

**ЭЛЕКТРОННОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ**



# **СВАРКА и КОНТРОЛЬ**



**У Ф А**

**УНПЦ «Издательство УГНТУ»**

**2022**

УДК 621.791+620.1

ББК 30.616

С 24

### **УЧРЕДИТЕЛЬ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

#### **Главный редактор**

Файрушин Айрат Миннуллович – кандидат технических наук, доцент

#### **Члены редакционной коллегии**

Мардаганиев Марат Ринатович

Лутфуллин Рамиль Яватович

Даминев Рустем Рифович

Казаков Сергей Юрьевич

Туманова Елена Юрьевна

**С 24** «Сварка и контроль»: Электронное научное издание. – Уфа: УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. – 144 с.

ISBN 978-5-7831-2289-7

Электронное научное издание «Сварка и контроль» является сборником, подготовленным по материалам III Всероссийской научно-технической конференции «Сварка и контроль – 2022», в которое вошли статьи ведущих специалистов, ученых, а также молодых сотрудников, связанных со сварочным производством и смежными отраслями.

Издание будет полезно студентам и аспирантам технических направлений; научным сотрудникам и специалистам сварочного производства. Статьи публикуются в авторской редакции.

Адрес издателя и редакции: 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Ответственное подразделение: кафедра «Оборудование и технологии сварки и контроля»

Тел.: 8 (347) 243-16-38

E-mail: [konf\\_otsk@mail.ru](mailto:konf_otsk@mail.ru)

УДК 621.791+620.1

ББК 30.616

ISBN 978-5-7831-2289-7

© ФГБОУ ВО «Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет», 2022

© Коллектив авторов, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Ахмадеев Р.Ф. Изучение способов защиты обратной стороны шва при односторонней аргодуговой сварке коррозионностойких сталей .....	5
Борисов А.О. Новый способ изготовления насосных штанг сваркой трением.....	9
Низаметдинова Е.А. Повышение эффективности работы смесительной установки для гидравлического разрыва пласта.....	12
Нескоромный С.В. Формирование неразъемных соединений из разнородных сплавов в условиях супержестких режимов термодинамического воздействия .....	15
Людмирский Ю.Г. Модернизация и проектирование металлоконструкций под сварку трением с перемешиванием.....	20
Алешин Н.П. Управление процессом аргодуговой сварки с использованием дуги в качестве источника информации .....	24
Шилов Д.С. Повышение качества наплавленных уплотнительных поверхностей деталей арматуры котлов на основе совершенствования способа ручной дуговой наплавки покрытым электродом (РДН).....	29
Щепкин В.В. Сварка трением штуцеров и патрубков малого диаметра .....	33
Синакаев Р.Т. Разработка способа обеспечения точности сборки внутренних кромок под сварку деталей трубопроводов при выполнении монтажных работ на трубопроводах .....	37
Казаков С.Ю. Разработка рекомендаций по замене дефектного участка трубопровода, находившегося в эксплуатации.....	40

### ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Гильманшин Р.А. Оценка несущей способности металлоконструкций с технологическими дефектами на основе использования критериев интерполяционного типа.....	44
Аджибае Д.А. Разработка критериев идентификации и интерпретации по типам дефектов стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом.....	47
Зорин А.Е. Отработка технологии неразрушающего контроля уторного узла вертикального цилиндрического резервуара .....	51

### МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМООБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Галиева Э.В. Твердофазная сварка жаропрочных сплавов на основе никеля.....	55
Бадьин Ю.А. Совершенствование аустенитного варианта сварки теплоустойчивых сталей .....	58
Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазная свариваемость кристаллических материалов .....	64
Имаев М.Ф. Сварка трением с перемешиванием труб из алюминиевого сплава 6063: термообработка.....	68
Сафиуллин Р.В. Разработка технологии изготовления сварных ячеистых конструкций из листовых титановых сплавов для авиакосмического применения .....	72
Мухаметрахимов М.Х. Способ сварки давлением заготовок из сплава Zn-22% Al в условиях низкотемпературной сверхпластичности .....	77
Закиров Р.Р. Разработка технологии сварки трубопроводов из железоникелевых и никелевых сплавов .....	82

Литвинова Т. Р. Повышение хладостойкости сварных соединений путем микролегирования сварного шва через электродное покрытие основного типа .....	86
Саркеева А.А. Ударная вязкость слоистого материала из титанового сплава ВТ20 ....	90
Сугоняко И.С. Формирование композита $Al+Fe_2O_3$ при сварке трением с перемешиванием .....	93
Вафина А.В. Исследование сварных соединений из стали 20 на стойкость к коррозии .....	97
Шекшеев М.А. Особенности формирования структуры наплавленного металла в присутствии ультрадисперсных тугоплавких инокуляторов .....	100

### **РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Медведев А.Ю. Перспективы технологии роботизированной сварки плавящимся электродом сплава ЭП718 .....	104
Панков В.В. Методика оценки практических навыков сварщиков с применением технологии 3DLD .....	109
Сайгин Д.И. О возможности применения нейронных сетей оценки навыков специалистов сварочного производства .....	114
Мансуров Д.И. О возможности роботизации процесса приварки труб в трубные решетки кожухотрубчатых теплообменников .....	117

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Коробцов А.С. Перспективы болонского процесса в российском инженерном образовании .....	120
Марьина И.С. Повышение эффективности системы мотивации персонала сварочного производства .....	125
Муляшова Н.Б. Организационно-управленческие решения по повышению производительности сварочных работ (в условиях ООО «БАШНЕФТЬ-СТРОЙ») .....	129
Черногоров А.Л. Самооценка нравственного воспитания молодежи ДГТУ .....	134
Афанасьев Р.И. Цифровая трансформация образования с использованием инструментов искусственного интеллекта .....	140
Туманова Е.Ю. Конкурсы профессионального мастерства как форма мотивации и профориентации школьников .....	144

## ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

УДК 621.791.011

### ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ЗАЩИТЫ ОБРАТНОЙ СТОРОНЫ ШВА ПРИ ОДНОСТОРОННЕЙ АРГОДУГОВОЙ СВАРКЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Ахмадеев Р.Ф.<sup>1</sup>, Мансуров И.Р.<sup>2</sup><sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа<sup>2</sup>ООО"Башнефть-Строй"г.Уфа

#### Аннотация.

Рассмотрены различные способы защиты корня шва при аргодуговой сварке. Применение защитных предложенных флюс-паст позволяет получать качественную защиту корня шва при аргодуговой сварке, что в свою очередь обеспечивает качество выполнения сварного шва в целом. По нашему мнению, флюс-пасты Н20У и НЖ8 можно рекомендовать к использованию при сварке технологических трубопроводов из коррозионностойких сталей.

#### Общие сведения

Основной сложностью выполнения сварных соединений из коррозионностойких сталей и сплавов является их склонность к образованию горячих трещин в металле сварного шва. Кроме того, при сварке трубопроводов требуется обеспечить коррозионную стойкость сварного шва в условиях эксплуатации трубопровода [1], [2].

Качество выполненных сварных соединений в многом определяется качеством формирования корневого шва как при аргодуговой сварке неплавящимся электродом, так и при комбинированной сварке (РД+РД, РАД+МАДП и др.).

На рисунке 1 представлено фото корня шва при обеспечении качественной защиты корня шва, а на рисунке 2 представлено фото корня шва при плохой защите корня шва от окисления с образованием «ежиков»



Рисунок 1 – Фото корня шва при обеспечении качественной защиты корня шва



Рисунок 2 – Фото корня шва при плохой защите корня шва от окисления с образованием «ежиков»

При плохой защите обратной стороны (корня) шва жидкий металл со стороны корня окисляется. Поверхность окисленного металла, в том числе и окисленные кромки со стороны корня шва плохо смачиваются вновь подаваемым присадочным металлом. В

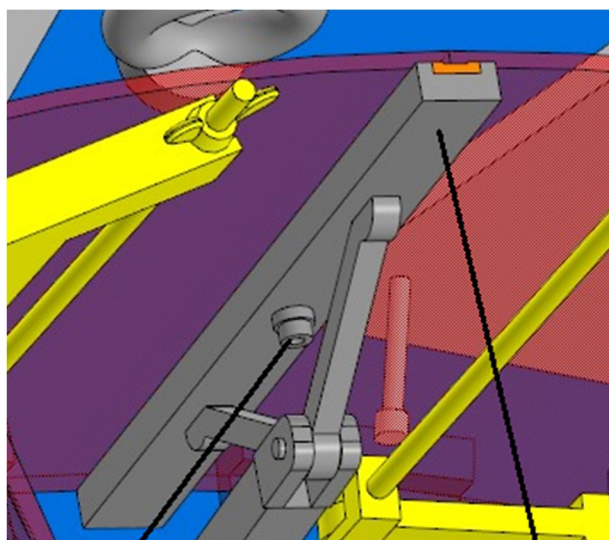
результате в корне шва образуются натеки металла, которые застывая, образуют так называемые «ежики».

Для обеспечения качественного формирования обратной стороны (корня) шва при РАД требуется обеспечить качественную защиту обратной стороны шва от окисления при сварке.

Традиционным способом защиты обратной стороны шва от окисления при сварке РАД и формирования валика шва с внутренней стороны шва является подача аргона к корневой части шва.

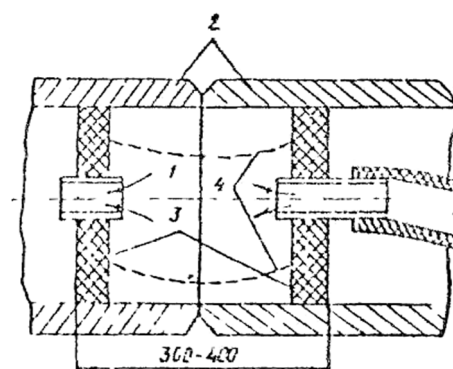
При сварке деталей подача аргона может быть обеспечена применением специальных приспособлений, которые помимо удержания тонкостенных деталей от провисания обеспечивают подачу аргона к корневой части шва. Схема представлена на рис 3. Такой способ защиты чаще всего реализуется при сварке тонкостенных деталей, например, в авиационной промышленности.

При сварке трубопроводов для обеспечения формирования обратной стороны шва обеспечивают заполнение внутренней полости трубопровода аргоном с целью вытеснения воздуха. Для снижения расхода аргона на поддув устанавливают заглушки, для создания замкнутых полостей небольшой протяженности рисунке 4. Пример подачи аргона внутрь трубы приведен на рисунках 5 и 6.



1 – штуцер подачи аргона в подкладку  
2 – подкладка для удержания кромок и подачи аргона к кромкам шва

Рисунок 3 – Подача аргона для защиты корня шва тонкостенных деталей.



1 – защитный газ;  
2 – свариваемые детали;  
3 – заглушки;  
4 – соединительные тросики

Рисунок 4 – Схема защиты корня шва трубопроводов путем создания замкнутых полостей под корнем сварного шва

При таком способе защиты корня шва требуется большой расход аргона и время на вытеснение воздуха из полости за счет того, что аргон имеет более высокую плотность. Для исключения перемешивания аргона с воздухом его подачу в полость требуется проводить с небольшим напором, чтобы обеспечить ламинарное течение потока аргона при попадании в полость.



