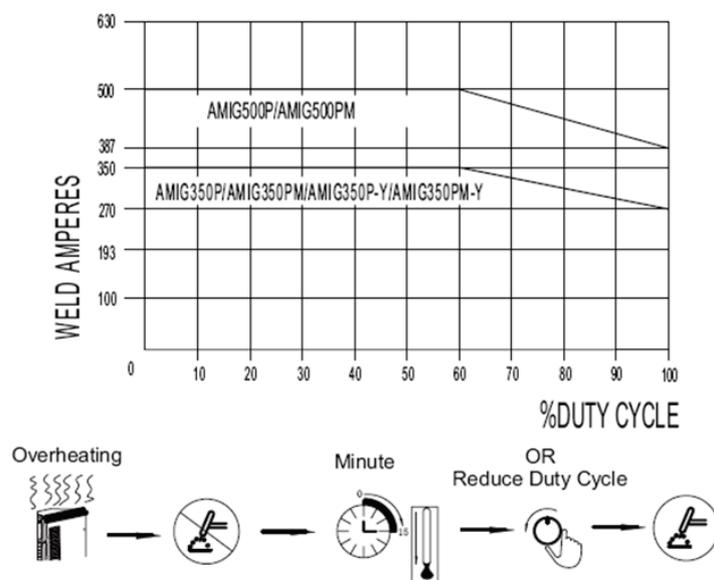


Рисунок 2 – Цикл ПВ

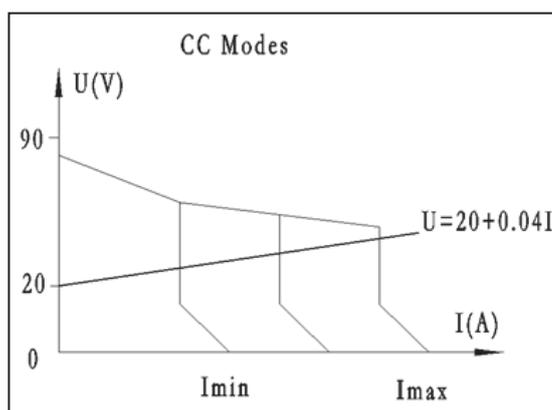
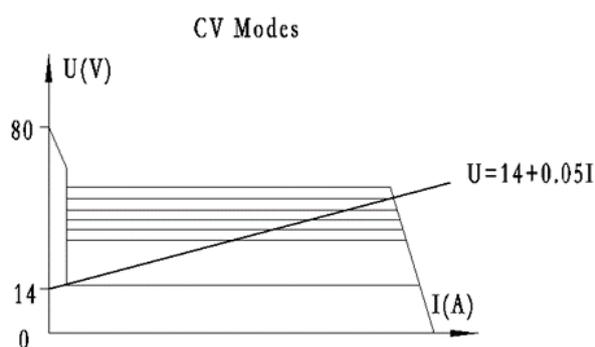


Рисунок 3 – Вольт-амперные характеристики



Рисунок 4 – Панель управления

**Выводы:**

1. На сегодняшний день, выбран актуальный сварочный источник для исследования;
2. Проведен теоретический анализ;
3. Сформированы преимущества.

**Останин Семён Юрьевич** – Ведущий специалист отдела продаж ООО «ИТС-Инжиниринг», г. Москва, Россия, e-mail: [ostanin@ets-engineering.ru](mailto:ostanin@ets-engineering.ru)

УДК 621.791

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА И МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКОЙ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

А. А. Попова, В. В. Волков

Данная работа посвящена исследованию качества соединений, выполненных способами механизированной сварки в среде защитных газов и автоматической сварки под слоем флюса при изготовлении горизонтальных стальных резервуаров, методом разрушающего и неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** стальные резервуары, автоматическая сварка под слоем флюса, механизированная сварка в среде защитных газов, визуально-измерительный контроль, ультразвуковой контроль, капиллярный контроль, испытания на растяжение.

Современная стратегия рыночных отношений ставит перед машиностроением задачу эффективного использования основных фондов, изготовления оборудования с наименьшими затратами, а также эффективность технологии изготовления и повышения качества производимой продукции. Данные действия определяют новый этап в развитии машиностроения, связанный с настоятельной необходимостью совершенствования технологии, технических характеристик изделий, повышения их качества. Одним из важнейших типов оборудования, широко распространенным в химической, нефтехимической, пищевой и ряду других отраслей промышленности является емкостное оборудование такое как резервуары, силосы, бункеры, химические реакторы, газгольдеры и пр. [1].

Основополагающим требованием при производстве резервуаров, является высокое качество сварных соединений. Это связано с тем, что агрессивная среда хранимых веществ, температуры и давление воздействуют на элементы оборудования. Что делает вопрос повышения качества сварных соединений актуальным.

Целью данной работы являются сравнительные исследования качества сварных соединений стальных резервуаров, выполненных способами автоматической сварки под слоем флюса (АФ) и механизированной сваркой в среде защитных газов (МП), путем проведения разрушающего и неразрушающего контроля на сварных соединениях.

Стальные резервуары предназначены для приема, хранения и выдачи жидких веществ, в частности для хранения нефти и нефтепродуктов. По типу конструкции, поставляемые стальные резервуары разделяют на вертикальные (РВС) и горизонтальные (РГС). Формат конструкции резервуара объемом до 150 м<sup>3</sup>, обеспечивают продукции мобильность, простоту эксплуатации и экономию пространства на объекте. Полный цикл производства данных резервуаров выполняется на территории завода-изготовителя – соответственно сборка и сварка проходит в производственных условиях. Горизонтальные резервуары, по типу расположения, разделяют на наземные (РГСН) и подземные (РГСП), показанный на рисунке 1.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА И МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКОЙ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ**



Рисунок 1 – Резервуар горизонтальный стальной наземный РГСР для хранения нефтепродуктов

Основные и составные части резервуара изготавливались из стали марки Ст3Сп5 – углеродистая сталь. Сварка обечайки выполнялась встык, корпус также оснащен диафрагмами жесткости, расстояние между которыми составляет 1500 мм – 1800 мм, в зависимости от размера завальцованных листов обечайки.

Для сварки стальных резервуаров были применены два способа сварки: механизированная сварка в среде защитных газов ( $CO_2 + Ar$ ) (таблица 1) и автоматическая сварка под слоем флюса (таблица 2) для сравнительных исследований качества сварных соединений.

Таблица 1 - Параметры процесса механизированной сварки в среде защитного газа (МП)

Номер слоя (валика)	Диаметр проволоки, мм	Род тока, полярность	Сварочный ток, А
1	1,2	Постоянный, обратная полярность	150

Таблица 2 - Параметры процесса автоматической сварки под слоем флюса (АФ)

Номер слоя (валика)	Диаметр проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, м/ч
1	2	335 -355	26-30	60

Механизированная сварка в среде  $CO_2 + Ar$  осуществлялась на сварочном аппарате сварочном источнике питания ESAB Aristo MIG U5000I с механизмом подачи сварочной проволоки ESAB Aristo FEED 4804, U8.

Автоматическая сварка под слоем флюса осуществлялась на сварочном источнике питания INTEGRAL INSAW-1250IGBT с механизмом подачи сварочной проволоки с INSAW, INTEGRAL 1000 IGBT.

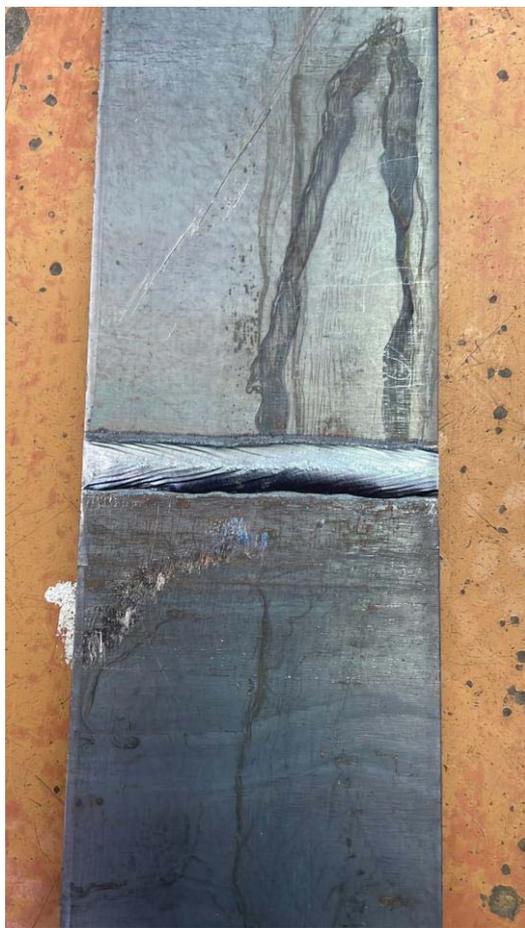
Визуальному контролю подвергались все законченные сварные соединения (рисунок 2). Нормы оценки качества сварных соединений производились согласно [1].

Перед визуальным контролем сварные швы и прилегающая к ним поверхность основного металла шириной не менее 20 мм (по обе стороны шва) были очищены от шлака, брызг расплавленного металла, окалины и других загрязнений.

Выявленные при визуальном и измерительном контроле дефекты, которые могут быть исправлены (удалены) без последующей заварки выборок, должны быть исправлены до проведения контроля другими методами.

Размеры и форма шва проверялись с помощью шаблонов, размеры дефекта с помощью мерительных инструментов.

При обнаружении недопустимых дефектов контрольные сварные соединения (КСС) отбраковывались



а)



б)

Рисунок 2 - Контрольные образцы сварных соединений.

а) КСС выполнено с помощью АФ ; б) КСС выполнено с помощью МП

Ультразвуковой контроль качества выполнялся согласно ГОСТ 55724-2013 на ультразвуковом аппарате серии УД 4-Т [2].

В результате проведения ультразвукового контроля были выявлены в некоторых изделиях дефекты, характер и эквивалентная площадь которых, не являлись браковочными.

В качестве дополнительного метода контроля для сравнительного анализа качества сварных соединений был проведен неразрушающий контроль капиллярным методом [3].

Для проведения капиллярного используются следующие необходимые материалы: индикаторный пенетрант, очиститель от пенетранта, гаситель пенетранта и проявитель пенетранта.

Пенетрант наносили на заранее очищенную поверхность сварных соединений с расстояния 15-20 см от контролируемой поверхности, рисунок 3. После нанесения, ожидали высыхания пенетранта в течении 8 минут, после чего приступили к очистке излишков пенетранта.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ СПОСОБАМИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА И МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКОЙ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ



а)



б)

Рисунок 3 – Образцы после нанесения пенетранта. а – образец, сваренный способом МП; б – образец, сваренный способом АФ

Контроль поверхности производили через 10 минут после нанесения проявителя, а также повторно через 1 час после нанесения.

По результатам капиллярного контроля сварных соединений на образцах, выполненных способом АФ дефектов обнаружено не было. На образцах контрольных сварных соединений, выполненных способом МП, видны дефекты формы сварного шва, в виде неравномерной чешуйчатости, также капиллярный контроль выделил брызги металла.

Испытание на статическое одноосное растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств» [4].

Образцы от каждой группы сварных соединений были испытаны на одноосное растяжение.

Результаты испытаний представлены на рисунке 4

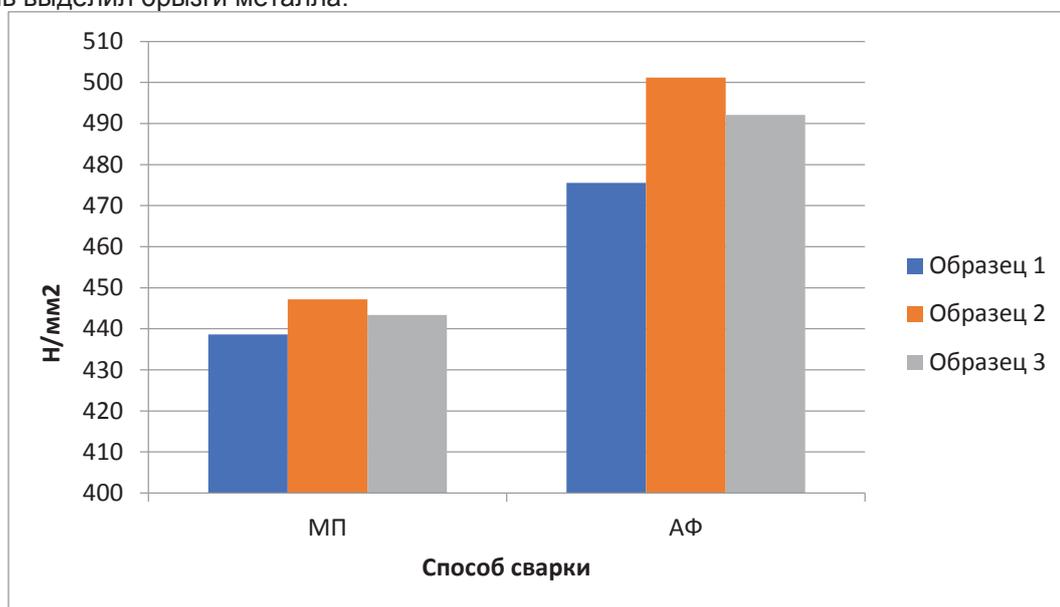


Рисунок 4 - Гистограмма сравнения предела прочности

Согласно представленным результатам (рисунок 4), среднее значение результатов на растяжение образцов, полученных механизированной сваркой в среде защитных газов, составляет  $441 \text{ Н/мм}^2$ , а автоматической сваркой под слоем флюса –  $489 \text{ Н/мм}^2$ .

### Выводы

1. Визуально-измерительный контроль позволил проконтролировать такие качества соединений как геометрия шва, а также проверить наличие поверхностных дефектов. Оба образца прошли визуально-

измерительный контроль, не допускаемых дефектов обнаружено не было.

2. В результате проведения ультразвукового контроля, согласно, на образцах контрольно-сварных соединений методом МП были выявлены дефекты, характер и эквивалентная площадь которых не являются браковочными.

3. Капиллярный контроль позволил наиболее контрастно сравнить качество сварных соединений, выполненных способами МП и АФ, и проверить наличие сквозных дефектов,

4. В ходе капиллярного контроля не допускаемых дефектов обнаружено не было. Таким образом неразрушающие методы контроля показали, что существенных отличий сварные соединения не имеют.

5. Проанализировав испытания на растяжение, способы МП и АФ соответствуют необходимым нормативным требованиям, АФ обладает некоторым преимуществом по качеству сварного шва в сравнении с МП. Среднее значение результатов на растяжение образцов, полученных механизированной сваркой в среде защитных газов, составляет  $441 \text{ Н/мм}^2$ , а автоматической сваркой под слоем флюса –  $489 \text{ Н/мм}^2$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 17032-2010. Резервуары стальные горизонтальные для нефтепродуктов. Технические условия: дата введения 2012-01-01. – Москва: Стандартиформ, 2011. – 11 с.

2. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые: дата введения 2015-07-01. – Москва: — Стандартиформ, 2014. – 40 с.

3. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования: дата введения 1981.01.07. – Москва: Стандартиформ, 2005. – 54 с.

4. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств: дата введения 1967-01-01. – Москва: Стандартиформ, 2006. – 77 с.

**Попова Анастасия Александровна** – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия e-mail: anast\_82@mail.ru;

**Волков Владимир Витальевич** – студент ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: anast\_82@mail.ru.

## ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАЛЬНЫХ ГИЛЬЗ

А. А. Ощепков, В. В. Виганд, И. А. Маценко, М. Е. Читпанова

Статья посвящена неразрушающим методам контроля качества и возможности их применения не только при контроле сварных швов, а также при контроле продукции машиностроительной отрасли промышленности. Неразрушающие методы контроля качества позволяют, не разрушая изделие произвести исследование и в случае отсутствия дефектов продолжить эксплуатацию данного изделия. Показано наглядное использование неразрушающих методов контроля качества при исследовании стальных гильз на наличие дефектов. Полученные результаты могут послужить основанием для составления внутреннего технологического регламента на контроль качества готовой продукции в случае получения спорной или недостоверной информации от заводских методов испытаний.

**Ключевые слова:** неразрушающие методы контроля качества, стальная гильза, ремонт, трещина, визуальный и измерительный контроль, магнитопорошковый контроль, контроль проникающими веществами.

Неразрушающие методы контроль качества являются важными составляющими при выпуске любого сварочного изделия. Методы, применяемые при контроле сварных изделий так же, можно использовать и при контроле изделий машиностроительного профиля. Рассмотрим на примере стальных гильз возможность применения неразрушающих методов контроля качества.

Стальные гильзы были выпущены заводом изготовителем, проверены на предмет отсутствия заводского брака и установлены в блок цилиндров специализированной техники, используемой на предприятии по выпуску станков и оборудования машиностроительного назначения. Но в ходе эксплуатации специализированная техника вышла из строя по причине попадания антифриза в блок цилиндров. Двигатель был разобран, стальные гильзы были вновь проверены заводским путем на отсутствия дефектов, но дефекты не были обнаружены. Но данный результат не устроил завод изготовитель т. к. они уже понесли финансовые потери и с целью полного исключения возможности брака в стальных гильзах решили отойти от стандартных методик контроля и прибегнуть к проведению неразрушающих методов с целью дальнейшей эксплуатации в случае отсутствия дефектов.

Первым этапом проведения контроля качества был предложен визуальный и измерительный контроль выпаленный по ГОСТ Р ИСО 17637-2014 [1] с целью нахождения по-

верхностных дефектов. В ходе контроля был применен набор для визуального и измерительного контроля «АРШИН СТАНДАРТ» (рисунок 1).



Рисунок 1 – Набор визуального и измерительного контроля «АРШИН СТАНДАРТ»

В ходе контроля наружных дефектов не было обнаружено. По этой причине были предложены два метода контроля, а именно магнитопорошковый (МПД) и контроль проникающими веществами (ПВК). Обоснованное решение применения этих методов состоит в том, что при помощи магнитопорошкового контроля очень сложно провести контроль на технологических буртиках гильз (рисунок 2) для выявления дефектов, находящихся на данных технологических буртиках, был использован контроль проникающими веществами.



Рисунок 2 – Технологические буртики гильзы

Перед проведением магнитопорошкового контроля по ГОСТ Р 56512-2015 [2], оборудование было проверено на специально подготовленном образце с целью выявления трещин (рисунок 3), оборудование успешно прошло этап контроля и было допущено к проведению контроля на стальных гильзах. Перед проведением магнитопорошкового контроля стальные гильзы были предварительно обезжирены. Следующим этапом было нанесение

специального проявительного вещества белого цвета с целью получения более контрастного индикаторного изображения. После этого был осуществлен контроль при помощи специализированного намагничивающего устройства (рисунок 4). В ходе проведения контроля на внешней поверхности стальных гильз не было обнаружено как поверхностных, так и сквозных трещин.