Рисунок 5 – Заполнение полости трубопровода аргоном для защиты корня шва от окисления.



Рисунок 6 – Заполнение полости трубопровода аргоном для защиты корня шва от окисления.

При возникновении турбулентного потока аргона при попадании в защищаемую полость качество защиты ухудшается за счет перемешивания аргона с воздухом. В этом случае для полного вытеснения воздуха из полости потребуется большее время, а значит и значительно больший расход аргона.

Способ защиты корня шва путем заполнения полости трубы аргоном применим при сварке заготовок. При выполнении монтажных стыков, при сборке трубопровода из готовых секций, подача аргона внутрь трубы затруднительна, иногда невозможна.

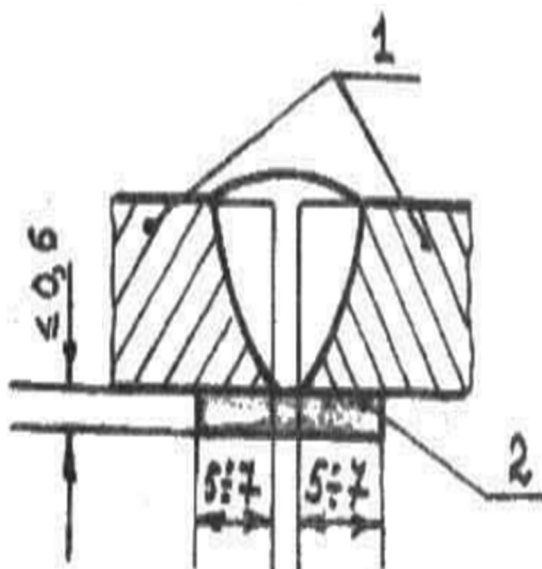
Альтернативным способом защиты корня шва является нанесение защитных флюспаст, обеспечивающих защиту и формирование обратной стороны шва при РАД [3], [4].

Для защиты обратной стороны шва в труднодоступных местах, при сварке разнотолщинных элементов, сварке фасонных элементов (отводов, тройников, переходов и т.п.) рекомендуется для защиты корня шва при аргонодуговой сварке использовать специальные защитные флюсы Н-20У или НЖ-, изготавливаемые по ОСТ 1.41174-78 и которые обеспечивают защиту корня шва не хуже, чем защита поддувом аргоном [3, 4]. Эти флюс-пасты с успехом используются в авиационной промышленности.

Для приготовления флюса берется на 1 кг шихты флюса 0,65 кг жидкой силикатной связки или 0,75-0,85 кг 1% водного раствора Na-КМЦ. Пред приготовлением флюса шихту флюса рекомендуется подсушить при 100°C в течение 2 часов для удаления влаги. Шихта флюса и жидкое связующее взвешиваются в нужном количестве и смешиваются в пластмассовых, металлических стеклянных или фарфоровых сосудах с широким горлом до полного исчезновения комочков и получения однородной сметанообразной массы.

**Применение флюсов.**

Флюс наносится кистью или шпателем на чистую подготовленную под сварку поверхность толщиной не более 0,6мм и шириной 5-7мм (рисунок 8).



1 – свариваемые детали; 2 – флюс.

Рисунок 7 – Схема нанесения флюса перед выполнением корня шва

Высыхание флюса происходит через 30-60 мин при комнатной температуре.

Допустимая продолжительность хранения деталей с нанесенным флюсом не должна превышать одной смены (8 часов).

Шлак и флюс, оставшиеся в сварном соединении после сварки неопасны в коррозионном отношении. В случае необходимости остатки флюса удаляются металлическими щетками из нержавеющей стали или отстукиванием.

Готовый (разведенный со связующим) флюс хранится в сосудах из стекла, пластмассы или нержавеющей стали и может быть использован до появления реакций, вызывающих газообразование (примерно 1 сутки).

По данным [3], [4] разработанные в нашей стране флюс-пасты Н20У и НЖ8 применяются в авиационной промышленности и обеспечивают качественное формирование обратного валика в корневом слое шва. Применение флюс-паст позволяет гарантированно защитить корень шва от окисления при сварке и обеспечить их коррозионную стойкость.

Данные флюсы в настоящее время не выпускаются производителями сварочных материалов. Предприятия, заинтересованные в применении флюс-паст, изготавливают их самостоятельно, силами своих химических лабораторий.

#### Список использованных источников.

1. Повышение безопасности при эксплуатации узлов ответвления трубопроводов с помощью укрепляющих (накладных) колец. Яковлева Д.Н., Файрушин А.М., Исламова А.В. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2018. № 6. С. 43-59.

2. Оценка остаточного ресурса нефтегазохимического оборудования по параметрам испытаний. Зарипов М.З., Хабиров И.М., Халимов М.Ф. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2018. № 5. С. 198-213.

3. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов (обзор) Ч1 ВИАМ 2002. [ <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2002/2002-203706.pdf> ]

4. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов (обзор) Ч2 ВИАМ 2002. [ <https://viam.ru/sites/default/files/scipub/2002/2002-203727.pdf> ]



УДК 622.23.05

## НОВЫЙ СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАСОСНЫХ ШТАНГ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ

Борисов А.О.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Установка скважинного штангового насоса (УСШН) позволяет вести добычу нефти на завершающих стадиях освоения скважин. Постоянный рост малодебитных скважин и переход месторождений на поздние стадии разработки скважин только обостряют необходимость в УСШН. Но и у данной установки имеется элемент, подверженный внутренним напряжениям, из-за которых часто происходит обрыв штанги и остановка добычи. Галтельная часть перегревается в процессе высадки головки штанги, что является актуальной проблемой сотен тысяч скважин, расположенных на территории Российской Федерации. В статье представлен способ решения проблемы с обрывом штанги, обеспечивающий отказ от процесса высадки головки штанги, что упрощает их серийное производство.

Сварка трением позволяет сохранять целостность структуры металла после процесса сварки, а также минимизирует тепловое воздействие на основной металл [1,2]. Тепловая энергия в данном процессе возникает благодаря вращению одной заготовки относительно второй и одновременно их соприкосновения в зоне контакта. После того, как одна заготовка перестанет вращаться и обе детали примут неподвижное положение, их резко сдавливают, прикладывая усилие проковки. Совместное пластическое деформирование создает неразъемное сварное соединение. Однако нагрев деформируемых частей обеспечивается работой на преодоление силы трения между деталями. При таком способе сварки энергии тратится в разы меньше, чем при других способах, привычных для нас. Такой процесс позволяет соединять разнородные металлы, такие как алюминий-медь, аустенитные стали с мартенситными и другие. Также при использовании сварки трением можно слегка пренебречь подготовкой свариваемых поверхностей, так как небольшие отклонения поверхностей, коррозия, брызги масла и краски прекрасно удаляются на стадии нагрева свариваемых поверхностей. Пристальное внимание к обработке поверхностей под сварку следует обратить при коррозии и окалине, возникшей при прокатке ил штамповке, а также при сварке разнородных сталей и сплавов.

При составлении протоколов допусковых испытаний и определения механических свойств соединения после сварки трением производят испытания на изгиб, растяжение, кручение. Замеряют твердость полученного соединения, и снимают микро- и макроструктуру образца. По регламенту неразрушающий контроль сварных соединений является обязательным, для этого стык проверяют пенетрантами, ультразвуковой дефектоскопией, рентгенографическим способом, гамма-лучами, но все эти способы недостаточно достоверны, при контроле соединений, выполненных сваркой трением. Для более полного и объективного результата оценки сварного соединения используют показатели, полученные после механических испытаний, а именно после испытаний на ударный изгиб и усталостную прочность [3].

Качество сварных соединений напрямую влияет на надежность и долговечность работы насосного оборудования. Увеличивая площадь свариваемых поверхностей удается исключить несоосность деталей, используемых для сборки насосной штанги, таким образом предлагается способ изготовления насосных штанг сваркой трением (патент РФ №2748194). Данное новшество может быть использовано для усовершенствования добычи нефти установками скважинных штанговых насосов, а именно при изготовлении насосных штанг. Процесс изготовления насосной штанги включает в себя: прокатку прутка будущей штанги, операции подготовки данного прутка для последующей формовки, изготовление

из части прутка резьбовой головки с резьбой, а также формирование из прутка тела штанги, имеющее конусообразную форму, к которому непосредственно приваривается головка, которая имеет конусообразную выемку для стыковки тела штанги, при этом длина усеченного конусообразного торца тела штанги должна быть меньше длины конусообразной выемки резьбовой головки. Конусообразная форма тела штанги и конусообразная выемка на резьбовой головке позволяет в процессе сварки трением удалять в месте контакта воздух и вредные примеси, а также грат свободно вытекает по резьбовой головке, что минимизирует возможность образования дефектов в сварном соединении [4,5].

На рисунке 1 представлен вариант сварки трением насосной штанги. Способ осуществляют следующей последовательностью операций.

Выборка металла по необходимым параметрам, в зависимости от условий добычи нефти.

Прутки прокатываются на станках, получая необходимую форму, заданной оператором, механически обрабатываются дробеструйной обработкой, полируются.

Задается конусообразная форма тела штанги и конусообразная выемка в резьбовой головке на токарном станке. Осуществляют поверхностную механическую обработку заготовок головок штанг и проточку конусообразной выемки таким образом, чтобы их длина превышала длину конусообразных торцов прутков. Свариваемые детали полностью очищаются от масла, влаги, окалины и загрязнений, приводящих к образованию дефектов в сварном соединении.

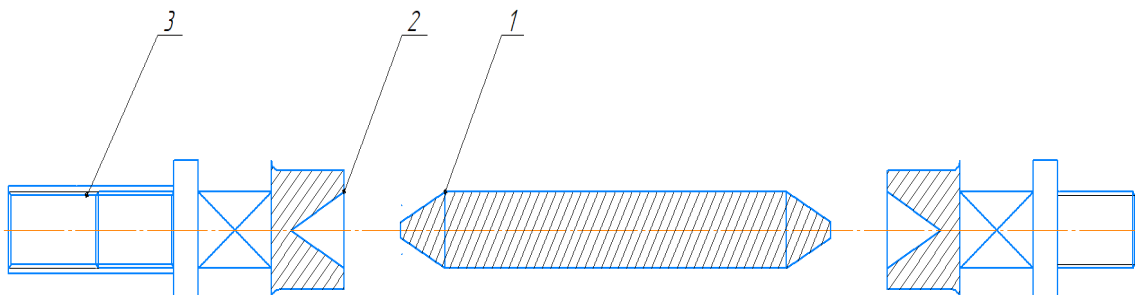
Тело штанги с выточенным конусообразным торцом 1 жестко закрепляют в неподвижном патроне. Затем резьбовую головку, выполненную с конусообразной выемкой 2 жестко закрепляют в подвижном патроне. Таким образом сборка под сварку завершена и соблюдена высокая точность подготавливаемых деталей.