Рисунок 3 – Искусственная трещина для проверки корректной работы намагничивающего устройства

## ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАЛЬНЫХ ГИЛЬЗ



Рисунок 4 – Проведения магнитопорошковой дефектоскопии на стальных гильзах

Перед проведением следующего этапа гильзы были полностью обезжирены и подготовлены к проведению контроля проникающими веществами в соответствии с ГОСТ 18442-80. На внутреннюю поверхность был нанесен пенетрант (рисунок 5). После этого с внешней стороны были убраны случайно попавшие капли пенетранта и нанесен проявитель (рисунок 6).



Рисунок 5 – Нанесение пенетранта на внутреннюю поверхность стальной гильзы



Рисунок 6 – Нанесение проявителя на внешнюю сторону стальной гильзы

С целью выявления трещин малой величины гильзы были оставлены в данном положении (рисунок 7) на двое суток. Данное процедура была необходима чтобы пенетрант за двое суток успел проникнуть сквозь трещину малой величины и выйти на внешней стороне гильзы. По прошествию данного периода времени внешняя поверхность гильз была тщательно проверена на наличие проникновения пенетранта (рисунок 8). В ходе осмотра на поверхности не было обнаружено следов пенетранта что свидетельствует о том, что сквозных дефектов в данных гильзах нет.



Рисунок 7 – Стальные гильзы после нанесения проявителя



Рисунок 8 – Проверка проникновения пенетранта на поверхность проявителя

## ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТАЛЬНЫХ ГИЛЬЗ

В ходе анализа проведенной работы можно сделать вывод, что практическое применение методов неразрушающего контроля не ограничены только сварочным производством. Возможность применения методов неразрушающего контроля в других областях промышленности не регламентировано нормативной базой Российской Федерации. Данную работу можно совершенно спокойно применять и на аналогичных работах по проведению контроля качества как стальных, так и стальных гильз.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 17637-2014. Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением: дата введения 2016.01.01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 17 с.
2. ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы дата введения 2016.06.01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 56 с.
3. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования : дата введения 1981.01.07. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 54 с.

**Ощепков Алексей Александрович** – ассистент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: leha1996\_25@mail.ru;

**Виганд Валентин Викторович** – ведущий инженер-дефектоскопист, ООО «ПО «МЭС», Барнаул, Россия, e-mail: vigandvv@gmail.com

**Маценко Илья Александрович** – учебный мастер кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: mosenych@mail.ru;

**Читпанова Милена Евгеньевна** – лаборант кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: milena.chitpanova@bk.ru.

## ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ РЕМОНТЕ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЫ ПРЕССА

А. А. Ощепков, А. И. Щёткин, В. В. Виганд

Статья посвящена неразрушающим методам контроля качества и важности их применения на всех стадиях выпуска и ремонта сварных изделий. Неразрушающие методы контроля позволяют выявить в короткие сроки дефекты в сварном шве, в околосшовной зоне и в основном металле что позволяет оперативно приступить к ремонту сварного изделия. Показано наглядное использование неразрушающих методов контроля качества при ремонте стальной ленты прессы. Полученные результаты могут послужить основанием для составления внутреннего технологического регламента на исправление дефектов в стальной ленте прессы и проведение неразрушающих методов контроля качества с целью выявления дефектов после ремонта.

**Ключевые слова:** неразрушающие методы контроля качества, стальная лента прессы, ремонт, трещина, визуальный и измерительный контроль, магнитопорошковый контроль, контроль проникающими веществами.

Неразрушающие виды контроля качества выступают одними из наиболее важных видов контроля при монтаже, строительстве и ремонте сварных изделий. Применение неразрушающих видов контроля позволяет в кратчайшие сроки выявлять дефекты в сварных швах, которые могут повлечь за собой разрушение одного отдельно взятого узла так и всей сварной конструкции целиком.

Если рассматривать группу опасных технических устройств, то все нормативные документы на выпуск, ремонт или реконструкцию любого изделия или объекта строго прописывают какие методы неразрушающего контроля необходимо использовать.

В случае если рассматривать объекты, не входящие в группу опасных технических устройств то можно обратить внимание, что многие нормативные документы, по которым осуществляется выпуск, ремонт или реконструкцию любого изделия не регламентируют неразрушающие методы контроля качества. Нормативные документы составлены по принципу того, что в случае выхода из строя данного изделия не произойдет никаких опасных факторов для жизни человека и можно целиком поменять изделие на новое и запустить производственный цикл.

Но в случае кризисной ситуации достаточно сложно произвести поставку изделия или оборудования из-за рубежа. В этом случае руководителям предприятий приходится вынужденно приступать к ремонту вышедшего из строя узла. В ходе ремонта необходимо в обязательном порядке проводить

неразрушающие виды контроля качества до момента ремонта с целью выявления вида дефектов и его протяженности и после выполнения ремонта с целью выявления полного отсутствия дефектов на ремонтном участке изделия.

В результате рабочей эксплуатации в стальной ленте прессы появилась трещина малой величины, еле заметная человеческому взгляду. Согласно внутренней документации предприятия, лента прессы должна была быть полностью заменена на новую, но в результате сложной геополитической обстановки в мире, не представлялось возможным получить новую ленту для прессы. Но также внутренние документы регламентировали временный ремонт путем вырезания круга с трещиной и вваркой нового участка, но по причинам сказанным ранее получить материалы для создания ремонтной вварки не представлялось возможным. Для запуска производства было принято решение осуществить ремонт трещины путем заварки её при помощи ручной аргодуговой сварки в среде инертного защитного газа Ar. Для осуществления качественного ремонта трещины стальной ленты прессы необходимо установить точные границы трещины. Для этого перед началом ремонтных работ необходимо выполнить неразрушающий контроль следующими способами:

## ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ РЕМОНТЕ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЫ ПРЕССА



Рисунок 1 – Набор визуального и измерительного контроля «АРШИН СТАНДАРТ»

1. Визуальный и измерительный контроль (ВИК) – для определения формы трещины, величины раскрытия, а также иных поверхностных дефектов.
2. Магнитопорошковый контроль (МК) – для определения краев трещины, степени разветвленности, а также иных подповерхностных дефектов.
3. Контроль проникающими веществами (ПВК) - для определения краев трещины, степени разветвленности, а также иных поверхностных дефектов.

Первым этапом был проведен визуальный и измерительный контроль по ГОСТ Р ИСО 17637-2014 [1] участка с предположительным наличием трещины. Для проведения контроля качества был использован комплект визуального и измерительного контроля «АРШИН СТАНДАРТ» (рисунок 1).

В ходе контроля удалось выявить протяженную трещину (рисунок 2). Трещина видна невооруженным глазом. Имеет протяженность в 65 мм.



Рисунок 2 – Трещина, выявленная в ходе визуального и измерительного контроля

В ходе визуального и измерительного контроля удалось установить, что трещина имеет сквозной характер.

Для установления краев трещины и степени её разветвленности были проведены магнитопорошковый контроль по ГОСТ Р 56512-2015 [2] (рисунок 3), а также контроль проникающими веществами по ГОСТ 18442-80 [3] (рисунок 4-5).



Рисунок 3 – Проведение магнитопорошкового контроля

Для проведения магнитопорошкового контроля было использовано.

В данном случае оба метода являются взаимозаменяемыми, но имеют разную природу, было принято решение проводить оба для максимальной достоверности результатов контроля.

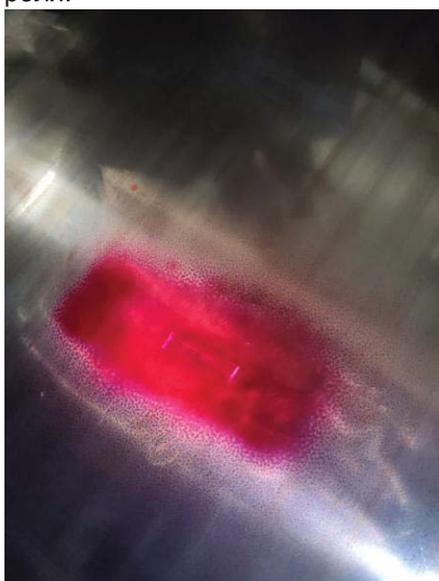


Рисунок 4 – Нанесение пенетранта на трещину

84



Рисунок 5 – Нанесение проявителя на трещину

В результате проведенного контроля установлено, что трещина не разветвленная, имеет четкие границы. Далее по индикаторному следу от пенетранта было выполнена разделка с помощью УШМ с небольшим припуском за края трещины (рисунок 6).



Рисунок 6 – Разделка трещины перед сваркой

Ремонт трещины был произведен с двух сторон с зачисткой корня шва с помощью ручной аргодуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа Ar с применением специализированного присадочного материала. На рисунке 7 изображен ремонтный сварной шов.

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 Т.2

## ПРОВЕДЕНИЕ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИ РЕМОНТЕ СТАЛЬНОЙ ЛЕНТЫ ПРЕССА



Рисунок 7 – Ремонтный сварной шов

После выполнения сварного шва, был проведен визуальный и измерительный контроль, в результате которого дефектов в сварном шве не было обнаружено.

Для осуществления рабочего процесса было снято усиления в один уровень с основным металлом ленты.

Последним этапом неразрушающего контроля был проведен повторный капилляр-

ный контроль (рисунок 8) зоны ремонта с обеих сторон ленты прессы. В данной работе это наиболее важный этап, так как именно он характеризует качество проведенной ремонтной работы. С помощью капиллярного метода можно определить не заваренную трещину, поры, подрезы основного металла, не видимые невооруженным глазом.



Рисунок 8 – Результат проведенного капиллярного контроля

В результате ремонтных работ удалось в короткое время осуществить ремонт стальной ленты и запустить технологический процесс выпуска готовой продукции. В современных реалиях появилось представление, что в случае поломки какого-либо узла или агрегата всегда есть возможность заказать вышедший узел или агрегат в любой точке мира и он будет доставлен в короткие сроки и производство не будет простаивать. Но в случае кризиса приходится отходить от заводских инструкций по ремонту и вводить в работу методы, благодаря которым текущее производство может работать без остановки в ожидании запястных частей.

Полученный опыт в данной работе можно использовать в дальнейшем при аналогичных ситуациях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р ИСО 17637-2014. Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением: дата введения 2016.01.01. - Москва : Стандартиформ, 2015. – 17 с.
2. ГОСТ Р 56512-2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы дата введения 2016.06.01. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 56 с.
3. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования : дата введения 1981.01.07. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 54 с.

**Ощепков Алексей Александрович** – ассистент кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: leha1996\_25@mail.ru;

**Щёткин Александр Игоревич** – старший преподаватель кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: aleksandr.shetkin@inbox.ru;

**Виганд Валентин Викторович** – ведущий инженер-дефектоскопист, ООО «ПО «МЭС», Барнаул, Россия, e-mail: vigandvv@gmail.com.

## ПРОВЕДЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. С. Киселёв, Н. С. Ерофеев

Приведены основные термины и определения, нормативная документация по вибродиагностическому контролю (ВД). Показаны возможности и особенности применения вибродиагностического контроля (вибродиагностики) для диагностирования подшипниковых узлов горнодобывающего оборудования, описаны этапы проведения контроля, приведены требования к персоналу и средствам вибродиагностического контроля, объемы и нормы оценки допустимости уровня вибрации по результатам ВД.

**Ключевые слова:** *вибрация, вибродиагностический контроль, подшипниковые узлы, вибросмещение (амплитуда), виброперемещение, виброскорость, виброускорение.*

Вибродиагностический контроль – метод (вид) неразрушающего контроля (НК), базирующийся на мониторинге и анализе ключевых показателей вибрации (колебаний), которую создает функционирующий исследуемый объект. ВД позволяет контролировать фактическое состояние и своевременно выявить отклонения в работе промышленного оборудования.

Особые требования к качеству работ по вибродиагностическому контролю предъявляются на опасных производственных объектах (ОПО), к которым в том числе относится горнодобывающее оборудование (ГДО). Гарантией соответствия заявленным требованиям служит сертификация и аттестация персонала и лабораторий контроля.

Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности "Основные требования к проведению неразрушающего контроля технических устройств, зданий и сооружений на опасных производственных объектах", действующих с 1 января 2021 г. на основании приказа Ростехнадзора от 1 декабря 2020 года № 478 регламентировано, что лаборатории и работники, выполняющие НК технических устройств, зданий и сооружений на ОПО, должны подтвердить компетентность по установленной области НК в независимых органах по аттестации системы НК, сформированной в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 28 марта 2001 г. № 241 "О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации".

Российским обществом по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД) создана система НК, применяемая в целях подтверждения компетентности специалистов и лабораторий неразрушающего контроля (ЛНК), осуществляющих деятельность на ОПО (СНК ОПО РОНКТД).

СНК ОПО РОНКТД применяется при осуществлении деятельности по аттестации специалистов и лабораторий неразрушающего контроля для выполнения работ по неразрушающему контролю технических устройств (в т.ч. передвижных), применяемых (эксплуатируемых) на опасных производственных объектах, зданиях и сооружениях на опасных производственных объектах, предназначенных для осуществления технологических процессов, хранения сырья или продукции, перемещения людей и грузов, локализации и ликвидации последствий аварий.

Документом, устанавливающим порядок проведения ВД, объемы и нормы оценки допустимости уровня вибрации контролируемого объекта является разработанная и утвержденная в установленном порядке технологическая инструкция (методика) проведения вибродиагностического контроля.

Основные термины и определения в области контроля вибрации приведены в ГОСТ 24346-80, например:

Вибрация – механические колебания, измеряемые преобразователем ускорения в точке контроля объекта мониторинга и диагностики.

## ПРОВЕДЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Вибрационная диагностика – техническая диагностика, основанная на анализе вибрации объекта диагностирования.

Вибрационное диагностирование – получение информации о наличии, виде и величине типовых дефектов по вибрации путем сравнения с пороговыми значениями диагностических параметров в виде роста уровней отдельных составляющих вибрации и относительной величины их периодических флуктуаций (модуляции).

Вибросмещение (амплитуда) – пределы перемещения точки измерения в момент вибрации.

Виброперемещение – составляющая перемещения, описывающая вибрацию.

Виброскорость – скорость перемещения точки контроля с момент прецессии вдоль оси измерения, производная виброперемещения по времени.

Виброускорение – значение вибрации, напрямую связанное с вызвавшей ее силой, производная виброскорости по времени.

Для установления причины вибраций проводят частотный анализ, устанавливающий все частотные составляющие, вызывающие колебания машин и оборудования, тремя способами:

1. Гармонический анализ вибраций – наиболее точный способ обнаружения гармонирующих составляющих (гармоник) вибрации. Помимо наличия датчика вибрации нуждается в фотоэлектрическом или лазерном датчике для определения частоты вращения машинного вала.

2. Полосовое выделение частот – более простой способ, действующий посредством настройки интегрированных полосовых фильтров на определенную частоту. Фильтр пропускает те из них, что совпадают с его характеристиками. Изменяя положения фильтра с помощью регулятора, можно конкретизировать частотные составляющие, присутствующие в общем вибрационном фоне.

3. Перестраиваемые фильтры, которыми оснащено большинство виброизмерительных аппаратов, могут автоматически изменять частоту пропускания. Изменения индикатора, фиксирующиеся самописцем в виде диаграммы, отражают конкретные частотные составляющие, а также их количественный объем в общем вибрационном уровне.

Частотные составляющие, выделяемые в процессе анализа спектра, подразделяют на три группы:

Гармоники – крайние точки на частотах, кратных частоте вращения, свидетельствующие о неуравновешенности, несоосности или ослаблении соединений.

Несинхронные составляющие – свойственны частотам, некратным частоте цикла, что говорит о наличии дефектов подшипников и ремней.

Субгармоники – располагаются ниже частоты вращения и могут отражать вихри в масляном клине подшипника, излишнее трение между деталями, повреждения ременной передачи и ослабление соединений.

Существуют следующие виды дефектов:

Подшипники качения:

Дисбаланс; перекося подшипника при посадке; неоднородный радиальный натяг; износ дорожки качения наружного кольца; износ дорожки качения внутреннего кольца; коррозия, трещины на дорожке качения наружного или внутреннего кольца; коррозия, трещины на поверхности тел качения; износ сепаратора; проскальзывание кольца; ухудшение качества смазки.

Подшипники скольжения:

Дисбаланс; неуравновешенность вала; перекося подшипника; автоколебания вала; износ вкладыша подшипника; удары в подшипнике.

В соответствии с требованиями безопасности все лица, участвующие в выполнении вибрационного контроля, должны иметь группу по электробезопасности не ниже второй, а также пройти перед допуском к проведению контроля соответствующие инструктажи.

При выполнении ВД на месте производства контроля должны быть созданы безопасные условия; в том числе в необходимых случаях должно быть выполнено крепление откосов траншей, монтаж укрытий установлены трапы, лестницы, леса, ограждения, подмости, люльки, передвижные вышки или другие вспомогательные устройства, обеспечивающие оптимальный доступ (удобство работы) специалиста к контролируемому объекту, а также обеспечена возможность подключения ламп местного освещения напряжением 12 В.

Вибродиагностический контроль подшипниковых узлов горно-добывающего оборудования должен выполняться специалистами испытательной лаборатории, аттестованной в соответствии с СНК ОПО РОНКД 03-2021.

Лаборатория контроля качества должна быть укомплектована обученными, аттестованными работниками, обеспечена необходимой нормативной документацией (НД), оснащена оборудованием, приборами и инструментами.

Место проведения контроля должно обеспечивать свободный и безопасный доступ к контролируемому объекту. Освещенность контролируемых поверхностей должна быть достаточной для достоверного выявления дефектов и составлять не менее 500 Лк. Подготовка контролируемых поверхностей в обязанности специалиста по контролю не входит.

К работам по ВД допускаются аттестованные согласно СНК ОПО РОНКТД 02-2021 специалисты неразрушающего контроля, прошедшие обучение с учетом специфики контроля и успешно выдержавшие квалификационные испытания. К руководству лабораторией контроля качества допускаются аттестованные специалисты, имеющие удостоверение на право производства работ и выдачи заключений по результатам неразрушающего контроля, стаж работы по данной специальности не менее 3-х лет, а также квалификацию по дефектоскопии не ниже II-го уровня в соответствии с СНК ОПО РОНКТД. Аттестованные специалисты ВД, осуществляющие руководство работами по ВД и непосредственно выполняющие ВД, должны пройти аттестацию в области промышленной безопасности. Правом выдачи заключений по результатам ВД обладают специалисты, имеющие II и III уровень квалификации.

Средства измерения вибрации и диагностирования по вибрации должны соответствовать требованиям ГОСТ 30296-95, должны быть утвержденного типа и внесены в реестр средств измерений. Все приборы должны иметь паспорта завода-изготовителя, техническое описание, руководство по эксплуатации, соответствующие инструкции и методики их применения.

Работоспособность средств ВД должна поддерживаться путем бережного отношения к ним со стороны персонала и соблюдения утвержденного графика поверки (калибровки) и технического обслуживания средств НК.