Головка штанги 2 вращаясь постепенно приближается к телу штанги 1 и происходит процесс сварки трением.

Происходит проковка сварного соединения и последующее удаление усиления шва токарным резцом.

На одну из резьбовых головок готовой насосной штанги навинчивают муфту для последующего свинчивания насосных штанг в колонну.

Данная последовательность сборки и сварки позволяет исключить отсутствие несоосности тела штанги с головкой штанги. Переход от процессаковки головки на теле штанги к процессу приварки головки к штанге позволит многократно снизить статистику обрывов штанговых колонн, увеличит межремонтный период скважин, что повысит уровень добычи нефти [6].



1 – тело штанги с конусообразным торцом; 2 – резьбовая головка с конусообразной выемкой; 3 – соединительная муфта насосных штанг.

Рисунок 1 – Пример реализации способа изготовления насосных штанг

Большое количество публикаций научно-технической литературы связано с упрощением процесса высадки резьбовой головки на теле штанги. Предлагаемый способ сварки тела штанги с резьбовой головкой позволит увеличить прочность и работоспособность штанги, и в целом штанговой колонны. Использование данного метода позволит соединить небольшую резьбовую головку с вытянутым телом штанги без создания высоких сварочных напряжений после сварки. А также уменьшить зону термического влияния.

Осуществление сварки насосных штанг на этапе изготовления позволит упростить процесс, повысить качество выпускаемой продукции, минимизировать дефекты и увеличить добычу нефти из скважин.

#### **Список использованных источников.**

1. Оценка коррозионной стойкости комбинированных соединений труб с трубной решеткой, полученных с применением различных способов сварки. Токарев А.С., Каретников Д.В., Ризванов Р.Г., Черепашкин С.Е., Муликов Д.Ш. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2019. № 6. С. 114-133.

2. Эффективность использования альтернативных технологий при изготовлении комбинированных соединений труб с трубными решетками. Яхин А.В., Каретников Д.В., Ризванов Р.Г., Токарев А.С. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 7. С. 36-39.

3. Аввакумов, И. И. Анализ технологического процесса сварки трением / И. И. Аввакумов // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. Материалы конференции. Сборник докладов. В 6-ти томах, Казань, 10-11 ноября 2021 года. – Казань: Индивидуальный предприниматель Сагиева А.Р., 2021. – С. 246-253. – EDN EXQNLB.

4. Справочник по добыче нефти / Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Молчанова В.А., Волков М.Г. – Пермь: ООО «Астер Плюс», 2020. – 600с.

5. Насосные штанги / Бахтизин Р.Н., Ризванов Р.Р., Уразаков К.Р., Хакимов Т.А. – Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело» - 2012, 80с.

6. Способ изготовления насосных штанг / Файрушин А.М., Борисов А.О. // Патент РФ № 2748194 опубл.20.05.2021, Бюл. №14.

УДК 62-237

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СМЕСИТЕЛЬНОЙ  
УСТАНОВКИ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА**

Низаметдинова Е.А., Борисов А.О.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.**

Гидравлический разрыв пласта является самым востребованным способом для «оживления» добычи в скважинах, так как уровень добычи нефти на актуальном этапе развития нефтегазодобывающей промышленности стремительно растет. А дебет скважины постепенно угасает по сравнению с начальным этапом запуска скважины после ее строительства. Гидравлический разрыв пласта осуществляет не одна машина, а целый флот. Одним из элементов смесительной установки для гидроразрыва пласта, приводящим к поломкам является турбина миксера, которая изнашивается в процессе работы абразивным воздействием смеси. Турбину миксера отдельно приобрести невозможно, что увеличивает заинтересованность в нахождении способа ремонта данного узла агрегата. В данной статье рассматривается способ наплавки электрода, с высоким содержанием хрома, на внутреннюю часть турбины. Рассматривается воздействие различных факторов на условия проведения наплавки, с целью выявления лучшего метода защиты, наплавленного шва от трещин, и ремонта турбины от абразивного износа.

Для увеличения потока поступающих из скважин нефти и газа используется метод гидравлического разрыва пласта (ГРП). При проведении гидравлического разрыва пласта пропант закачивается под высоким давлением в скважину через созданную в целевом пласте трещину. Таким образом обеспечивается обильный приток добываемой нефти газа и др. [3].

Метод ГРП позволяет увеличить дебит скважин, на которых он применяется. Скважины, добыча в которых обычными способами уже невозможна, простаивают, ломаются и ржавеют, что неблагоприятно сказывается на их окупаемости. Гидроразрыв позволяет возобновить работу простаивающих скважин, а также благодаря ему добывается сланцевый газ и газ уплотненных песчаников.

Трещина в пластах, образуемая в процессе ГРП, самопроизвольно закрывается, дабы избежать этого в нее мощными насосами закачивают жидкости разрыва. В составе жидкости есть мелкий песок – пропант, который и оказывает колоссальный абразивный износ на всю смешивающую аппаратуру передвижной установки. В составе других жидкостей используется кислота, которая не только разъедает стенки созданной в пласте трещины, но и негативно сказывается на оборудовании смесительной установки.

Флот для гидравлического разрыва пласта (комплекс для ГРП) включает следующее оборудование:

- насосное;
- смесительное;
- станцию управления и контроля;
- машина манифольдов;
- гидратационное;
- оборудование, подающее сыпучие материалы (пропантовозы);
- дополнительное вспомогательное оборудование (установки подогрева, установки для ввода химических добавок и др.) [4].

Целевое применение смесительной установки для ГРП (блендер): подача низко и высоковязких жидкостей с различной концентрацией пропанта. Оборудование выполняет один из основных технологических процессов гидроразрыва пласта, проводя смешивание химреагентов и кислотную обработку скважин.

В конструкции смесительной установки имеется турбина, в которой происходит перемешивание компонентов для закачки в скважину. Перемешивание осуществляется благодаря вращающемуся внутри турбины шнеку. Шнек и турбина испытывают колоссальное напряжение, а в следствии этого – износ. На рисунке 1 представлен износ шнека смесительной установки.



Рисунок 1 - Изношенный и новый шнек

На рисунке 2 видно, как происходит износ смесительной турбины.



Рисунок 2 - Износ турбины

Если шнек при износе можно поменять на новый и продолжить работу, то с турбиной такой возможности нет. Турбину не производят отдельно, как запчасти. В связи с этим был разработан способ ремонта турбины для уменьшения абразивного износа, а следственно, увеличения её срока эксплуатации. На стенки турбины наплавляют электрод с высоким содержанием углерода и хрома. Толщина стенок увеличивается, что увеличивает срок службы турбины, а после того, как слой наплавки стирается - его снова можно наплавить.

Но у всего этого метода наплавки есть огромный минус. Так как наплавляется электрод с высоким содержанием углерода на поверхности шва образуются продольные трещины, которые снижают прочность наплавленной поверхности и при эксплуатации будут просто отрываться [2].

Основываясь на опыте наплавки на стенки турбины, были проведены эксперименты с наплавкой высоколегированного электрода на стальную пластину марки 09Г2С при трех различных условиях, с целью подобрать лучший химический состав и прочность:

1. Наплавка в обычных лабораторных условиях;
2. Наплавка в лабораторных условиях с использованием ультразвука;
3. Наплавка при нагревании пластины до 400 °С и остывании при температуре 35°С.

После наплавки и остывания были произведены замеры твердости швов:

Таблица 1 – Замеры твердости

Режим обработки	Твердость в точках замера, HRC				
	Вершина шва	Середина шва	Зона сплавления	Околошовная зона	Основной металл
Без обработки	77,8	76,4	37,1	32,2	30,8
С обработкой ультразвуком	64,2	70,8	70,1	24,5	21,3
С предварительным нагревом до 400°С	68,6	51,3	39,5	26,3	17,2

Основываясь на результатах замеров твердости, можно сделать вывод, что самое «мягкое» соединение получается при сварке с предварительным подогревом.

Также был определен химический состав наплавленных швов портативным рентгенофлуоресцентным анализатором на наличие хрома (Cr) [1]. Такой легирующий элемент как хром повышает прочность и твердость сварного соединения, а значит будет соединению помогать сопротивляться абразивному износу. Содержание хрома при наплавке в различных условиях представлены на графике 1.

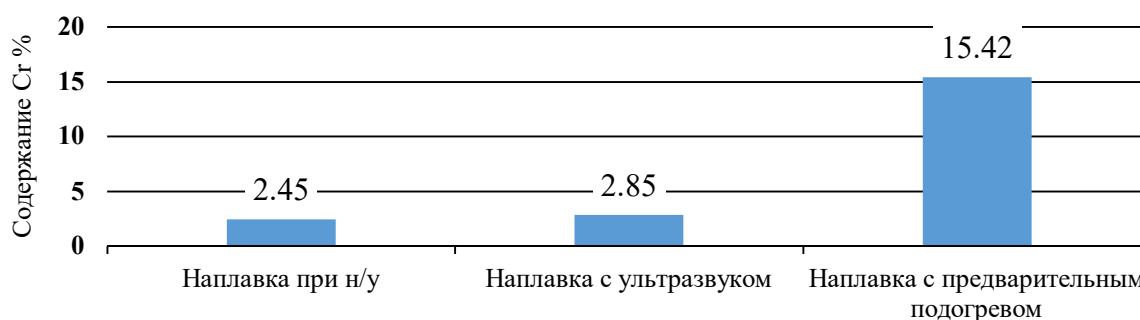


График 1 – Содержание хрома при различных условиях наплавки

В результате произведенных исследований твердости и химического состава наплавленных швов определено, что трещины возникают из-за чрезмерной твердости сварного соединения и, используя наплавку с предварительным подогревом до 300 - 400 °С, обеспечивается равномерное перемешивание сварочной ванны с основным металлом, что снижает твердость наплавленного шва, но повышает процентное содержание легирующих элементов, способствующих повышению прочности и трещиностойкости сварного соединения.

**Список использованных источников.**

1. Структура и свойства наплавленного металла системы С-Fe-Cr-Ni-Mo-Ti-N. Литвиненко-Арьков В.Б., Соколов Г.Н., Трошков А.С., Лысак В.И., Антонов А.А. Сварка и диагностика. 2013. № 2. С. 16-19.
2. Зарипов, М.З. Разработка технологического процесса изготовления сварных конструкций / М.З. Зарипов, А.М. Файрушин, Н.В. Жаринова. - Уфа: УГНТУ, 2018.
3. Механизированная добыча нефти (сборник изобретений)/К.Р. Уразаков. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2010. – 329 с.
4. Справочник по добыче нефти / К.Р. Уразаков, Э.О. Тимашев, В.А. Молчанова, М.Г. Волков. – Пермь: ООО «Астер Плюс», 2020. – 600 с.