Измерительные приборы и инструменты должны периодически, а также после ремонта проходить поверку (калибровку) в метрологических службах, аккредитованных Госстандартом России. Срок проведения поверки (калибровки) устанавливается НД на соответствующие приборы и инструменты.

Подготовку объектов к ВД производят подразделения предприятий и организаций, непосредственно эксплуатирующее горно-добывающее оборудование.

Датчики вибрации на время измерений устанавливаются на предварительно подготовленную поверхность подшипниковых узлов с помощью магнитного держателя в радиальном к оси вращения направлении.

Для ВД и мониторинга состояния подшипников качения должны проводиться абсолютные измерения виброускорения в контрольных точках, в полосе частот: нижняя граница не выше 20 Гц верхняя не ниже 10 кГц в соответствии с ГОСТ Р 52545.1-2006. Относительные измерения вибрации должны проводиться в частотном диапазоне с верхней границей не ниже 15 кГц.

При ВД узлов и мониторинга состояния подшипниковых узлов горно-добывающего оборудования должны проводиться абсолютные измерения виброускорения в контрольных точках, в полосе частот: нижняя граница не выше 2 Гц верхняя не ниже 1000 Гц в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Относительные измерения вибрации должны проводиться в частотном диапазоне с верхней границей не ниже 15 кГц.

Измерения и регистрация контролируемых параметров вибрации должны проводиться на всех штатных точках ВД, определяемых в зависимости от конструкции агрегата.

Измерение и регистрация параметров вибрации агрегатов должны проводиться на всех штатных точках в соответствии с ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009, ГОСТ 10816-1-97, в трех ортогональных проекциях: вертикальной, осевой и горизонтальной (рисунок 1).

## ПРОВЕДЕНИЕ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

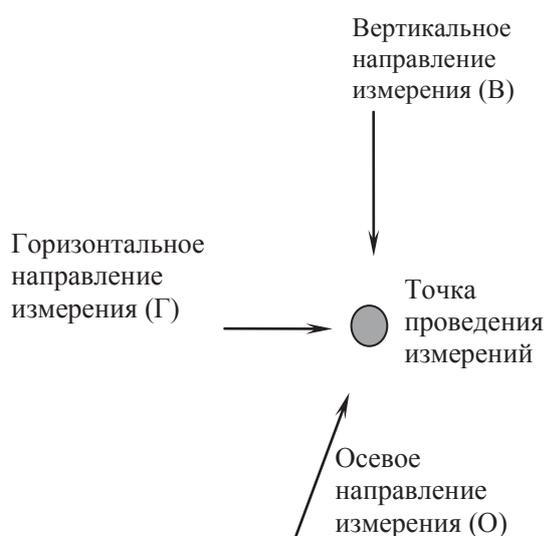


Рисунок 1 - Направления измерения параметров вибрации

Для крупных агрегатов (массой более 2000 кг и частотой вращения не более 3000 об/мин) дополнительные точки контроля вибрации устанавливаются в двух направлениях – в радиальном и тангенциальном в зоне наибольшей вибрации (выше уровня опорной поверхности).

В качестве нормируемого параметра вибрации элементов ВД устанавливается среднеквадратичное значение виброскорости Ускз в полосе частот 5-1000 Гц.

Виброанализатор следует располагать в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1-97:

вертикальный – на верхней крышке корпуса, по оси вала, в средней части крышки;

горизонтальный – ниже шва горизонтального разреза крышки (в зоне «погружения» вала);

осевой – в направлении оси вала, на массивном участке крышки.

При расположении виброанализатора следует избегать установки на тонкостенных участках и стыках. Каждая из выбранных точек должна быть ясно отмечена на агрегате и зарегистрирована в журнале (протоколе).

Крепление виброанализатора к поверхности агрегата может осуществляться резьбовым соединением на шпильке, с помощью магнита, на липкой ленте, с помощью воска и с помощью щупа (при оперативном контроле вибрации). Поверхность контакта с виброанализатором должна быть ровной, хорошо обработанной и чистой. Шероховатость поверхности контакта не должна превышать  $Ra=2,5$ .

При проведении вибродиагностики подшипников качения рекомендуется использовать четыре вида порогов:

– на амплитуды любых гармонических составляющих в автоспектре вибрации и подшипниковых составляющих, характеризующих конкретные виды дефектов;

– на спектральную плотность случайных составляющих в автоспектре вибрации в широких полосах частот;

– на пиковое и среднеквадратичное значение (СКЗ) ультразвуковой вибрации в выбранной полосе частот;

– на глубину модуляции высокочастотной вибрации подшипникового узла конкретными частотами.

По результатам вибродиагностики составляется протокол по ВД горнодобывающего оборудования, содержащий оценку технического состояния элементов с указанием возможных дефектов (при оценке технического состояния «допустимо» или «недопустимо»), повлекших за собой повышение уровня интенсивности вибрации.

Оценки соответствуют следующему техническому состоянию:

Зона А – «хорошо».

Зона В – «удовлетворительно».

Зона С – «допустимо».

Зона D – «недопустимо».

В протоколе должны быть указаны:

- дата измерения, наименование организации и фамилии лиц, проводивших измерения;

- рабочие параметры вибродиагностического контроля, при которых проводились измерения;

- схема контрольных точек вибродиагностики;

- сведения об использованных аппаратных и программных средствах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНК ОПО РОНКТД 02-2021 – Аттестация специалистов неразрушающего контроля.

2. СНК ОПО РОНКТД 03-2021 – Аттестация лабораторий неразрушающего контроля.

3. ГОСТ 24346-80 – Вибрация. Термины и определения.

4. ГОСТ 56542-2019 – Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.

5. ГОСТ Р 53578-2009 – Вибрация. Балансировка. Руководство по применению стандартов в области балансировки.

6. ГОСТ Р ИСО 2041-2012 – Вибрация, удар и контроль технического состояния

7. ГОСТ ИСО 7919-1-2002 – Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах

8. ГОСТ ИСО 10326-1-2002 – Вибрация. Оценка вибрации сидений транспортных средств по результатам лабораторных испытаний. Часть 1. Общие требования

9. ГОСТ ИСО 10816-1-97 – Вибрация контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях.

10. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин-1.

11. ГОСТ Р ИСО 10817-1-99 – Вибрация. Системы измерений вибрации вращающихся валов. Часть 1. Устройства для снятия сигналов относительной и абсолютной вибрации.

12. ГОСТ Р 52545.1-2006 – Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 1. Основные положения.

13. ГОСТ Р 52545.1-2006 – Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 1. Основные положения.

14. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 – Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы.

15. ГОСТ 30296-95 – Аппаратура общего назначения для определения основных параметров вибрационных процессов. Общие технические требования.

16. ИТС 16-2016 – Горнодобывающая промышленность. Общие процессы и методы.

**Киселев Вадим Сергеевич** – к.т.н., доцент, кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: vadserkis@yandex.ru.

**Ерофеев Никита Сергеевич** – магистрант кафедры «Малый бизнес в сварочном производстве», ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, e-mail: erofeev\_nikita99@mail.ru.

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ НА СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ

А. В. Собачкин, В. И. Яковлев, М. Н. Сейдуров

В работе проведено исследование по подбору режимов ручной дуговой наплавки порошковыми электродами, содержащими СВС-материал «карбид титана – никель-хромовая матрица». Содержание карбидной фазы варьировалось от 10 до 30 %. Для определения рациональных режимов нанесения покрытий ручной дуговой наплавкой проводились несколько серий экспериментов с построением внешней вольт-амперной характеристики. Учитывались пять показателей сварочных свойств: начальное зажигание дуги, стабильность проведения процесса наплавки, эластичность сварочной дуги, величина разбрызгивания металла, качество формирования наплавленного валика. Кроме того, установлено влияние режимов наплавки на свойства сформированных износостойких покрытий. В работе рассчитаны значения эффективной погонной энергии, определяющие режимы наплавки порошковым электродом из СВС-материалов. Эффективная погонная энергия коррелирует со структурой и свойствами сформированного покрытия. При увеличении значений погонной энергии повышается температура сварочной ванны, что вызывает частичное растворение упрочняющей карбидной фазы. Погонная энергия не влияет на микротвердость наплавленного покрытия – микротвердость варьируется от 650 до 900 НВ. При повышении эффективной погонной энергии снижается относительная износостойкость наплавленных покрытий из-за снижения количества карбидного зерна в покрытии. В результате проведенных исследований определены рациональные режимы выполнения наплавки. Наплавку следует выполнять инверторным источником питания постоянного тока, на обратной полярности, сила сварочного тока 200-220 А, скорость наплавки – 0,24 см/с.

**Ключевые слова:** композиционный материал, карбид титана, никель-хромовая матрица, порошковый электрод, электродуговая наплавка, вольт-амперная характеристика, погонная энергия, объемная доля карбидов, микротвердость, износостойкость.

Резание почвы или растений – это одна из самых распространенных технологических операций в сельском хозяйстве: вспашка, культивация и боронование составляют порядка 70% всего объема механизированных работ. При взаимодействии с грунтом рабочие органы сельскохозяйственных машин подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию [1]. От состояния лезвия рабочего органа сельхозмашины зависят такие показатели работы, как степень подрезания сорных растений; средняя глубина культивации, устойчивость хода лап по глубине [1]. К основным рабочим органам можно отнести лемеха и отвалы плугов, диски тяжелых борон, лапы и наральники культиваторов и сеялок.

В процессе изнашивания, например, стрелчатых лап режущие кромки затупляются. На кромке лезвий образуется обратная фаска, изменяется форма лапы. Затупившиеся лапы увеличивают тяговое сопротив-

ление, снижают производительность, при этом расход топлива возрастает на 15...20 %.

Материалы, повышающие износостойкость рабочих органов сельхозтехники и применяемые в настоящее время, уже не могут удовлетворить потребности современных фермеров по своим стоимостным показателям или по уровню физико-механических свойств [2, 3]. Выход из сложившейся ситуации – это синтезировать новые композиционные наплавочные смеси, обеспечивающие длительную работу в сложных агрессивных условиях сельского хозяйства (абразивный износ, коррозия и т.п.).

Следует отметить, что хозяйства Алтайского края ежегодно потребляют свыше 200 тыс. только одних лап культиваторов и сеялок, которые изнашиваются чрезвычайно быстро. Для фермерского хозяйства любой величины наиболее предпочтителен вариант самостоятельного повышения износостойкости рабочих органов сельхозмашин. Напри-

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ НА СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ

мер, технология ручной дуговой наплавки позволяет увеличивать срок службы деталей, доступна в любой станции технического обслуживания и не требует высокой квалификации сварщика.

Существуют технологии, позволяющие повысить износостойкость изделий. Они основаны на использовании твердых сплавов. Например, карбиды металлов, распределенные в наплавленном покрытии, увеличивают его твердость, повышая тем самым износостойкие свойства изделия в целом. Это способствует повышению ресурса работы высоконагруженных рабочих органов сельхозмашин. Недостаток заключается в неравномерном распределении карбидов по объему наплавки.

Избежать подобной ситуации позволяет механически активированный самораспространяющийся синтез карбидов в матрице. Для этого смесь исходных порошковых реагентов в нужном соотношении подвергается механической активации в планетарной шаровой мельнице. После этого в шихте инициируется реакция синтеза карбида, который образуется внутри пластичной матрицы с равномерным распределением упрочняющей фазы. Затем синтезированный СВС-материал можно использовать для нанесения покрытия, например, с помощью порошкового электрода. Для экспериментальных исследований была использована полая трубка (основа). Потом композит засыпается внутрь основы, и на электрод наносится обмазка. После этого электродом можно проводить наплавку.

Общая схема получения износостойкого слоя в этом случае заключается в следующем:

- механоактивационная обработка порошковых компонентов;
- реакция высокотемпературного синтеза карбидов в матрице;
- наплавка изделия порошковым электродом.

Однако немаловажным является вопрос правильных режимов наплавки покрытий разработанным порошковым электродом. Рационализация режимов наплавки СВС-механокомпозитов является целью настоящей работы.

### Объекты и методы исследования

Для определения рациональных режимов нанесения покрытий ручной дуговой наплавкой проводились несколько серий экспериментов с построением ВАХ – внешней статической (вольт-амперной) характеристики.

*ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 Т.2*

При этом, согласно РД 03-614-03 [4] учитывались пять показателей сварочных свойств: начальное зажигание дуги, стабильность проведения процесса наплавки, эластичность сварочной дуги, величина разбрызгивания металла, качество формирования наплавленного валика.

Для построения ВАХ источника питания применялись измерительные клещи марки АРРА-А16 и балластный реостат РБ-302У2 (1...4 шт.). При подключении сварочного инверторного источника питания к балластному реостату устанавливали величину номинального тока. Замер значения силы сварочного тока проводили в течение 2 минут. При этом, отклонение величины сварочного тока от номинального значения не превышало 5 %.

Для определения максимального и минимального предела регулирования сварочного тока выполняли изменение тока от минимального до максимального значения с замером тока (отклонение от минимального и максимального значения не превышало 5 %).

При установлении величины напряжения холостого хода и номинального рабочего напряжения источника питания производили замеры напряжения на клеммах сварочного инвертора, как без нагрузки, так и под нагрузкой. Напряжение холостого хода не превышало 90 В.

Для оценки вида ВАХ при подключении активной нагрузки к выходным клеммам источника питания определялись соответствующие значения тока и напряжения (таблица 1).

Данные для проверки вида ВАХ, номинального сварочного тока и его диапазона регулирования приведены в таблице 2.

В ходе экспериментов были использованы порошковые электроды следующих составов, содержащие синтезированные методом высокотемпературного синтеза карбидные фазы (остальное – никель-хромовая матрица):

- 1) 10 % TiC, 2) 20 % TiC, 3) 30 % TiC, 4) 15 % TiC + 5 % SiC, 5) 15 % TiC + 5 % WC, 6) 15 % TiC + 5 % SiC + 5 % WC.

### Результаты и их обсуждение

В ходе определения рациональных режимов наплавки было выполнено две серии экспериментов.

Первая серия экспериментов позволила определить вид ВАХ источника питания и выполнить оценку рабочего диапазона регулирования сварочного тока при выполнении наплавки разработанным порошковым электро-

дом. Результаты замеров приведены в таблицах 3–5 и на рисунке 1. Вторая серия экспериментов была выполнена при наилучших показателях сварочных свойств (согласно РД 03-614-03), а именно: начальное зажигание дуги – легкое, стабильность процесса наплавки – высокая, разбрызгивание металла – малое, качество формирования шва – очень хорошее, эластичность дуги – высокая. Ре-

зультаты измерений приведены в таблицах 6–7. Таким образом, подобранные режимы по сварочному току от 200 до 220 А являются наиболее рациональными для наплавки экспериментальными порошковыми электродами [5, 6].

Таблица 1 – Проверка основных технических характеристик ТИТАН-220

Наименование показателя	Паспортные данные источника питания	Экспериментальные результаты	Заключение
Номинальный сварочный ток, А	220	230	Соответствует
Пределы регулирования сварочного тока, А	40...220	40...280	Соответствует
Напряжение холостого хода, В	Не более 100	80	Соответствует
Вид внешней вольт-амперной характеристики (ВАХ)	Крутопадающая	Крутопадающая	Соответствует

Таблица 2 – Зависимость напряжения на выходе сварочного выпрямителя от тока нагрузки

BCX, Iкз, макс	соотв.	U, В	73	70	61	43	28	14
		I, А	0	35	100	170	220	300

Таблица 3 – Образец № 1

U, В	73	70	61	43	28	14	0
I, А	0	35	100	170	220	300	390

Таблица 4 – Образец № 2

U, В	85	82	78	60	30	10	0
I, А	0	40	50	60	65	70	75

Таблица 5 – Образец № 3

U, В	80	72	60	40	20	0
I, А	0	50	75	100	115	125

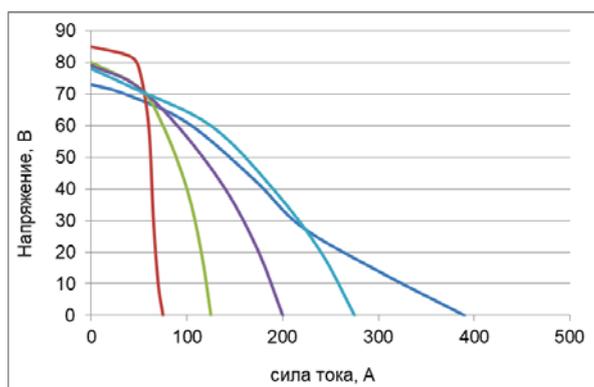


Рисунок 1 – Внешняя вольт-амперная характеристика источника питания

Таблица 6 – Образец № 1

U, В	79	73	60	40	20	0
I, А	0	45	90	140	175	200

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ НА СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ

Таблица 7 – Образец № 2

<i>U</i> , В	78	72	60	40	20	0
<i>I</i> , А	0	43	125	190	240	275

Для установления взаимосвязи режимов наплавки со свойствами и структурой наплавленного металла была определена величина эффективной погонной энергии по формуле (ГОСТ Р ИСО 857-1-2009) [7]:

$$\eta = \frac{\eta IU}{V_n}$$

где *I* – сила тока, А; *U* – напряжение дуги, В; *V<sub>n</sub>* – скорость наплавки, см/с;  $\eta$  – эффективный КПД нагрева (0,5-0,65).

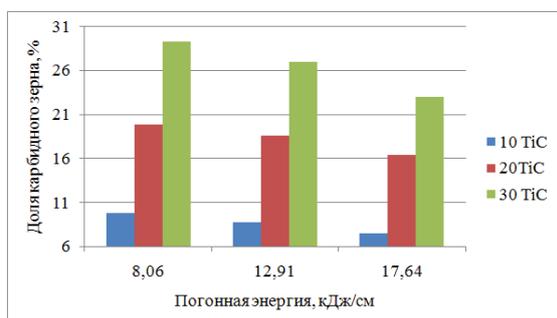
Результаты расчета сведены в таблицу 3.

С увеличением погонной энергии при наплавке температура ванны расплава по-

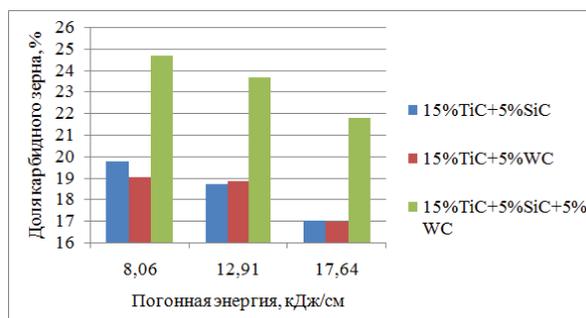
вышается, вызывая частичное растворение карбидов. Об этом свидетельствует уменьшение объемной доли упрочняющих частиц (рисунок 2) [8]. Средний уровень микротвердости металла, полученного при наплавке, независимо от величины погонной энергии и объемной доли карбидных частиц находится в пределах 650-900 НВ (рисунок 3) [9]. С увеличением погонной энергии увеличивается весовой износ образцов, что связано с уменьшением доли карбидной фазы в наплавленном металле (рисунок 4) [10].

Таблица 3 – Расчет эффективной погонной энергии

Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, см/с	Погонная энергия, кДж/см
150	40	0,17	17,64
200	31	0,24	12,91
250	20	0,31	8,06

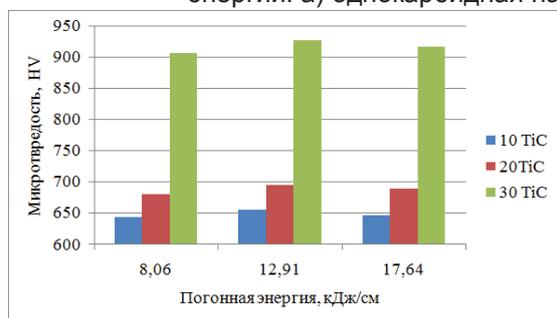


а)

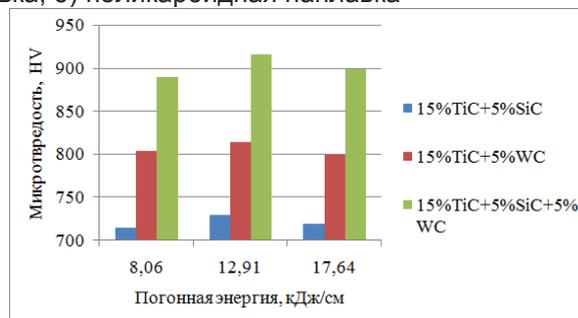


б)

Рисунок 2 – Изменение объемной доли карбидного зерна в зависимости от величины погонной энергии: а) однокарбидная наплавка, б) поликарбидная наплавка



а)



б)

Рисунок 3 – Изменение среднего значения микротвердости наплавленного металла в зависимости от величины погонной энергии: а) однокарбидная наплавка, б) поликарбидная наплавка

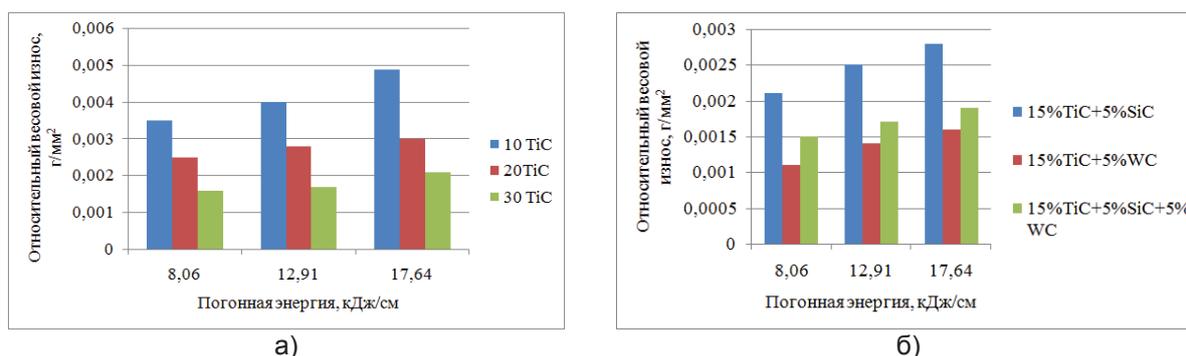


Рисунок 4 – Изменение относительной износостойкости наплавленного металла в зависимости от величины погонной энергии: а) однокарбидная наплавка, б) поликарбидная наплавка

### Выводы

Исходя из данных исследований, установлены наиболее рациональные режимы наплавки. Наплавку следует выполнять инверторным источником питания постоянного тока, на обратной полярности, сила сварочного тока 200-220 А, скорость наплавки – 0,24 см/с [11].

Работа выполнялась в рамках государственного задания FZMM-2020-0002.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишков А. В., Кривочуров Н. Т., Мишустин Н. М., Иванайский В. В., Максимов А. А. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. Т. 71. № 9. С. 71–75.
2. Иванайский В. В., Кривочуров Н. Т., Желтунов М. Г., Коваль А. В. Индукционная наплавка твердых сплавов на частоте 880 кГц // Технология машиностроения. 2009. № 5. С. 22–23.
3. Тимошенко В. П., Иванайский В. В., Русаков А. А. Инновационная технология индукционной наплавки рабочих органов почвообрабатывающих машин на примере полевой доски пропашных плугов // Ползуновский альманах. 2011. № 4. С. 51–55.
4. РД 03-614-03. Порядок применения сварочного оборудования при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции технических устройств для опасных производственных объектов. утвержден 2003–06–19. М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003.
5. Собачкин А. В., Яковлев В. И., Ситников А. А. Механически активируемый самораспространяющийся высокотемпературный синтез как перспективная технология получения порошковых наплавочных материалов // Инновации в машиностроении : сборник трудов Международной молодежной конференции. Томск, 2012. С. 168–172.
6. Собачкин А. В., Яковлев В. И., Ситников А. А. Получение ультрадисперсных порошковых на-

плавочных материалов методом механически активируемого самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: получение, свойства, применение. VI Ставеровские чтения: труды научно-технической конференции с международным участием. Красноярск, 2012. С. 273–275.

7. ГОСТ Р ИСО 857-1-2009. Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Процессы сварки металлов. Термины и определения. Введ. 2010–07–01. М.: Изд-во стандартов, 2010. 54 с.

8. Яковлев В. И., Собачкин А. В., Ситников А. А. Технология применения методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодых ученых. Томск, 2013. С. 168–171.

9. Собачкин А. В., Яковлев В. И., Ситников А. А. Наплавочные композиционные материалы с карбидным упрочняющим зерном, полученные методом механостимулированного СВС в никель-хромовой матрице // Сварка и родственные технологии: материалы VII научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Киев, 2013. С. 161.

10. Собачкин А. В., Яковлев В. И., Ситников А. А., Тищенко А. И. Особенности применения методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания многокомпонентных композиционных наплавочных материалов // New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering: XIV International scientific conference. Czestochowa, 2013. P. 329–332.

11. Yakovlev V. I., Sobachkin A. V., Loginova M. V., Sitnikov A. A., Savin A. A. Perspective composite welding materials with carbide reinforcing grain, obtained by mechanically stimulated SHS in nickel-chromium matrix // Fundamental Bases of Mechanochemical Technologies: the book of abstracts of the IV International conference. Novosibirsk, 2013. – P. 221.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ НА СВОЙСТВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СВС-МАТЕРИАЛОВ

**Собачкин Алексей Викторович** – к.т.н., с.н.с.  
ПНИЛ СВС, АлтГТУ им. И.И. Ползунова,  
e-mail: [anicpt@rambler.ru](mailto:anicpt@rambler.ru);

**Сейдуров Михаил Николаевич** – к.т.н., и.о. за-  
ведующего кафедрой МБСП, АлтГТУ им.  
И.И. Ползунова.

**Яковлев Владимир Иванович** – к.т.н., доцент  
кафедры НТТС, АлтГТУ им. И.И. Ползунова,  
e-mail: [anicpt@rambler.ru](mailto:anicpt@rambler.ru);

УДК 621.785

## РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ИЗНОСОСТОЙКАЯ НАПЛАВКА

С. Г. Иванов, М. А. Гурьев, А. И. Аугсткалн

Традиционные методы борирования имеют множество ограничений из-за сложного процесса и длительной обработки. Это исследование предлагает метод одновременной восстановительно-упрочняющей наплавки поверхности с одновременным ее борированием. К преимуществам предлагаемого метода относится сокращение времени процесса борирования за счет разработки составов, богатых бором, что устраняет необходимость в термических печах. Предлагаемая методика была опробована экспериментально. Исследования наплавленных слоев показали, что толщина наплавленного слоя достигает 500 мкм при твердости до 2388 HV.

**Ключевые слова:** борирование, упрочнение, наплавка, сварочная дуга.

Тяжелые условия эксплуатации, усложняющиеся в последнее время все больше и больше, порождает выход из строя деталей и рабочих органов машин, подверженных коррозии и износу. Соответственно, выбор процесса обработки поверхности всегда зависит от условий эксплуатации.

Борирование представляет собой термохимический процесс, при котором атомы бора диффундируют в металл подложки в течение определенного времени высокотемпературной выдержки в течение от 4 до 12 часов в богатой бором порошковой смеси, а температура выдержки варьируется от 850 до 1200 °С [1]. Фаза Fe<sub>2</sub>B, образуемая на поверхности боридного слоя, демонстрирует высокие микротвердость и коррозионную стойкость, тогда как Fe<sub>2</sub>B является фазой, близкой к основному металлу, имеет тетрагональную объемно-центрированную кристаллическую структуру с относительно низкой твердостью по сравнению с фазой Fe<sub>2</sub>B. Борирование дает хрупкую поверхность с диапазоном микротвердости 1200-2000 HV. Полученная микроструктура представляет собой смесь Fe<sub>2</sub>B и Fe<sub>2</sub>B или только Fe<sub>2</sub>B. Борирование поверхности можно проводить с использованием нескольких различных методов, включая порошковый способ, насыщение из паст, электролизный метод и многие другие. Только порошковый способ, насыщение из паст, электролизный метод могут использоваться в коммерческих целях, в то время как другие ограничиваются единичными технологическими решениями.

В дополнение к сложности процесса, одним из важных факторов, снижающим конку-

рентоспособность борирования, является соответствующая стоимость процесса. Цена 1 кг карбида бора (B<sub>4</sub>C) начинается от 6000 руб. Наконец, время процесса термодиффузионной обработки для некоторых процессов, которые используются в коммерческих целях, требует много времени.

В предлагаемом методе ремонтно-восстановительно-упрочняющей наплавки в качестве поставщика атомов бора использован тетраборат натрия, смешанный с карбидом кремния, карбонатом кальция и порошками ферромарганца и ферросилиция. Все порошки замешаны на этилсиликате и в виде пасты нанесены толщиной 1,5 мм на пруток из сварочной проволоки Св-08 диаметром 3 мм.

Наплавляемая подложка была предварительно обработана и очищена с помощью наждачной бумаги SiC с зернистостью 400. Далее осуществляли наплавку методом ручной дуговой сварки на различных значениях сварочного тока – 80, 120, 160 и 200 А. Микроструктуры наплавленного слоя представлены на рисунках 1 – 4.



Рисунок 1 - Микроструктура наплавленного слоя при силе сварочного тока 80А



Рисунок 2 - Микроструктура наплавленного слоя при силе сварочного тока 120А

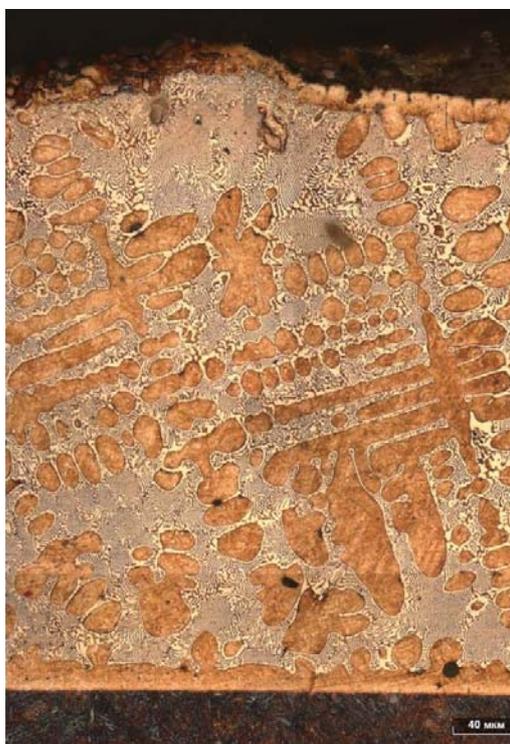


Рисунок 3 - Микроструктура наплавленного слоя при силе сварочного тока 160А

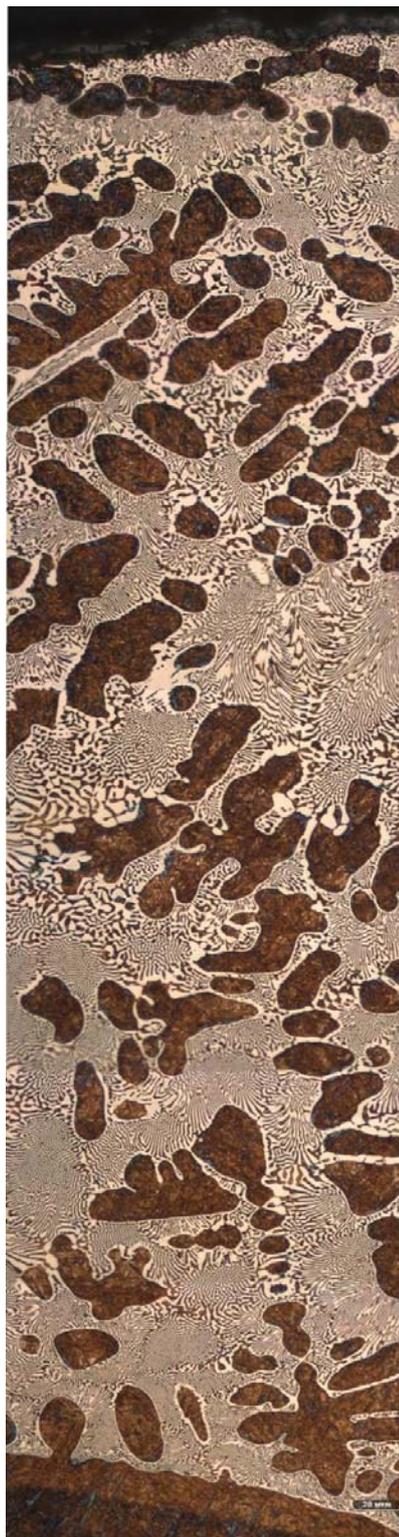


Рисунок 4 - Микроструктура наплавленного слоя при силе сварочного тока 200А

Как видно из представленных рисунков, по мере увеличения погонной энергии наплавки возрастает толщина наплавленного

слоя, однако при этом доля эвтектической составляющей, содержащей бор, уменьшается. Также наблюдается падение твердости наплавленного слоя: соответственно при силе тока 80А твердость наплавленного слоя достигает 2388 HV, тогда как при силе тока 200А твердость наплавленного слоя не превышает значений 2034 HV.

Заключение:

1. Предложен новый способ восстановления поверхностей деталей и рабочих органов машин и оборудования, сопряженный с повышением износостойкости восстановленных поверхностей за счет формирования боридной эвтектики.

2. Определено, что по мере повышения погонной энергии наплавки, толщина наплавленного слоя увеличивается, однако его твердость снижается за счет разбавления высокотвердой боридной эвтектики.

3. Данный способ восстановления может быть перспективен для ремонта с одновременным повышением износостойкости сложнопрофильных рабочих органов машин, имеющих при этом невысокие требования к поверхности – например, деталей шнековых смесителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ упрочнения деталей из штамповых сталей. / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Земляков С.А., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А. Патент на изобретение RU 2360031 С2, 27.06.2009. Заявка № 2007127587/02 от 18.07.2007.

2. Исследование зависимости морфологии диффузионных боридных покрытий на углеродистых сталях от состава и фракции насыщающей смеси / Иванов С.Г., Куркина Л.А., Грешилов А.Д., Гурьев А.М. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2012. Т. 9. № 4. С. 556-559.

3. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья / Гурьев М.А., Фильчаков Д.С., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Деев В.Б. // *Литейщик России*. 2013. № 6. С. 36-38.

4. Упрочнение литых сталей поверхностным легированием из борсодержащих обмазок / Гурьев М.А., Иванов А.Г., Иванов С.Г., Гурьев А.М. // *Успехи современного естествознания*. 2010. № 3. С. 123.

5. Взаимосвязь химического состава насыщающей среды и диффузионного покрытия на сталях 45 И 45Л / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Алонцева Д.Л., Иванова Т.Г., Гурьев А.М. // *Письма о материалах*. 2014. Т. 4. № 3 (15). С. 179-181.

6. Способ упрочнения стальных деталей / Гурьев А.М., Иванов С.Г., Власова О.А., Кошелева Е.А., Гурьев М.А., Лыгденов Б.Д. // Патент на изобретение

RU 2381299 С1, 10.02.2010. Заявка № 2008118705/02 от 12.05.2008.

7. Термодинамическое моделирование реакций в насыщающей среде при диффузионном борировании сталей / Иванов С.Г., Гурьев А.М., Черных Е.В., Гурьев М.А., Иванова Т.Г., Гармаева И.А., Зобнев В.В., Гонг В. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014. Т. 11. № 1. С. 13-16.

8. Технологические основы создания износостойкого инструмента / Зобнев В.В., Иванов С.Г., Гурьев А.М., Марков А.М. // *Ползуновский альманах*. 2012. № 1. С. 271-273.

9. Повышение износо- и коррозионной стойкости стальных деталей методами комплексного бороникелирования и борвольфрамирания / Иванов С.Г., Гурьев М.А., Земляков С.А., Иванов А.Г., Гурьев А.М. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2010. Т. 7. № 4. С. 108-111.

10. Технология многокомпонентного диффузионного упрочнения поверхности деталей машин и инструмента для энергетического машиностроения / Кошелева Е.А., Иванов С.Г., Нестеренко Е.А., Гурьев М.А., Земляков С.А., Власова О.А., Иванов А.Г. // *Ползуновский вестник*. 2010. № 1. С. 106-113.

11. Сравнительное исследование насыщающей способности борлирующих сред различного состава / Гармаева И.А., Гурьев А.М., Иванова Т.Г., Гурьев М.А., Иванов С.Г. // *Письма о материалах*. 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 262-265.

12. Упрочнение рабочих поверхностей стальных деталей наплавочным материалом на основе бориды железа / Зобнев В.В., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Гурьев А.М., Марков А.М. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2014. Т. 11. № 3. С. 398-401.

13. Разработка нового метода легирования поверхности отливок / Гурьев М.А., Иванов С.Г., Гармаева И.А., Дон Я., Мэй Ш., Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М. // *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. № 8-1. С. 103-105.

**Иванов Сергей Геннадьевич** – д.т.н., зав. Кафедрой машиностроительные технологии и оборудование, Директор ЛМИ ИЦ «ХимБиоМаш», в.н.с. НУ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: serg225582@mail.ru;

**Гурьев Михаил Алексеевич** – к.т.н., доцент кафедры машиностроительные технологии и оборудование ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: gurievma@mail.ru;

**Аугсткалн Артур Игоревич** – аспирант ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: augstkalna@yandex.ru

УДК 621.791

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСА БАРАБАНА КОТЛА

Е. Н. Любых, М. Н. Сейдуров

В работе рассмотрен маршрут технологического процесса сборки и сварки корпуса барабана котла. Показано, что электрошлаковая сварка является наиболее рациональным способом сварки для кольцевых и продольных швов толстостенных сосудов. Представлены режимы электрошлаковой сварки, применяемые для выполнения прямолинейных и кольцевых швов. При разработке технологического процесса изготовления корпуса барабана котла было предложено использование установки для одновременной электрошлаковой сварки двух продольных швов, а также приспособления для бескобного способа сварки кольцевых швов.