УДК 621.79.01

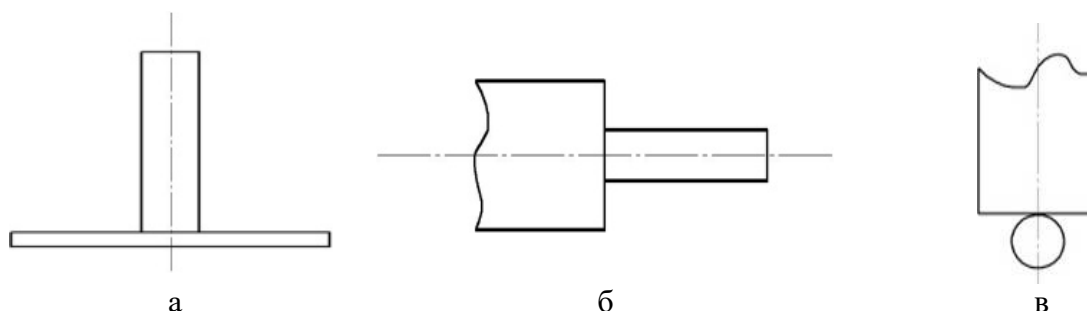
## ФОРМИРОВАНИЕ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ СУПЕРЖЕСТКИХ РЕЖИМОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Нескоромный С.В.

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону

**Аннотация.** В статье показана актуальность проблемы сварки разнотолщинных конструкций из разнородных сплавов. Приведены трудности их соединения. Описаны применяемые способы получения таких соединений, отмечены существенные недостатки, ограничивающие их применение при сварке цветных сплавов в разнородном сочетании. Предложена схема реализации процесса за счет электромагнитной энергии, возникающей при протекании тока через витки индуктора и свариваемые детали. Определены параметры процесса высоковольтной конденсаторной сварки на супержестких режимах воздействия. Показано, что при сварке разнотолщинных конструкций из цветных сплавов необходимо учитывать полярность тока.

Необходимость соединения разнотолщинных конструкций в машиностроении, химической промышленности, приборостроении ограничивает большинство способов сварки, особенно, при создании неразъемных соединений из цветных сплавов в разнородном сочетании. Длительность нахождения металла при температурах интенсивного роста зерна, в конечном счете, формируют конечную структуру, влияющую на длительность эксплуатации конструкции в целом, рисунке 1.



а – стержень-диск; б – стержни разного диаметра встык; в – стержень-шарик

Рисунок 1 – Конструктивные виды разнородных соединений

Как правило, при сварке цветных сплавов в разнородном сочетании, возникают технологические трудности, связанные с: разницей размеров кристаллической решетки более 15% у свариваемых металлов, температуро- и теплопроводностью, разными условиями теплоотвода из-за разной толщины [1].

Наиболее широкое применение для получения таких конструкций получили контактные способы сварки. Для локализации тепловыделения и расширения соотношений в разнице толщин (1:100) хорошо зарекомендовали себя контактная сварка с использованием накопленной энергии в батареях конденсаторов (точечная, шовная). Но, их использование ограничено толщиной свариваемых деталей и основное применение нашли в микроэлектронике, приборостроении [2].

Разработанные технологии сварки разнотолщинных конструкций в ближнем и дальнем Зарубежье основаны на статическом предварительном прижатии свариваемых деталей пружинным механизмом, разрядом накопленной энергии в батареях конденсаторов, возбуждении дуги и оплавлении зоны соединений, рисунке 2а. Возбуждению дуги основано на перегорании технологического выступа на одной из свариваемых деталей, сближении

свариваемых элементов с последующей совместной кристаллизацией, рисунке 2в.

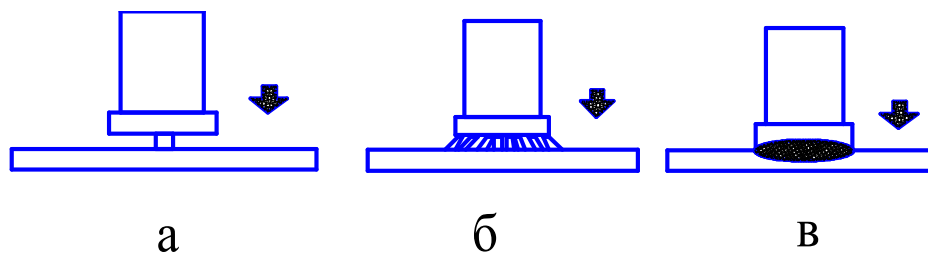


Рисунок 2 – Технология конденсаторной сварки с предварительным контактом

Разработаны и нашли широкое применение как технологические приемы возбуждения дуги (отскоком, сближением, с предварительным контактом), так и формой подготовки торца стержневого элемента (на конус, плоская поверхность, с микровыступом) [3]. Каждый технологический прием рекомендуется применять в зависимости от толщин и марок свариваемых деталей и характеризуется длительностью горения дуги и затрачиваемой энергией.

Роль дугового разряда сводится к активации свариваемых поверхностей путем разрушения оксидных пленок и других технологических загрязнений. В большинстве случаев, сближение поверхностей осуществляется пружинным приводом, который характеризуется инерционностью. При горении дуги на свариваемых поверхностях образуется слой расплавленного металла, который при сближении улучшает смачиваемость поверхностей. При погружении в расплав сварочной ванны, происходит кристаллизация жидкого металла. Как правило, стремятся осуществлять сварку в однородном сочетании. Для повышения стойкости к коррозии, стержневые детали изготавливают омедненными. Длительность горения дуги составляет от нескольких миллисекунд до нескольких сотен миллисекунд. Амплитуда тока не превышает 10000 А.