**Ключевые слова:** корпус барабана котла, электрошлаковая сварка, параметры режима сварки, установка для сварки продольных швов, приспособление для сварки кольцевых швов.

Изготовление крупногабаритных конструкций сварными является более экономичным по сравнению с литыми, коваными и штампованными, поскольку позволяет снизить массу и металлоемкость изделия, а также трудоемкость и себестоимость изготовления [1]. Поэтому конструкции энергетического машиностроения, работающие в условиях высоких давлений и температур, а также динамических нагрузок, изготавливаются преимущественно сварными.

В паровых котлах основным устройством является барабан, корпус которого представляет собой толстостенный сосуд, работающий под высоким давлением. Изготовление корпуса барабана котла регламентируется требованиями к опасным производственным объектам группы технических устройств «Котельное оборудование» в соответствии с СТО ЦКТИ 10.001-2005 [2].

Цель работы – разработать технологический процесс сборки и электрошлаковой сварки корпуса барабана котла с помощью установки для сварки продольных швов и приспособления для сварки кольцевых швов.

Корпус барабана котла представляет собой толстостенный сосуд, состоящий из нескольких цилиндрических обечаек, которые соединяются продольными и кольцевыми швами, а также из эллиптических или полуэллиптических днищ. Основным назначением корпуса барабана котла является отделение воды от пара и поддержание определенного запаса воды в котле.

Барабан котла, изготавливаемый ООО «Сибэнергомаш – БКЗ» (г. Барнаул), имеет внутренний диаметр 1600 мм и толщину стенок 93 мм (рисунок 1).



Рисунок 1 – Барабан парового котла для Казанской ТЭЦ-2 [3]

Корпус барабана котла состоит из восьми цилиндрических полуобечаек, которые соединяются продольными и кольцевыми швами, а также из двух днищ.

Все детали корпуса барабана котла выполнены из проката листового горячекатаного стали марки 22К по ГОСТ 5520-2017 [4]. Химический состав и механические свойства основных и сварочных материалов представлены в таблицах 1 и 2.

Для выполнения прямолинейных и кольцевых швов корпуса барабана котла использовался способ электрошлаковой сварки проволочным электродом (ШЭ).

В таблице 3 представлены сведения о типе сварных соединений – С1 по ГОСТ 15164-78 [5]. Параметры режима ШЭ приведены в таблице 4.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ И  
СВАРКИ КОРПУСА БАРАБАНА КОТЛА

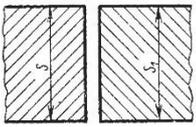
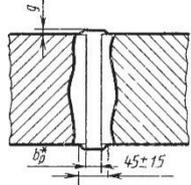
Таблица 1 – Химический состав стали марки 22К по ГОСТ 5520-2017

Марка стали	Массовая доля элементов, %							
	C	Si	Mn	Cr	N	Cu	P	S
22К	0,19-0,26	0,17-0,4	0,7-1	до 0,30	до 0,008	до 0,3	до 0,04	до 0,035

Таблица 2 – Механические свойства проката из стали марки 22К класса прочности С255 по ГОСТ 5520-2017

Вид проката	Толщина проката, мм	Механические свойства		
		Временное сопротивление, Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %
Листовой горячекатаный	Св. 60	430-590	255	22

Таблица 3 – Тип сварных соединений корпуса барабана котла по ГОСТ 15164-78

Тип соединения	Конструктивные элементы		Способ сварки	Конфигурация шва	ss=s <sub>1</sub> , мм	bb <sub>p</sub> *, мм	g, мм	
	подготовленных кромок	сварного шва					ННо м.	Пред. откл.
С1			ШЭ	Кольцевой	93	27	33	+2 -3
				Прямой		28		

\* Размер для справок.

Таблица 4 – Параметры режима электрошлаковой сварки корпуса барабана котла

п/п	Параметры режима сварки	Обозначение	Значения
11	Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	V <sub>э</sub>	360±10
22	Сила сварочного тока, А	I <sub>с</sub>	675
33	Глубина шлаковой ванны, мм	H <sub>шл</sub>	50±5
44	Недоход электрода до ползунов, мм	I <sub>р</sub>	9
55	Напряжение процесса, В	U <sub>с</sub>	60±2,5
66	Скорость поперечных колебаний электрода, м/ч	U <sub>п.к.</sub>	57,6
77	Время выдержки электрода у ползуна, с	t <sub>в</sub>	5±0,5
88	«Сухой» вылет электрода при сварке продольных швов, мм	I <sub>сп</sub>	70±5
99	«Сухой» вылет электрода при сварке кольцевых швов, мм	I <sub>ск</sub>	90±5

Выбор электрошлаковой сварки (ЭШС) связан с тем, что практически нет ограничений по свариваемой толщине металла за один проход, не требуется операции по подготовке разделки кромок, имеется незначительный расход флюса и электроэнергии. Способ ЭШС наиболее рационален для выполнения как продольных прямолинейных, так и для поперечных кольцевых швов корпуса барабана котла (рисунок 2).

ЭШС осуществляли одной электродной проволокой Св-08Г2С сплошного сечения диаметром 3 мм и сварочным флюсом ФЦ-11 с помощью сварочного автомата А-535 совместно со сварочным трансформатором ТСШ-1000-3.



Рисунок 2 – Процесс электрошлаковой сварки контрольного сварного соединения

На рисунке 3 предоставлена последовательность сборки и сварки корпуса барабана котла. Перед сборкой двух полуобечеек осуществляется обрезка припуска с помощью газокислородной резки на сборочной плите с последующей механической обработкой торцов полуобечайки. Далее производится сборка полуобечеек с помощью П-образных скоб. Выполняется одновременная ЭШС двух продольных швов в вертикальном положении с использованием входного кармана и выводных планок. После сварки продольных швов необходимо провести термическую обработку в виде отпуска, после чего производится сборка полукорпуса с использованием сборочных планок. После сварки кольцевых швов необходимо провести термическую обработку в виде нормализации, после чего производится контроль качества сварных соединений.

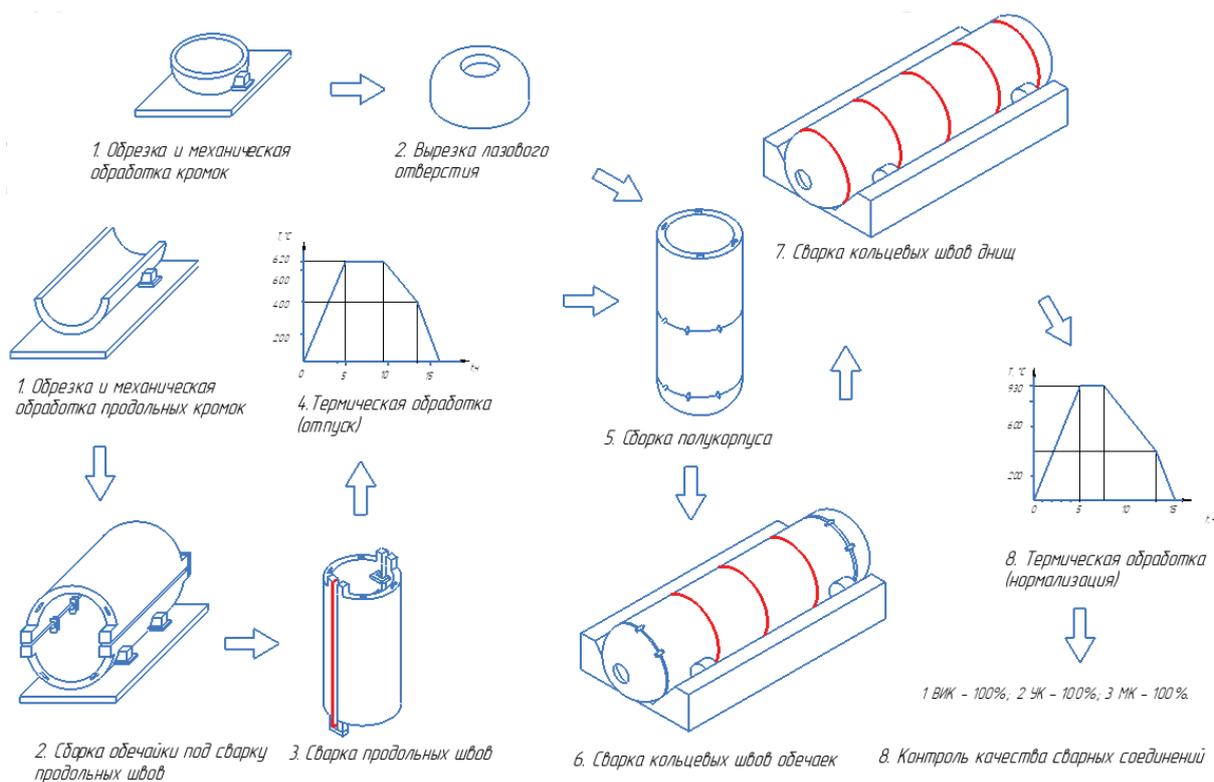


Рисунок 3 – Последовательность сборки и сварки корпуса барабана котла

Для подготовки к сварке кольцевого шва в сборочный зазор устанавливается вставыш для начала процесса ЭШС, а во внутрь барабана котла устанавливается приспособление для бесскобного способа ЭШС кольцевых швов. После сварки кольцевых швов необходимо выполнить нормализацию и провести контроль качества сварных соединений.

Электрошлаковый процесс на переменном токе протекает более устойчиво, чем на постоянном. Исходя из этого, для ЭШС корпуса барабана котла был использован сварочный трансформатор ТСШ-1000-3. Сварочный трансформатор имеет жесткую внешнюю характеристику, обладает минимальным магнитным рассеянием. Охлаждение применяется-

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСА БАРАБАНА КОТЛА

ся воздушное, принудительное, от встроенного вентилятора. ТСШ-1000-3 обеспечивает равномерную загрузку сети при высоком коэффициенте мощности. Этот трансформатор рассчитан на длительную работу, надежен в эксплуатации и экономичен.

Для сварки прямолинейных и кольцевых швов барабана совместно со сварочным трансформатором ТСШ-1000-3 был использован сварочный автомат рельсового типа А-535. Универсальный автомат предназначен для сварки переменным током одним, двумя или тремя электродами с двусторонним принудительным формированием шва сталей толщиной от 50 до 450 мм. Автомат А-535 позволяет осуществлять сварку продольных и кольцевых стыковых швов с наружным диаметром до 3000 мм.

Для ЭШС корпуса барабана котла использовалась установка для одновременной сварки двух продольных швов, которая состоит из свариваемой обечайки, установленной с помощью зажимов на планшайбе вращателя. К двум колоннам, расположенным на рельсовых тележках, подвешен вертикальный рельсовый путь, по которому движется сварочный автомат А-535. Для обслуживания автомата на колонне имеется кабина для сварщика. В состав установки входят источник питания, шкафы с аппаратурой контроля и управления, гирлянды сварочных проводов и провода управления, система водяного охлаждения и ряд других составных элементов. Установка для ЭШС двух продольных швов представлена на рисунке 4.

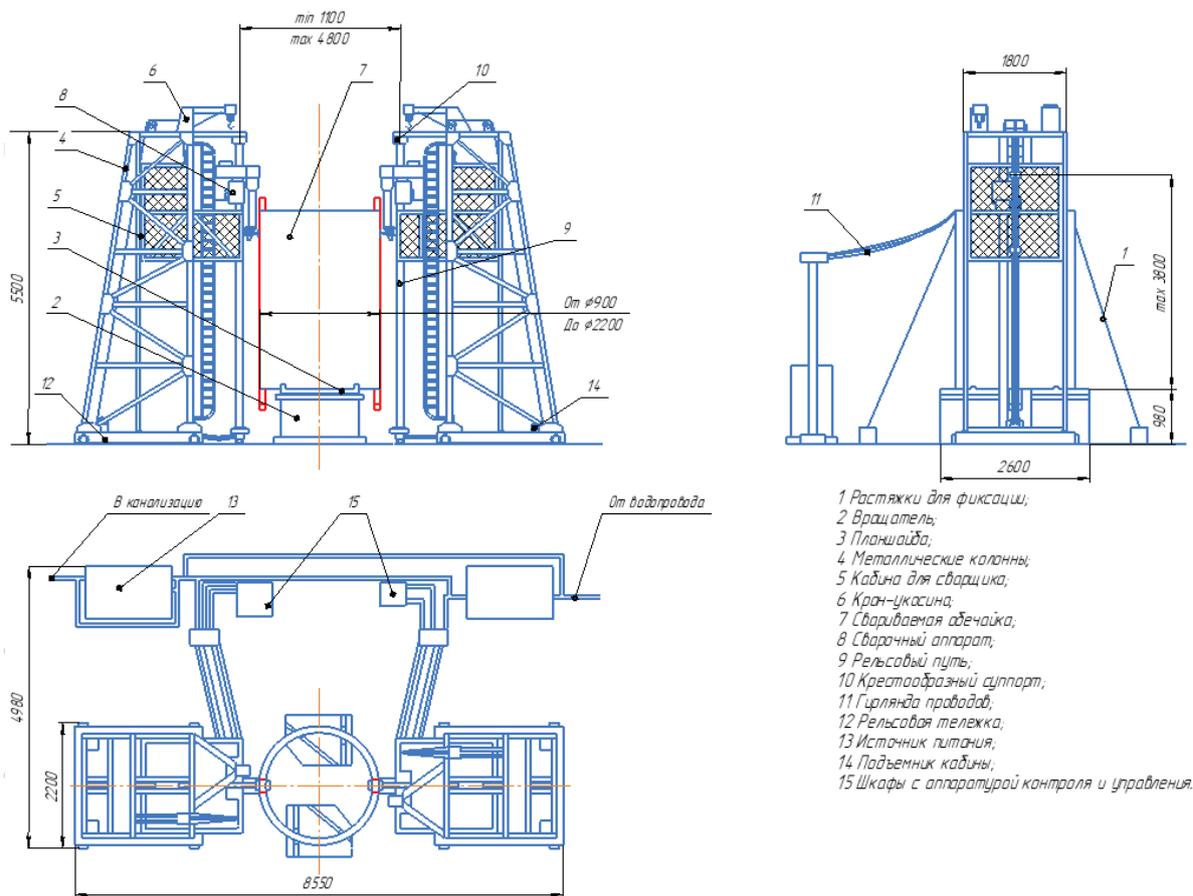


Рисунок 4 – Установка для электрошлаковой сварки двух продольных швов

Для кольцевых швов корпуса барабана котла использовался бескобный способ ЭШС кольцевых стыков. Установку медных

подкладок и приспособления для бескобной ЭШС производят два сварщика.

В начале внутрь обечайки устанавливаются нижние скобы с винтами, на них ставят

кольцо. Далее монтируют остальные скобы и равномерно с помощью винтов раскрепляют все приспособления внутри обечайки. Затем устанавливают медные подкладки, прижимая их к корпусу с помощью сухарей и прижимов. При установке медных подкладок для удобства сварщиков допускается кантовка изделия. Приспособление для бескобного способа ЭШС кольцевых стыков показано на рисунке 5.

Таким образом, при разработке технологического процесса изготовления корпуса барабана котла сборка и сварка выполнялись с применением высокотехнологичной оснастки.

Для определения наличия дефектов в сварных соединениях конструкции корпуса

барабана котла необходимо выполнение визуального и измерительного, ультразвукового и магнитопорошкового способов неразрушающего контроля.

Следует отметить, что для высокопроизводительного поиска дефектов предлагается использовать универсальный ультразвуковой томограф-дефектоскоп А1550 IntroVisor, обеспечивающий визуализацию внутренней структуры объекта контроля в виде наглядного и достоверного изображения сечения в режиме реального времени.

В А1550 IntroVisor для излучения и приема ультразвука в режиме томографа используются 16-элементные линейные антенные решетки.

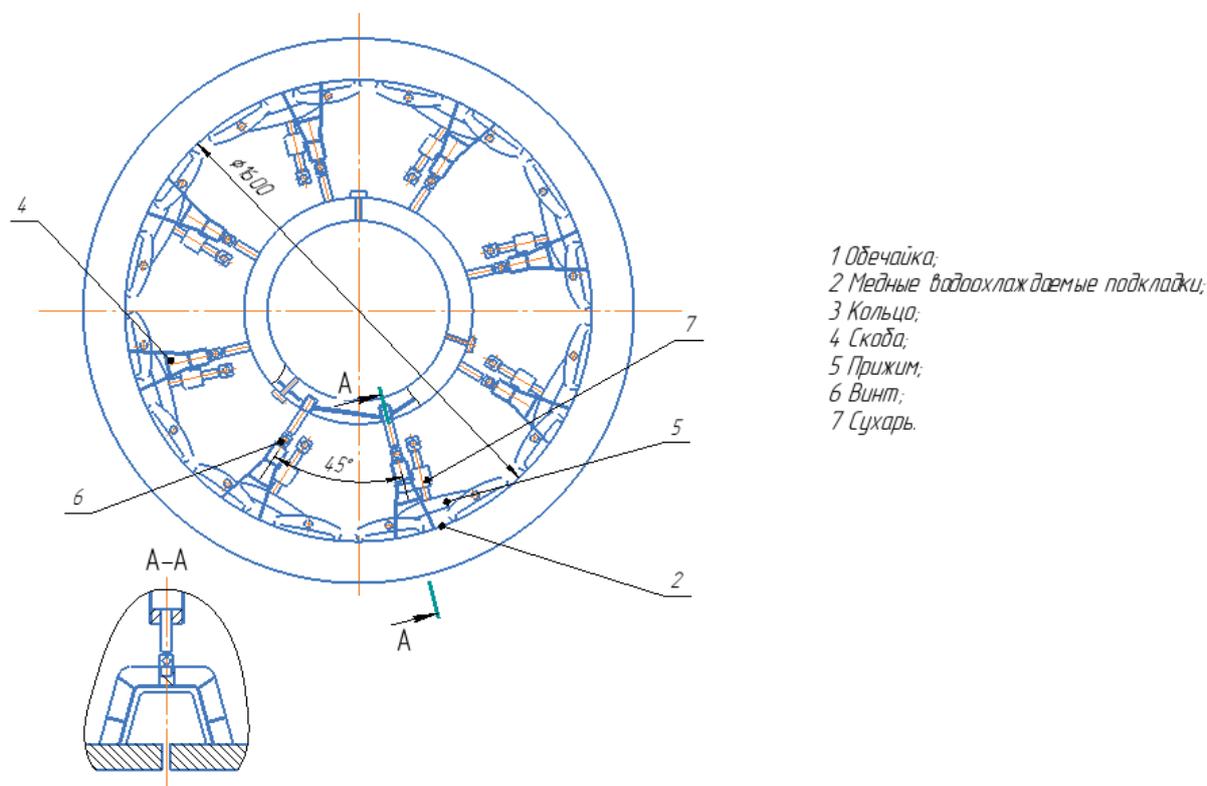


Рисунок 5 – Приспособление для бескобного способа сварки кольцевых стыков

Выводы:

1. Электрошлаковая сварка является наиболее рациональным способом сварки для кольцевых и продольных швов корпуса барабана котла.

2. Применение высокотехнологичной оснастки для сборки и сварки, а также ультразвукового томографа-дефектоскопа при изготовлении корпуса барабана котла позволит повысить производительность труда не менее чем на 40%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко М.В. Сварочное производство (Введение в специальность): монография / М.В. Радченко, В.Г. Радченко; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009. – 215 с.
2. СТО ЦКТИ 10.001-2005. Барабаны сварные стационарных котлов. Общие технические требования к изготовлению (с Изменениями N 1, 2). – Введ. 2006.07.01. – СПб.: ОАО «НПО ЦКТИ», 2009. – 53 с.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСА БАРАБАНА КОТЛА

3. Дефектоскопист.ру | Неразрушающий контроль / Страница сообщества в социальной сети «ВКОНТАКТЕ» [Электронный ресурс] // URL: <https://vk.com/defektoskopistru>. (дата обращения: 02.12.2022).

4. ГОСТ 5520-2017. Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. – Введ. 2018.10.01. – М.: Стандартиформ, 2018. – 34 с.

5. ГОСТ 15164-78. Электрошлаковая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры (с Изменением N 1). – Введ. 1980.01.01. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 19 с.

**Любых Егор Николаевич** – студент ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: [egor.lub99@mail.ru](mailto:egor.lub99@mail.ru);

**Сейдуров Михаил Николаевич** – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: [seidurov@mail.ru](mailto:seidurov@mail.ru).

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н. А. Ридель, М. Н. Сейдуров

В работе изучены особенности проектирования сварной конструкции деревообрабатывающего оборудования в системе «КОМПАС-3D v20». Исследован маршрут технологического процесса изготовления опытного образца каркаса каретки ленточнопильного вертикального станка. Показана многостадийная отработка сварной конструкции на технологичность. Для запуска новой модели деревообрабатывающего оборудования в серийное производство рекомендовано согласование с одновременной отработкой технологии сборки и сварки непрерывно на всех стадиях разработки конструкции изделия.

**Ключевые слова:** *деревообрабатывающее оборудование, проектирование сварных конструкций, система трехмерного моделирования, ленточнопильный вертикальный станок, опытное производство, технологичность.*

Станок ленточнопильный вертикальный модели «Триумф БЛ-4П», в дальнейшем именуемый как «станок», предназначен для продольной распиловки бревен с целью получения продукции в виде брусьев, досок (обрезных и необрезных), брусков, шпона [1]. Он отличается высокой точностью и производительностью, за один прогон через режущий инструмент можно получить несколько досок. Главным преимуществом станка является максимальный диаметр подающего бревна, равный 750 мм.

Ленточнопильный вертикальный станок по своей конструкции не имеет аналогов на территории России за счет расположения пильных кареток относительно подающего пиломатериала под углом 6-8°. Данная особенность конструкции позволяет снизить нагрузку на пильную ленту, что повышает ее ресурс и долговечность, также за счет этого повышается качество получаемого пиломатериала. В настоящее время станок находится на стадии проектно-конструкторских работ, выполняемых ООО «Завод «ЭНЕРГОТЕХ» (г. Барнаул).

Цель работы – изучить особенности проектирования сварной конструкции каркаса каретки ленточнопильного вертикального станка новой модели в системе трехмерного моделирования.

На первом этапе с помощью системы «КОМПАС-3D v20» проектируется трехмерная модель деталей и сборочных единиц изделия, оформляется конструкторская доку-

ментация в соответствии с требованиями ЕСКД (70% эффекта от технологичности).

В данном изделии за основу взят каркас каретки горизонтальной ленточной пилорамы серии «ТРИУМФ», далее «каркас каретки 1» (рисунок 1).

Каркас каретки – основной узел станка, от которого зависят качество и точность распиловки. На каркас закрепляются два пильных шкива, главный электродвигатель, гидронатяжитель ленты, поддерживающие ролики, защитный кожух, контрольная линейка.

Для повышения точности установки пильных шкивов и поддерживающих роликов при изготовлении, а также дальнейших регулировок при их работе, проведен ряд доработок, что обеспечивает наиболее качественную сборку и сварку каркаса каретки ленточнопильного вертикального станка модели «Триумф БЛ-4П», далее «каркас каретки 2» (рисунок 2).

В процессе сборки и сварки каркаса каретки 1, а также при эксплуатации станка были выявлены недостатки данного каркаса.

Основным недостатком является неточность установки стакана ступицы (рисунки 1 и 2, поз. 1) пильных шкивов. Стакан ступицы – это главная позиция каркаса, от правильности его установки при сборке и сварке каркаса напрямую зависит качество получаемого пиломатериала.

Вторым важным узлом в каркасе каретки является кронштейн маятника (рисунки 1 и 2, поз. 2). Кронштейн маятника должен выдер-

живать нагрузки при натяжении пильной ленты и работы станка, поэтому точность сборки и качество сварки в данном узле являются основополагающими факторами.

Использование технологии лазерной резки металла с помощью волоконнолазерной системы обработки серии ML3015eX-F производства «MITSUBISHI ELECTRIC

CORPORATION» позволяет собирать листовые конструкции в шип-паз. Благодаря данному соединению повышается скорость и качество сборки каркаса каретки, что позволяет быстро и точно, без различных приспособлений собирать и далее проводить сварку каркаса каретки станка.

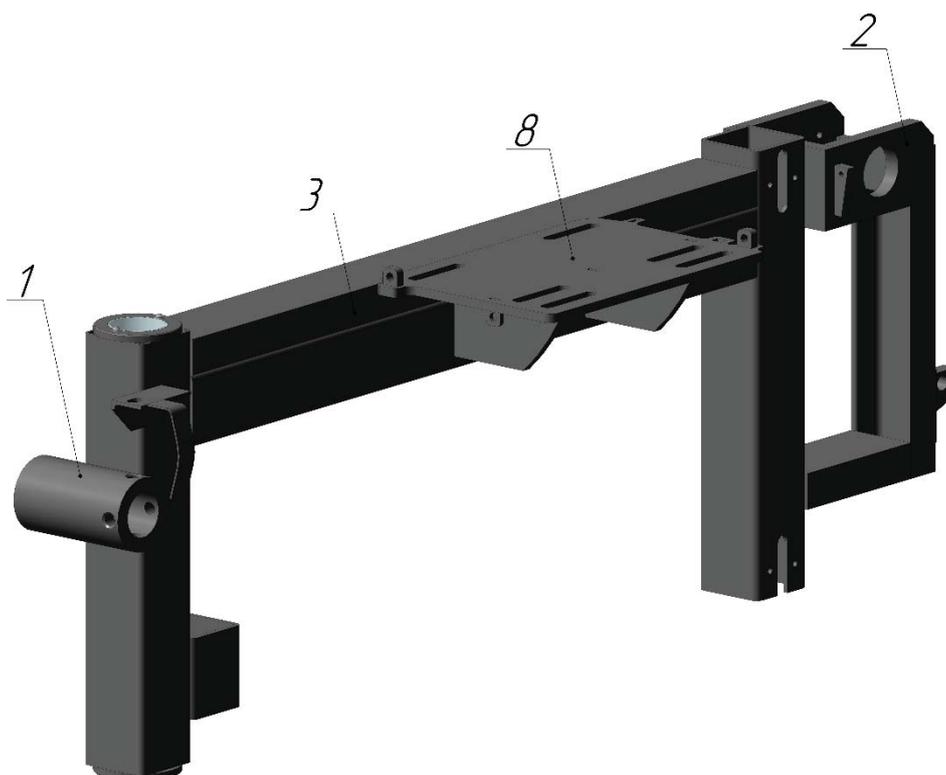


Рисунок 1 – Каркас каретки горизонтальной ленточной пилорамы серии «ТРИУМФ»

Для внедрения данного типа соединений в каркас каретки 2 были проведены следующие конструктивные изменения. Базовой деталью каркаса является поперечина (рисунки 1 и 2, поз. 3), которая обеспечивает жесткость и надежность всей конструкции в целом. Для точной установки стакана ступицы были спроектированы кронштейны стакана (рисунок 2, поз. 4) из листового металла толщиной 5 мм. Для удобства сборки предусмотрены технологические вырезы, за счет которых и обеспечивается точность установки стакана. Для жесткости кронштейнов при помощи соединения шип-паз устанавливаются промежуточные ребра (рисунок 2, поз. 5). Для кронштейна маятника были разработаны держатели (рисунок 2, поз. 6), которые имеют вырезы для точности установки кронштейна маятника. Также для жесткости держателей

при помощи шип-пазов устанавливаются промежуточные ребра (рисунок 2, поз. 7) соответствующей формы. Для удобства установки плиты электродвигателя (рисунки 1 и 2, поз. 8) на поперечину в ней сделан соответствующий вырез, позволяющий обеспечить точность установки.

На втором этапе образец изделия запускается в опытное производство. Каркас проверяется на технологичность конструкции, определяется стабильность работы и удобство в эксплуатации. Опытный образец дает возможность выявлять недоработки конструкции при проектировании (20% эффекта от технологичности).

На третьем этапе, после окончания опытных испытаний, все замечания описываются в системе ERP «Битрикс24». Далее проектировщик проводит ряд необходимых

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

конструктивных изменений (10% эффекта от технологичности), и новая модель деревооб-

рабатывающего оборудования будет запущено в серийное производство [2].

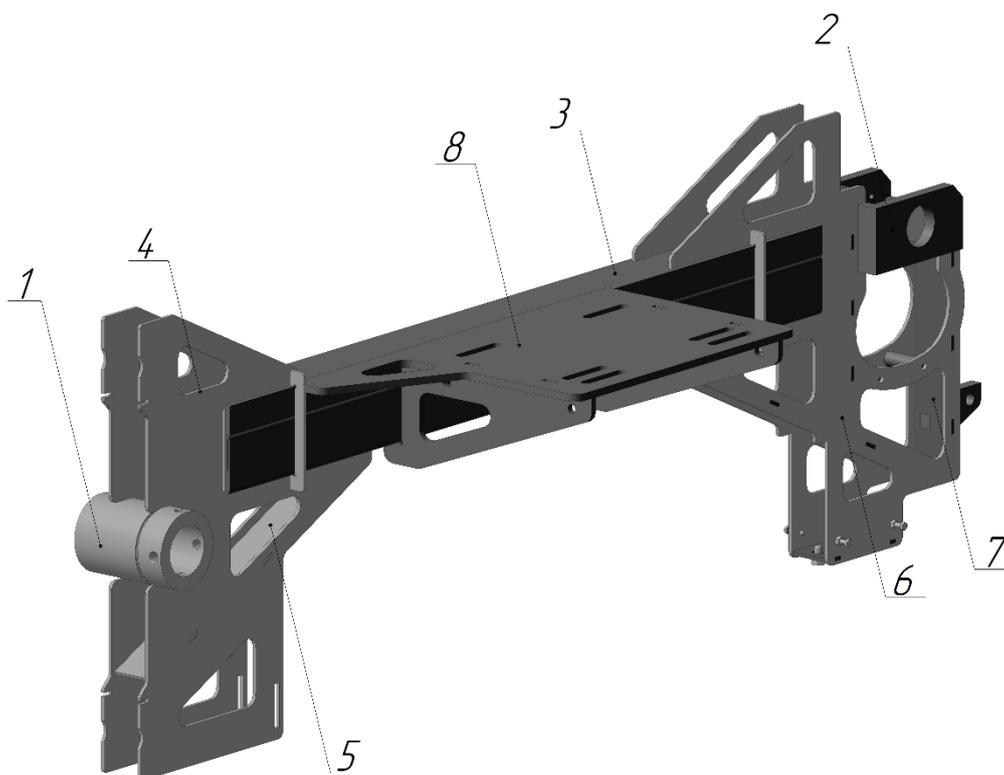


Рисунок 2 – Каркас каретки ленточнопильного вертикального станка модели «Триумф БЛ-4П»

В ходе исследования маршрута технологического процесса изготовления опытного образца каркаса каретки ленточнопильного вертикального станка было выявлено, что данный тип конструкции обеспечивает простоту и точность сборки, сокращает время сборки, обеспечивает удобство сварки (за счет технологических вырезов в конструкции), что позволяет повысить производительность, а также конструкция каркаса каретки 2 обеспечивает требуемые показатели надежности на весь срок эксплуатации изделия.

Для изготовления каркаса каретки 2 применяется низкоуглеродистая сталь обыч-

новенного качества марки Ст3 по ГОСТ 16523-97 толщиной от 3 до 10 мм.

В данном изделии все сварные швы однотипны и не имеют большой протяженности. В связи с этим для серийного производства задействован способ механизированной сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа (90%) в смеси с кислородом (10%) [3]. Используется сварочная проволока марки Св-08Г2С диаметром 1,2 и 1,6 мм по ГОСТ 2246-70.

Параметры режимов сварки, полученные опытным путем, изменяются в зависимости от толщины металла и пространственного положения (таблица).

Таблица – Параметры режимов сварки на предприятии

Толщина металла, мм	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение сварки, В	Скорость сварки, м/ч
3	1,2	150-200	23-25	25-40
от 4 до 6	1,6	200-400	25-36	25-60
от 6 до 9	1,6	200-450	25-38	20-50
от 9 до 10	1,6	300-500	28-40	15-30

Для обеспечения указанных режимов сварки и рекомендаций [4] на предприятии применяется сварочный выпрямитель инверторного типа Ehave CM500 совместно с подающим механизмом WF2-50GA-MD-E (рисунок 3) производства «MEGMEET Welding Technology».



Рисунок 3 – Сварочный полуавтомат MEGMEET (Ehave CM500 в комплекте с WF2-50GA-MD-E)

После окончания сварки все сварные швы зачищаются и подвергаются визуальному и измерительному контролю в соответствии с требованиями СТО 9701105632-003-2021. Визуальный и измерительный контроль назначается в объеме 100% с целью выявления наружных дефектов сварных соединений, что позволяет обеспечивать надежность и долговечность изделия.

Таким образом, при помощи системы проектирования КОМПАС-3D-v20 на основе каркаса каретки горизонтальной ленточной пилорамы серии «ТРИУМФ» был спроектирован и внедрен в опытное производство новый ленточнопильный вертикальный станок модели «Триумф БЛ-4П».

Выводы:

1. Особенностью проектирования сварной конструкции каркаса каретки ленточнопильного вертикального станка в системе трехмерного моделирования является многостадийная отработка сварной конструкции на технологичность.

2. Для запуска новой модели деревообрабатывающего оборудования в серийное производство рекомендовано согласование с одновременной отработкой технологии сборки и сварки непрерывно на всех стадиях разработки конструкции изделия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.2.026.0-2015. Оборудование деревообрабатывающее. Требования безопасности к конструкции (с Поправкой). – Введ. 2017.01.01. – М.: Стандартиформ, 2015. – 39с.

2. Ридель Н.А. Исследование технологического процесса опытного производства подающих столов многопильных станков / Наука и молодежь: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (18–22 апреля 2022 года, г. Барнаул). – Том 1. Инженерно-технические науки, часть 1. – Барнаул: АлтГТУ, 2022. – С 91-94. [Электронный ресурс] // URL: [https://journal.altstu.ru/konf\\_2022/2022\\_1/103/](https://journal.altstu.ru/konf_2022/2022_1/103/). (дата обращения: 02.12.2022).

3. ГОСТ Р ИСО 14175-2010. Газы и газовые смеси для сварки плавлением и родственным процессом. – Введ. 2012.01.01. – М.: Стандартиформ, 2011. – 14 с.

4. Хомутов С.О. Влияние показателей качества электроэнергии в питающей сети на работу сварочного оборудования / С.О. Хомутов, М.Н. Сейдуров, А.Н. Попов // Сварка и диагностика. – 2020. – № 5. – С 45-48.

*Ридель Никита Александрович – студент ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: [nik.ridel.2000@mail.ru](mailto:nik.ridel.2000@mail.ru);*

*Сейдуров Михаил Николаевич – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: [seidurov@mail.ru](mailto:seidurov@mail.ru).*

621.791.927.5

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

М. Н. Сейдуров, А. А. Ощепков, А. И. Щёткин

В работе представлены результаты разработки экспериментального образца программно-аппаратного комплекса для индукционной наплавки деталей на базе универсального восьмиканального измерителя-регулятора, высокочастотного транзисторного генератора с микропроцессорным управлением и блока нагревательного контура с индуктором. Показано, что применяется программное обеспечение, предназначенное для прогнозирования структуры и свойств наплавленных слоев поверхностей изделий. В ходе эксплуатационных испытаний с применением флюс-пасты с церием установлено, что значительно увеличивается долговечность, а также повышается прочность и износостойкость наплавливаемых деталей.

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, индукционная наплавка, изнашиваемые поверхности, флюс-паста, долговечность, износостойкость.

Проблема повышения долговечности и снижения металлоемкости быстроизнашиваемых деталей является одной из основных в сельскохозяйственном, железнодорожном машиностроении и судостроении.

Значительный объем металла в серийном производстве деталей, подверженных абразивному износу, наплавляется индукционным способом [1].

Для расширения области применения индукционной наплавки твердых сплавов, повышения качества упрочнения, повышения производительности труда и снижения энергоемкости процесса необходимо применение программно-аппаратных комплексов оборудования для высокоскоростной обработки изнашиваемых поверхностей деталей [2, 3].

Цель работы – разработать экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса для индукционной наплавки деталей.

Программно-аппаратный комплекс для индукционной наплавки (ПАК ИН) состоит из модуля сбора данных, конвертера интерфейсов, компьютера и программного обеспечения. Принципиальная блок-схема макета ПАК ИН представлена в работах [4, 5].

При разработке макета ПАК ИН в качестве модуля сбора данных с учетом ранее полученных результатов [5, 6] использовался восьмиканальный прибор ОВЕН ТРМ 138.

Измерение температуры в восьми точках поверхности детали во времени осуществляется одновременно модулем сбора данных

через блок термопар типа ТХА (К), имеющих диапазон измерений от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+1300^{\circ}\text{C}$  с разрешающей способностью  $1^{\circ}\text{C}$ . Настройка на работу с выбранным типом датчиков измерения и обмен информации с компьютером происходит с помощью конвертера интерфейсов RS485/USB DELTA IDF6500 по соответствующему протоколу.

Связь с модулем сбора данных осуществляется через COM-порт с учетом значения базового адреса прибора. С помощью программного обеспечения оператор получает на свой компьютер график зависимости температуры в заданной точке от времени (рисунок 1).

Для расчета режимов индукционной наплавки, выбора компонентов шихты и анализа распределения температурного поля на поверхности детали оператором используются функциональные возможности программного обеспечения. Для сбора данных указывается 8 каналов, привязанных к термопарам на изделии (рисунок 2).

Полученные результаты анализируются программным обеспечением, преобразуются в числовые и графические данные и представляются оператору для настройки (корректировки) режимов индукционной наплавки.

В результате предварительных исследований был разработан макет ПАК ИН, состоящий из прибора ОВЕН ТРМ 138, конвертера RS485/USB DELTA IDF6500, компьютера и демоверсии программного обеспечения, предназначенного для прогнозирования

структуры и свойств наплавленных слоев по верхностям изделий [2].

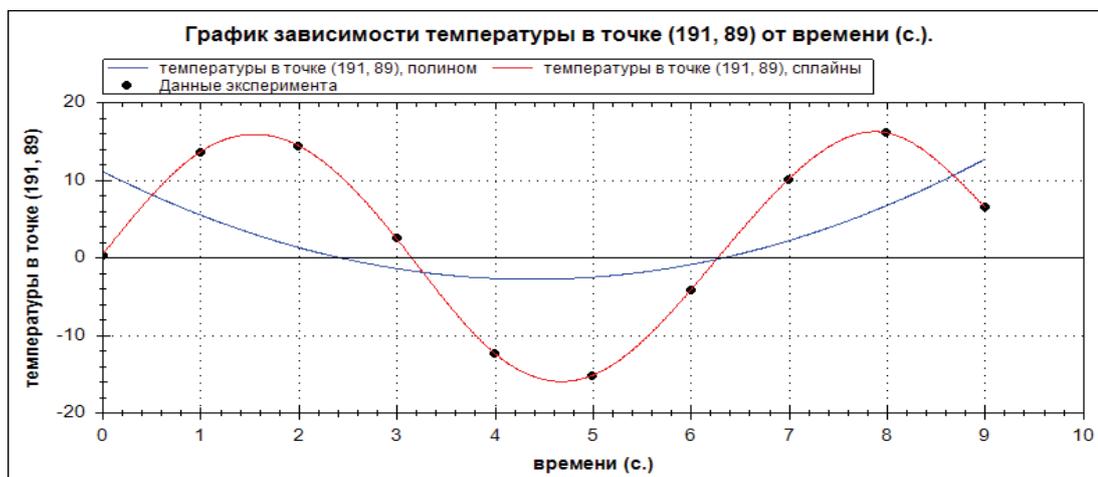


Рисунок 1 – График температуры  $T(t)$

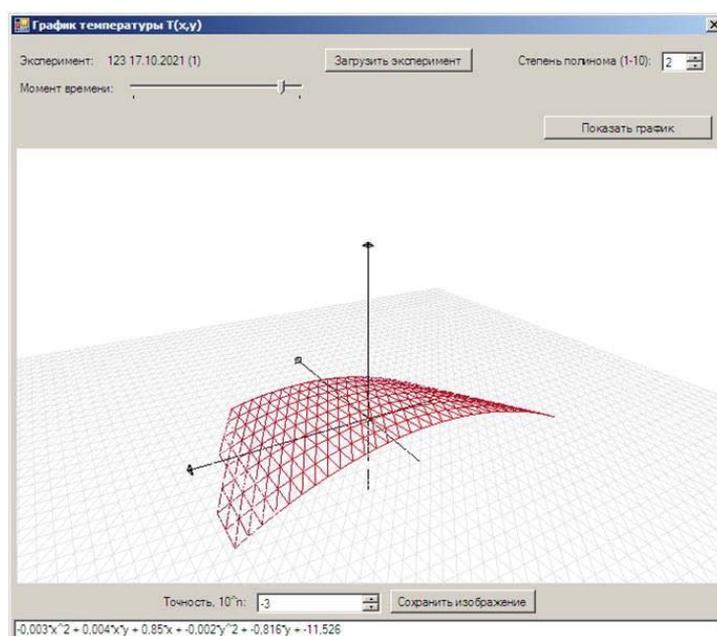


Рисунок 2 – График температуры  $T(x,y)$

В составе экспериментального образца ПАК ИК использовалось следующее оборудование:

- высокочастотный транзисторный генератор ВГТ2-50/66 с выходной мощностью 50 кВт, имеющий микропроцессорное управление (таблица);
- блок нагревательного контура с индуктором;
- механизм для фиксации и перемещения детали или индуктора.

Наличие у генератора ВГТ2-50/66 выхода на компьютер дает возможность для визуализации процесса, поскольку программа

управления режимами наплавки перенастраивается по требованию измерителя-регулятора ТРМ 138. Высокая надежность обеспечивается запасом по реактивной мощности 200%. Точность стабилизации мощности 0,1 кВт во всем диапазоне, стабилизация мощности в диапазоне от 0 до 100%. Связь с прибором ТРМ 138 осуществляется через СОМ-порт с учетом значения базового адреса прибора. Функциональная схема экспериментального образца ПАК ИК на базе прибора ОВЕН ТРМ 138 с восемью входами для подключения термопар типа ТХА (К) представлена на рисунке 3.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

Таблица – Технические характеристики генератора ВГТ2-50/66

Параметр	Значение
Напряжение питающей сети, В	3×380
Частота питающей сети, Гц	50
Максимальная выходная мощность, кВт	50
Реактивная выходная мощность, кВА	60
Частота рабочая, кГц	66
Максимальная частота, кГц	150
Напряжение выходное, В	500
Масса, кг	110
Водяное охлаждение, л/мин	12
Длина × ширина × высота, мм	600×600×800

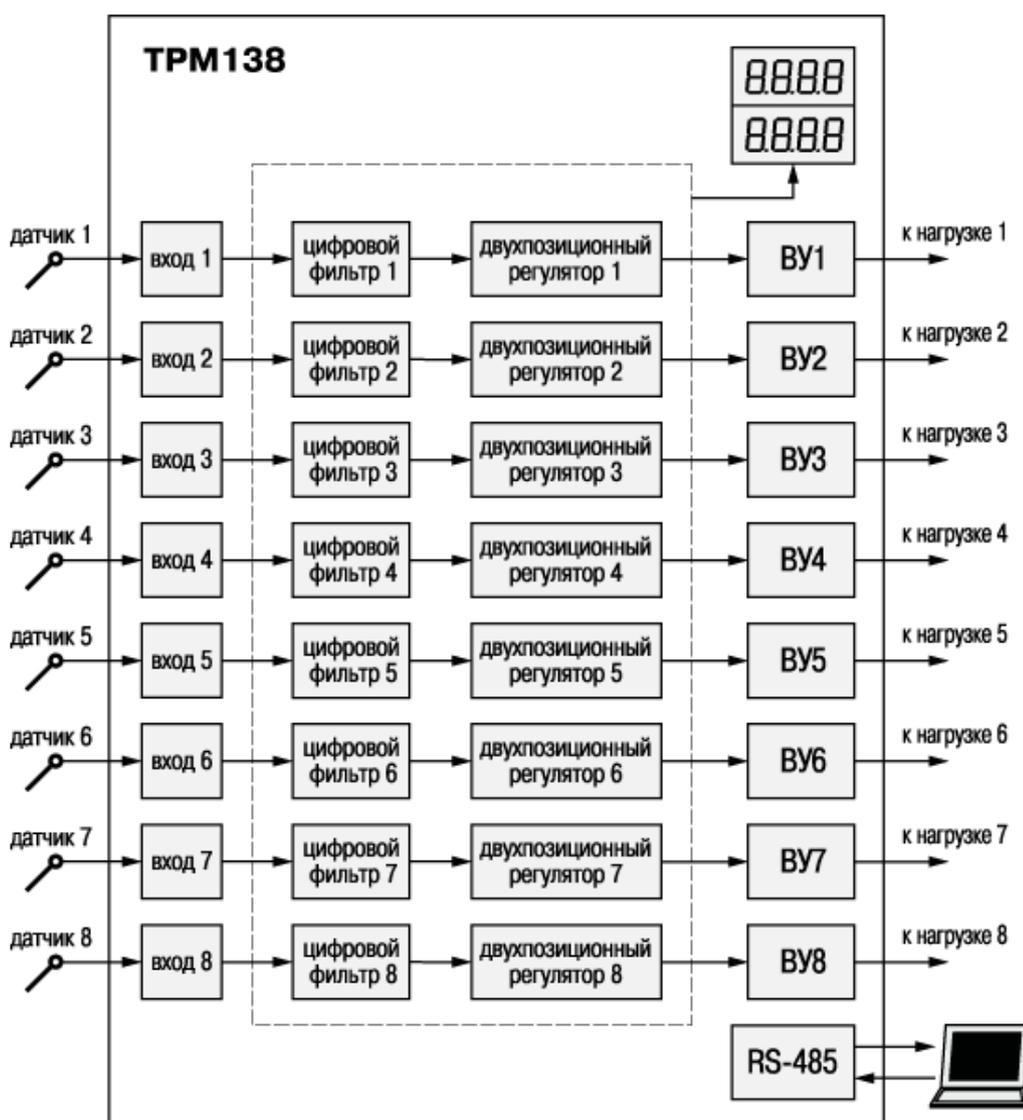


Рисунок 3 – Функциональная схема ПАК ИК на базе прибора TPM 138

В состав шкафа управления экспериментального образца ПАК ИК (рисунок 4) входят:

- измеритель-регулятор ТРМ 138;
- трехфазное твердотельное реле, через которое ТРМ 138 непосредственно управляет нагревом поверхности изделия;
- контактор и промежуточное реле, предназначенные для аварийного отключения блока нагревательного контура с индуктором в случае перегрева изделия или выхода из строя термодатчика (датчика измерения).



Рисунок 4 – Шкаф управления ПАК ИК

В результате выполненных исследований был разработан экспериментальный образец ПАК ИК на базе прибора ОВЕН ТРМ 138, состоящий из генератора ВГТ2-50/66 с микропроцессорным управлением и блока нагревательного контура с индуктором.

Эксплуатационные испытания экспериментального образца ПАК ИК проводились с помощью долот лемеха ПЛЖ 31702 из стали 65Г, предназначенных для обработки почвы (рисунок 5, а), а также замков автосцепки СА-3 из стали 20Г1ФЛ, служащих для сцепления элементов подвижного состава между собой (рисунок 5, б).

Применялась карбоксиметилцеллюлозная флюс-паста с церием [7, 8], которая слоем толщиной 0,8-1,4 мм наносилась равномерно на поверхность изделия. Индукционный нагрев приводит к расплавлению нанесенного слоя флюс-пасты на поверхности изделия. После выдержки в течение 50-70 с

равномерность температурного нагрева ( $1240^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) контролировалась с помощью экспериментального образца ПАК ИК.



а)



б)

Рисунок 5 – Детали, подвергнутые эксплуатационным испытаниям: а) доло лемеха ПЛЖ 31702; б) замок автосцепки СА-3

Процесс индукционной наплавки, осуществляемый с помощью экспериментального образца ПАК ИК, можно разбить на три стадии:

1) на границе поверхность/флюс-паста происходит интенсивный рост температуры до  $650-700^{\circ}\text{C}$ , а на границе флюс-паста/воздух температура достигает лишь  $100-150^{\circ}\text{C}$ . По времени эта стадия занимает порядка 25-30% от общего времени нагрева;

2) снижение интенсивности нагрева поверхности изделия в 3-4 раза, но при этом увеличивается скорость нагрева флюс-пасты. Продолжительность стадии составляет 40-50% общего времени нагрева;

3) интенсивность нагрева несколько понижается. На контактирующих поверхностях между зернами твердого сплава и основного металла образуется легкоплавкая эвтектика, имеющая температуру плавления  $1050-1100^{\circ}\text{C}$ .

В ходе эксплуатационных испытаний долот лемеха ПЛЖ 31702 и замков автосцепки СА-3 установлено, что долговечность деталей, наплавляемых с помощью экспериментального образца ПАК ИК с применением

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ

флюс-пасты с церием, увеличивается в 3,5-4 раза по сравнению с деталями без наплавки.

Исследования на износостойкость проводились с помощью долот лемеха ДЛ-702 из стали 65Г, предназначенных для обработки почвы (рисунок 6).



Рисунок 6 – Долото лемеха ДЛ-702

Наплавленная поверхность изделия характеризуется показателями прочности и износостойкости в 1,5-3 раза выше, чем у основного металла за счет формирования в наплавленном слое карбидов бора и хрома, а также мелкозернистой структурой благодаря наличию церия.

Выводы:

1. Разработан экспериментальный образец программно-аппаратного комплекса оборудования для индукционной наплавки деталей на базе универсального восьмиканального измерителя-регулятора, высокочастотного транзисторного генератора с микропроцессорным управлением и блока нагревательного контура с индуктором.

2. В ходе эксплуатационных испытаний с применением карбоксиметилцеллюлозной флюс-пасты с церием установлено, что значительно увеличивается долговечность, а также повышается прочность и износостойкость наплавленных поверхностей изделий различного назначения по сравнению с деталями без наплавки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 57177-2016. Индукционно-металлургический способ наплавки. Технологический процесс. – Введ. 2017.06.01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 12 с.
2. Сейдуров М.Н. Разработка программно-аппаратного комплекса оборудования для наплавки износостойких деталей в сельскохозяйственном и железнодорожном машиностроении / М.Н. Сейдуров, А.А. Ощепков // Инновации в машиностроении: материалы XI Международной научно-практической конференции. – Бийск: Изд-

во Алт. гос. техн. ун-та, 2020. [Электронный ресурс]. // URL: <https://yadi.sk/i/uKhj9DTtCCrTca>. – С. 123-126. (дата обращения: 02.12.2022).

3. Ощепков А.А. Разработка программно-аппаратного комплекса оборудования для индукционной наплавки износостойких ответственных деталей / Молодежь – Барнаул: материалы XXII городской научно-практической конференции молодых ученых // гл. ред. Ю. В. Анохин. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2021. – С. 240-241.

4. Акиншин А.А. Разработка программного комплекса по автоматизации расчета режимов индукционной наплавки на основе анализа экспериментальных данных и компьютерного моделирования / А.А. Акиншин, М.Н. Сейдуров, А.А. Иванайский // Ползуновский альманах. – 2011. – № 1. – С. 90-92.

5. Киреев С.И. Инженерный программно-аппаратный комплекс «Индукционная наплавка» / С.И. Киреев, М.Н. Сейдуров, Е.А. Иванайский, А.А. Иванайский // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 165-166.

6. Могиленко Д.И. Исследование программно-аппаратных комплексов для высокоскоростной индукционной наплавки / Д.И. Могиленко, А.А. Ощепков // Россия молодая: сборник материалов XIII Всерос. научно-практической конференции с международным участием. – Кемерово: Изд-во Кузбас. гос. техн. ун-та, 2021. [Электронный ресурс]. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2021/RM21/index.htm>. – С. 042003.1-042003.5. (дата обращения: 02.12.2022).

7. Сейдуров М.Н. Разработка нового сварочного материала для износостойкой наплавки и технологии его создания / М.Н. Сейдуров, А.Ю. Алилуев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015, Т. 3. – № 8-2 (19-2). – С. 30-34.

8. Патент РФ № 2015111549/02, 30.03.2015. Сейдуров М.Н., Алилуев А.Ю. Паста для индукционной наплавки // Патент России № 2595180. 2016. Бюл. № 23.

*Сейдуров Михаил Николаевич – к.т.н., доцент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: seidurov@mail.ru.;*

*Ощепков Алексей Александрович – ассистент кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: leha1996\_25@mail.ru;*

*Щёткин Александр Игоревич, старший преподаватель кафедры малого бизнеса в сварочном производстве ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), г. Барнаул, Россия, e-mail: aleksandr.shetkin@inbox.ru.*

## **DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL ACTIVITIES IN THE FIELD OF WELDING PRODUCTION IN ALTAI STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

**M.N. Seidurov**

The paper presents the results of the activities of the Department «Small Business in Welding Production» of Altai State Technical University for 60 years. Over the years, the department has developed such scientific areas as «Theory and practice of management of structure formation, directed crystallization and properties of welded, welded and hardened products and tools», «Electron beam welding of complex steels of special purpose and surfacing with powder alloys of complex wear-resistant coatings for defense products», «Theoretical and experimental foundations of creation and application of high-strength structural steels and new resource-saving technologies for their processing», «Technological basis for the creation of protective coatings using concentrated energy flows».

**Keywords:** scientific and pedagogical workers, welding production, scientific directions, electrosag welding, electron beam cladding, high-strength steels.

## **POLYMER WELDED JOINTS. TEACHING UNDERGRADUATE STUDENTS**

**B.I. Mandrov, I.A. Matsenko, A.A. Oschepkov**

The article explores the crucial role of the polymer materials in construction of pipeline systems and engineering constructions. It also highlights the wide use of welded joints and pertinent welding methods which creates demand for specialists with basic knowledge of the welding of polymers.

The article describes an example of a laboratory practicum on welding pre-fabricated polymer sheets and pipes, as well as on assessing welded joints done by students at the practicum. A combination of theoretical knowledge and hands-on experience acquired during laboratory work tends to build a better retained skill set in undergraduate students.

**Keywords:** *polymer materials, pre-fabricated parts, pipes, sheets, films, welded joints, hot air welding, extrusion welding, hot tool welding, visual and measurement quality control, hydrotest, electric spark tester*

## **PREDICTIVE ANALYSIS USED IN QUALITY CONTROL MANAGEMENT FOR LOWER VISUAL DEFECT RATE IN WELDED JOINTS**

**B.I. Mandrov, I.A. Matsenko, A.A. Oschepkov , V.M. Drobot,  
I.S. Koshkarov**

The article examines a way to increase competitive advantage of manufactured goods by cutting down the defect rate of welded joints. It illustrates the need to detect possible visual defects not only

through visual and measurement quality control but also at an earlier stage of designing technology for construction assembly and welding. To this end, the article suggests using methods used in machine engineering for quality control management. Defects are predicted by using FMEA process and cause-and-effect diagrams by Kaoru Ishikawa before the designed technology of construction assembly and welding is applied. Using an example of qualification butt-welded pipe joint, a plan of corrective measures is developed to prevent defects detectable by visual and measurement quality control.

**Keywords:** *competitive advantage, visual defects, visual and measurement quality control, assembly and welding technology, qualification butt-welded joints, quality control management, defect prediction, Kaoru Ishikawa diagram, corrective measures*

## **CHOOSING A METHOD FOR SETTING GMAW WIRE FEED SPEED**

**I.A. Matsenko, A.A. Oschepkov, B.I. Mandrov, Yu. S. Posylkin, A.N. Dronov**

The article compares results of different methods of setting wire feed speed for semi-automatic gas-shielded welding. Calculations and experimental data were used to set the feed speed for solid and flux-cored wire gas-shielded welding. Deviation between calculations and experimental data was defined, which informed the choice of the best method for setting wire feed speed.

**Keywords:** *solid wire welding, flux-cored wire gas-shielded welding, semi-automatic CO<sub>2</sub>-shielded welding, wire feed speed, setting the welding regime, welding machine for semi-automatic GMAW.*

## **TECHNOLOGY OF ELECTRON BEAM SURFACING IN VACUUM ON THE SEALING SURFACES OF THE PIPING AND STEAM BOILER FITTINGS**

**Yu. O. Shevtsov**

The article shows the results of research, development and application of electron beam and vacuum surfacing on the wear surfaces of pipeline and steam boiler fittings.

**Keywords:** *pipeline and steam boiler fittings, sealing surfaces, protective coatings, electron beam surfacing in vacuum*

## **INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR HARDENING AND SURFACING OF WEAR SURFACES OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH AN ELECTRON BEAM IN VACUUM**

**Yu. O. Shevtsov**

The article shows the results of research, development and application of electron beam hardening and surfacing in vacuum on the wear surfaces of internal combustion engines.

**Keywords:** *internal combustion engine parts, reinforcing and protective coatings, surfacing, electron beam in vacuum.*

## **MATHEMATICAL MODEL OF MOLTEN METAL TRANSFER DURING ARC WELDING IN A SHIELDING GAS ENVIRONMENT**

**A.G. Kulagin**

A mathematical model has been developed that combines the methods of enthalpy, effective viscosity and liquid volume to analyze the process of metal transfer in gas-shielded arc welding. This model describes the effect of current strength, surface tension forces, and gravity on the droplet profile. It is also possible to simulate non-isothermal phenomena such as heat transfer and phase change. Using this mathematical model, the shape of the melting boundaries of the welding wire, fluctuations of the drop at the tip of the wire, the characteristics of the corresponding physical variables and their influence on the transfer of molten metal are considered. The use of high-speed photography, as well as laser-shadow imaging and metallographic analysis, make it possible to verify the mathematical model. This article provides recommendations on topics that require further consideration in order to build a more accurate mathematical model of metal transfer and the process of gas-shielded arc welding.

**Key words:** *Mathematical model, gas-shielded welding, molten metal transfer, drip transfer without short circuit, spray transfer, drop transfer with short circuit, metal vapor transfer (splash), liquid volume method, enthalpy method, effective viscosity method .*

## **FEATURES OF TECHNOLOGY OF RESTORATION OF BLADES OF STEAM TURBINES OF POWER PLANTS**

**A.G. Kulagin**

The problem of erosive damage to rotor blades is disclosed as one of the main issues in the operation of steam turbines. The article describes the main points of electricity generation at thermal power plants. Application of traditional solutions for the repair of steam turbines by replacing worn rotor blades. An innovative method of cladding rotor blades "in place" using laser technology is proposed, which allows for the restoration of worn parts of the blades without their dismantling. Thanks to the flexible adjustment of the laser, the energy input is reduced to the minimum necessary values, which makes it possible to avoid overheating of the edges and reduce deformations of the blade shape. The use of a compact feeding coaxial laser head, connected to a semiconductor laser by a flexible fiber optic transmission line, promotes uniform powder feeding at any angle, which opens up the possibility of application in assembly work. The Sulzer Metco Powder Feeder allows you to precisely feed Stellite-6 powder into the laser spot area, ensuring optimal fusion of the base and weld metal. Stellite-6 is a super hard alloy based on cobalt and chromium, used as a stellite hardfacing. In the traditional method of applying stellite protection, the overlay is attached to the blade using silver soldering.

**Key words:** *repair of blades; steam turbines; laser cladding; erosion; leading edges of the blades; exit edges of the blades; restoration of the shoulder blades; stellite-6; erosive wear; blade deformation.*

## **MODERN APPROACH TO VISUAL AND MEASUREMENT NDT OF WELDED JOINTS**

**D. I. Galkin, M. P. Kleizer, A. E. Shubochkin**

The welding gauge TapiRUS for NDT Specialists developed at the Scientific Research Institute of Introscopy (RII MNPO "Spectrum") with the intention to replace the numerous patterns and devices used in visual inspection and conducting quality control of welded joints, secures strict requirements of regulatory documents to the measurement error of the parameters of welded joints and the overall dimensions of the detected defects.

The TapiRUS gauge is a new and more accurate measuring instrument. It's equipped with a complete methodological manual for measurement at all stages of the manufacture and operation of welded joints. The gauge allows you to make more than 40 measurements with the accuracy required in regulatory documents, some of which are not available to other measuring tools.

The online methodological manual and online calculator for calculating parameters not subject to direct measurement are available.

**Keywords:** building structures, steel I-welded beams, shelf overhang, flange non-perpendicularity, modeling program, APM FEM strength analysis system, angular displacement of flange overhangs, KOMPAS 3D, 3D model. non-destructive testing, visual and measurement control, visual and measurement NDT, welded joints, universal gauge, TapiRUS, digital NDT/

## **MODERNIZATION AND DESIGN OF METAL STRUCTURES FOR FRICTION STIR WELDING**

**Yu.G. Ludmirsky, S.P. Kamyshanov, S.S. Assaulenko,**

*The issues of modernization of obsolete metal structures, which were manufactured by fusion welding, are considered. Structural and technological methods of transition to the manufacture of structures using friction stir welding, which is carried out in the solid phase, are proposed. Structural forms and technologies for manufacturing structures are shown that retain the service purpose of structures, provide the required durability and allow obtaining products with minimal labor and time.*

**Key words:** structural modernization, friction stir welding, joint types, stress distribution, fusion welding, aluminum alloys.

## **USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO SEARCH FOR LEAKS IN PIPELINES HEATING NETWORKS**

**E.A. Ivanaysky, A.I. Shchetkin, A.A. Ivanaysky**

The essence of the correlation method of leak detection is considered. The main conditions leading to a decrease in the probability of detecting leaks in pipelines are indicated. It is proposed to use neural networks to detect the presence of leaks. A technique of "tokenization" of audio signals has been developed and an optimal neural network architecture has been selected. A method of processing the initial signals to obtain training and test databases is proposed. The authors managed to achieve 100% accuracy in recognizing the presence of leaks by a neural network.

**Keywords:** *acoustic signals, correlation leak detection, vibroacoustic sensors, automatic processing, mathematical analysis, modern urban environment, pipelines of thermal networks, man-made noise, signal spectrogram, Launch CorreluxView, Neural networks, Bartlett floating Window, Databases, Dropout, Flatten Batch Normalization, Dense.*

## **STEP INTO THE FUTURE, ARC WELDING IN A PROTECTIVE ENVIRONMENT AOTAI EQUIPMENT GASES, AMIG350P-Y SERIES SOURCE**

**S. Yu. Ostanin**

The AMIG series current sources use IGBT inverter technology. This control system uses a digital signal that provides a very fast response and reaction to changes in the parameters of the welding arc for very precise control of the welding process and obtaining the highest quality welds.

**Keywords:** *step into the future, arc welding in the environment of protective gases, precise control of the welding process, fast response, welds of the highest quality.*

## **COMPARATIVE STUDIES OF THE QUALITY OF WELDED JOINTS OF STEEL TANKS MADE BY METHODS OF AUTOMATIC WELDING UNDER A FLUX LAYER AND MECHANIZED WELDING IN A SHIELDING GAS ENVIRONMENT**

**V.V. Volkov, A. A. Popova**

This work is devoted to the study of the quality of joints made by methods of mechanized welding in a shielding gas environment and automatic submerged arc welding in the manufacture of horizontal steel tanks, using the method of destructive and non-destructive testing.

**Keywords:** *steel tanks, automatic submerged arc welding, mechanized gas-shielded welding, visual-measuring control, ultrasonic testing, capillary testing, tensile testing.*

## **PERFORMANCE OF NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL METHODS IN THE STUDY OF STEEL LINING**

**A. A. Oshchepkov, V. V. Wigand, I. A. Matsenko, M.E. Chitpanova**

The article is devoted to non-destructive methods of quality control and the possibility of their application not only in the control of welds, but also in the control of products of the machine-building industry. Non-destructive quality control methods allow, without destroying the product, to carry out research and, in the absence of defects, continue to operate this product. The visual use of non-destructive quality control methods in the study of steel lining for defects is shown. The produced results can serve as the basis for drawing up internal technological regulations for quality control of finished products in case of receiving controversial or inaccurate information from factory test methods.

**Key word:** *non-destructive quality control methods, steel lining, repair, fracture, visual and measuring test, magnetic particle test, penetrant test.*

## **PERFORMANCE OF NON-DESTRUCTIVE QUALITY CONTROL METHODS DURING REPAIR OF STEEL BELT OF THE PRESS**

**A. A. Oshchepkov, A. I. Shchetkin, V.V. Vigand**

*The article is devoted to non-destructive methods of quality control and the importance of their use at all stages of production and repair of welded products. Non-destructive methods of quality control make it possible to detect defects in the weld, in the heat-affected zone and in the main metal in a short time, which allows to quickly start the repair of the welded product. The visual use of non-destructive quality control methods in the repair of the steel belt of the press is shown. The produced results can serve as the basis for drawing up internal technological regulations for correcting defects in the steel belt of the press and conducting non-destructive quality control methods in order to detect defects after repair.*

**Key word:** *non-destructive quality control methods, steel belt of the press, repair, fracture, visual and measuring test, magnetic particle test, penetrant test.*

## **CONDUCTING VIBRO-DIAGNOSTIC CONTROL OF BEARING MINING EQUIPMENT**

**V.S. Kiselev, N.S. Erofeev**

The main terms and definitions, normative documentation on vibrodiagnostic control (VD) are given. The possibilities and features of the use of vibrodiagnostic control (vibrodiagnostics) for diagnosing bearing assemblies of mining equipment are shown, the stages of control are described, the requirements for personnel and means of vibrodiagnostic control, the volumes and standards for assessing the admissibility of the vibration level based on the results of VD are given.

**Key words:** *Vibration, vibration diagnostic control, bearing units, vibration amplitude, vibration displacement, vibration velocity, vibration acceleration*

# **INFLUENCE OF MANUAL ARC SURFACING MODES OF AGRICULTURAL MACHINERY WORKING ELEMENTS ON THE PROPERTIES OF WEAR-RESISTANT COATINGS MADE BY POWDERED SHS-MATERIALS**

**A. V. Sobachkin, V. I. Yakovlev, M. N. Seidurov**

A study on the selection of modes of manual arc surfacing with powder electrodes containing SHS material "titanium carbide - nickel-chromium matrix" was conducted. The content of the carbide phase varied from 10 to 30 %. To determine the rational modes of coating by manual arc surfacing, several series of experiments were conducted with the construction of an external volt-ampere characteristic. Five indicators of welding properties were taken into account: the initial ignition of the arc, the stability of the welding process, the elasticity of the welding arc, the amount of metal splashing, the quality of the formation of the deposited roller. In addition, the influence of surfacing modes on the properties of the formed wear-resistant coatings has been established. The values of the effective linear energy determining the modes of surfacing with a powder electrode made of SHS materials are calculated. The effective linear energy correlates with the structure and properties of the formed coating. With an increase in the values of the linear energy, the temperature of the welding bath increases, which causes a partial dissolution of the hardening carbide phase. The running energy does not affect the microhardness of the deposited coating – the microhardness varies from 650 to 900 HV. With an increase in the effective running energy, the relative wear resistance of the deposited coatings decreases due to a decrease in the amount of carbide grain in the coating. As a result of the conducted research, rational modes of surfacing have been determined. Surfacing should be carried out by an inverter DC power supply, with reverse polarity, welding current strength 200-220 A, surfacing speed – 0.24 cm/s.

**Keywords:** *composite material, titanium carbide, nickel-chromium matrix, powder electrode, electric arc surfacing, volt-ampere characteristic, linear energy, volume fraction of carbides, microhardness, wear resistance.*

## **REPAIR AND RECOVERY WEAR-RESISTANT ARC WELDING**

**S.G. Ivanov, M.A. Guryev, A.I. Augstkaln**

Traditional boriding methods have many limitations due to the complex process and long processing times. This study proposes a method of simultaneous restoration-strengthening surfacing of the surface with its simultaneous boriding. The advantages of the proposed method include reducing the time of the boriding process due to the development of compositions rich in boron, which eliminates the need for thermal furnaces. The proposed method was tested experimentally. Studies of the deposited layers showed that the thickness of the deposited layer reaches 500  $\mu\text{m}$  with a hardness of up to 2388 HV.

**Keywords:** boriding, hardening, surfacing, welding arc.

## **DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ASSEMBLY AND WELDING OF THE BOILER DRUM BODY**

**E.N. Lyubykh, M.N. Seidurov**

The paper considers the route of the technological process of assembly and welding of the body of the bar-ban boiler. It is shown that electroslag welding is the most rational method of welding for annular

and longitudinal seams of thick-walled vessels. The modes of electroslag welding used to perform straight and circular seams are presented. When developing the technological process for manufacturing the boiler drum body, it was proposed to use an installation for simultaneous electroslag welding of two longitudinal seams, as well as a device for a jawless method of welding ring seams.

**Keywords:** boiler drum body, electroslag welding, parameters of the welding mode, installation for welding longitudinal seams, device for welding annular seams.

## **FEATURES OF DESIGNING THE WELDED STRUCTURE OF WOODWORKING EQUIPMENT IN THE THREE-DIMENSIONAL MODELING SYSTEM**

**N.A. Ridel, M.N. Seidurov**

The paper studies the features of designing the welded structure of woodworking equipment in the system «КОМПАС-3D v20». The route of the technological process of manufacturing a prototype of the carriage frame of a band saw vertical machine has been investigated. A multi-stage development of the welded structure for manufacturability is shown. To launch a new model of woodworking equipment into mass production, it is recommended to coordinate with the simultaneous development of assembly and welding technology continuously at all stages of product design development.

**Keywords:** woodworking equipment, design of welded structures, three-dimensional modeling system, band saw vertical machine, pilot production, manufacturability.

## **DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR INDUCTION CLADDING**

**M.N. Seidurov, A.A. Oshchepkov, A.I. Shchetkin**

The paper presents the results of the development of an experimental sample of a software and hardware complex for induction cladding of parts based on a universal eight-channel meter-regulator, a high-frequency transistor generator with microprocessor control and a heating circuit block with an inductor. It is shown that software designed to predict the structure and properties of the fused layers of product surfaces is used. In the course of operational tests using flux paste with cerium, it was found that the durability increases significantly, as well as the strength and wear resistance of the welded parts increases.

**Keywords:** software and hardware complex, induction cladding, wear surfaces, flux paste, durability, wear resistance.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ

Статья объёмом от 3 страниц (по согласованию с редакцией, допускаются статьи объёмом от 3 до 10 страниц), имеющая индекс УДК, аннотацию и ключевые слова на русском языке (в начале текста статьи) с приложением в отдельном файле перевода названия, аннотации, ФИО авторов и ключевых слов на английском языке, а также сведений об авторах (учёной степени, звания и места работы, e-mail и/или контактного телефона) должна отвечать следующим требованиям:

Работы принимаются в текстовом редакторе Microsoft Word.

Во вкладке «Разметка страницы»: используется размер бумаги формата А4, ориентация листа книжная. Поля: верхнее – 3,5 см; нижнее – 2,5 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; переплет – 0 см. В диалоге «Колонки» – «Другие колонки» выбирается расположение текста «в две колонки», устанавливается ширина колонок – 7,65 см, промежуток между ними – 0,7 см. В диалоге «Расстановка переносов» выбирается «авто».

Во вкладке «Вставка» выбирается «Верхний колонтитул» – «Пустой», далее появляется вкладка «Конструктор», включаются «Особый колонтитул для первой страницы» и «Разные колонтитулы для четных и нечетных страниц». Колонтитулы от края: верхний – 2,0 см; нижний – 2,0 см.

В верхнем колонтитуле указывается: на титульной странице – «особый колонтитул»; на чётных страницах – инициалы и фамилия автора («Arial», 10 пунктов, прописные); на нечётных страницах – название статьи («Arial», 10 пунктов, прописные). Нумерация страниц проставляется шрифтом размером «Arial», 12 пунктов, курсив. Расположение нумерации – внизу страницы в нижнем колонтитуле, для четных страниц выравнивание по левому краю, для нечетных по правому.

**Структура статьи в обязательном порядке должна содержать:**

- УДК (размещение в левом верхнем углу документа);
- Названия статей набираются прописными буквами (шрифт «Arial», размер шрифта текста – 14 пунктов, полужирный) по центру документа;
- Инициалы и фамилии авторов размещаются под названием статьи (шрифт «Arial», размер шрифта текста – 12 пунктов);
- аннотация (шрифт «Arial», размер шрифта – 10 пунктов, курсив, красная строка – 0,8 см, интервал между строками «одинарный») – текст (объёмом 150 - 200 слов), отражающий актуальность, цель, методы исследования, полученные результаты;
- ключевые слова (не менее 10 слов или словосочетаний) (шрифт «Arial», размер шрифта – 10 пунктов, курсив, красная строка – 0,8 см, интервал между строками «одинарный»);
- основной текст (для основной части текста используется шрифт «Arial», размер шрифта основного текста – 10 пунктов, красная строка (отступ) – 0,8 см, интервал между строками «одинарный»);
- список литературы (шрифт «Arial», размер – 9 пунктов) оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 – 2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»;
- сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, учёная степень, звание, место работы, e-mail и/или контактный телефон – обязательно, индикаторы ORCID – по желанию);
- на английском языке перевод названия статьи, ФИО авторов, аннотации и ключевых слов в отдельном файле.

Для создания формул и таблиц используются встроенные возможности Microsoft Word. Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Microsoft Word или другими программами и вставляются в нужное место документа.

Размеры рисунков не должны превышать границы полей страницы основного текста документа с учетом подрисуночной подписи. Рисунки издательством не редактируются. Если рисунок по ширине превышает размер колонки, то необходимо ставить перед ним и после него разрыв раздела на текущей странице и располагать рисунок в начале или в конце страницы.

Рисунки, надписи и объекты Microsoft Word должны перемещаться вместе с текстом, т. е. быть не поверх текста!

При приеме работы в печать обязательно наличие твердой копии и экспертного заключения!

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Публикации принимаются на русском и английском языках.

К статье прилагается согласие на обработку персональных данных.

Материалы журнала (постатейно) и сопроводительная документация собираются и передаются в редакцию ответственным за выпуск лицом.

Все статьи будут проверены в системе «Антиплагиат», при оригинальности менее 75 % статьи будут возвращены авторам.

**Контактная информация:**

Стопорева Татьяна Александровна – тел.: 89039905960, e-mail: orpd\_sta@mail.ru

Степанова Анна Александровна – тел. 89967044850, e-mail: editor.altgtu@mail.ru

*ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ*

*Электронное периодическое научное издание*

*Статьи опубликованы в авторской редакции*

*Оформление и оригинал-макет: **М. Е. Читпанова***

Издательство Алтайского государственного  
технического университета им. И. И. Ползунова  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46



ISSN 2079-1097

Издательство АлтГТУ им. И. И. Ползунова  
656038 г. Барнаул, пр. Ленина, 46, каб. 113 главного корпуса  
тел./факс +7 (3852) 29-09-46  
сайт: <http://ipc.altstu.ru/> e-mail: [altgtu@mail.ru](mailto:altgtu@mail.ru)  
Дизайн обложки: Р.С. Жуковский, доц. каф. ТИАрх

**НА ОБЛОЖКЕ:**

Главный корпус АлтГТУ, памятник И. И. Ползунову, г. Барнаул