Существенным недостатком применяемых технологий является формирование неблагоприятной структуры при сварке металлов в разнородном сочетании (интерметаллидные соединения типа  $Al_2Cu$ ,  $Al_2Cu_3$ ,  $Al_4Cu_9$  и др.). При сварке цветных сплавов, возможности такой технологии ограничены толщиной свариваемых деталей.

Известно, что наиболее благоприятная структура при сварке цветных металлов в разнородном сочетании формируется при формировании соединений в твердой фазе. Характерными представителями способов сварки, характеризуемыми твердофазным взаимодействием являются: холодная сварка, сварка взрывом, магнитно-импульсная и др. Но их применение ограничивается конфигурацией и размерами свариваемых деталей.

Предложено [4] осуществлять силовое воздействие за счет электромагнитной энергии, возникающей в катушке индуктора, при протекании по ней импульсного тока – высоковольтной конденсаторной сварке (ВКС) по следующей схеме, рисунке 3.

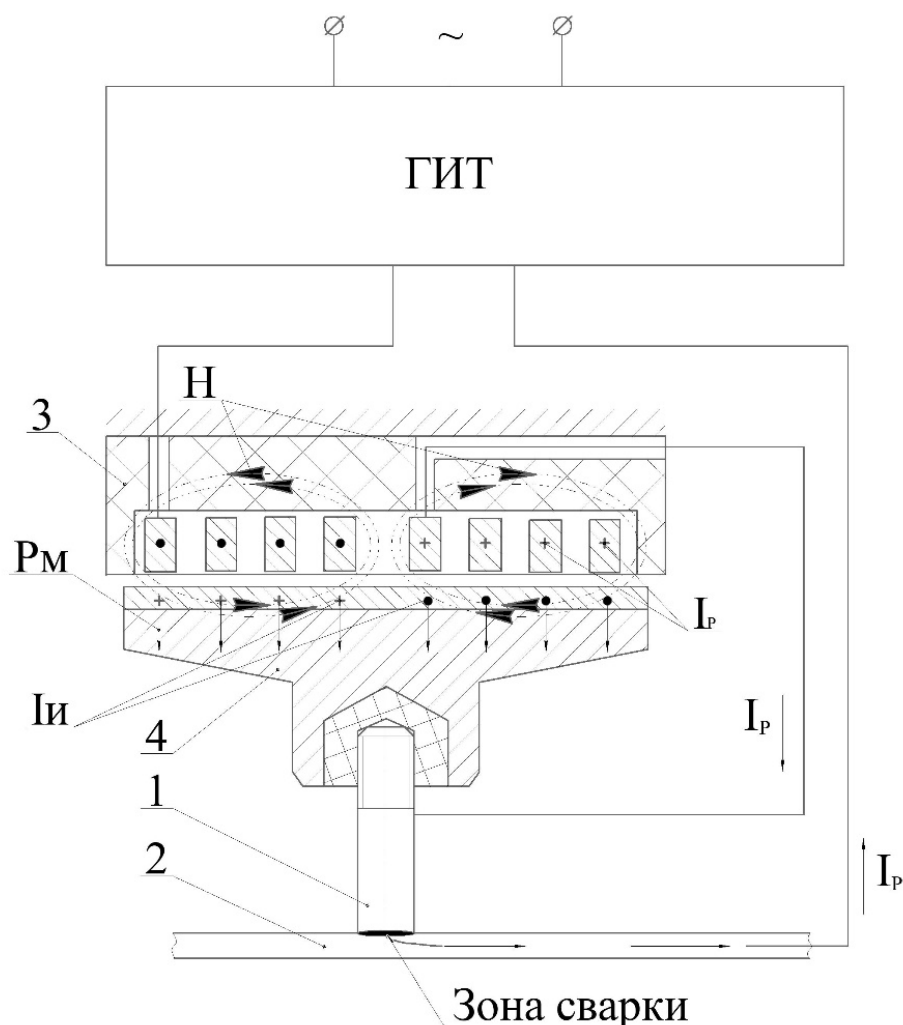
Стержневой элемент 1 статически прижимают с плоской деталью 2 и подключают последовательно в электрическую цепь с катушкой индуктора 3 и генератором импульсных токов (ГИТ) с целью синхронизации протекания электрического тока и силового воздействия на зону сварки.

При выделении накопленной энергии в батареях конденсаторов, протекающий ток разряда через катушку индуктора и свариваемые детали, обуславливает возникновение переменного магнитного потока  $H$ , возникают индуцированные токи  $I_{и}$  в электропроводном толкателе 4, укладываемого поверх катушки индуктора. При взаимодействии  $H$  с током  $I_{и}$ , в толкателе 3 возникают силы Лоренса (магнитное давление  $P_m$ ), которые воздействуя на толкатель 4, передают силовое воздействие на стержневой элемент 1.

Возникает электрическая дуга, которая оплавляет стыкуемые поверхности. Возникающие в зазоре пары расплавленного металла создают естественную защиту расплавленного металла



от окружающей среды. Силовое усилие, передаваемое стержневой деталью, вытесняет жидкий металл с загрязнениями из зоны сварки. Реализуется процесс предварительной электроэрозионной очистки. Очищенные поверхности при последующем силовом воздействии совместно деформируются, соединение формируется в твердой фазе [5].



1 – крепежный элемент; 2 – плоская деталь; 3 – индуктор; 4 – толкатель,  
 ГИТ – генератор импульсных токов; Н – магнитный поток; Р<sub>м</sub> – магнитное давление;  
 И<sub>и</sub> – ток индуцированный; И<sub>р</sub> – ток разряда  
 Рисунок 3 – Схема ВКС

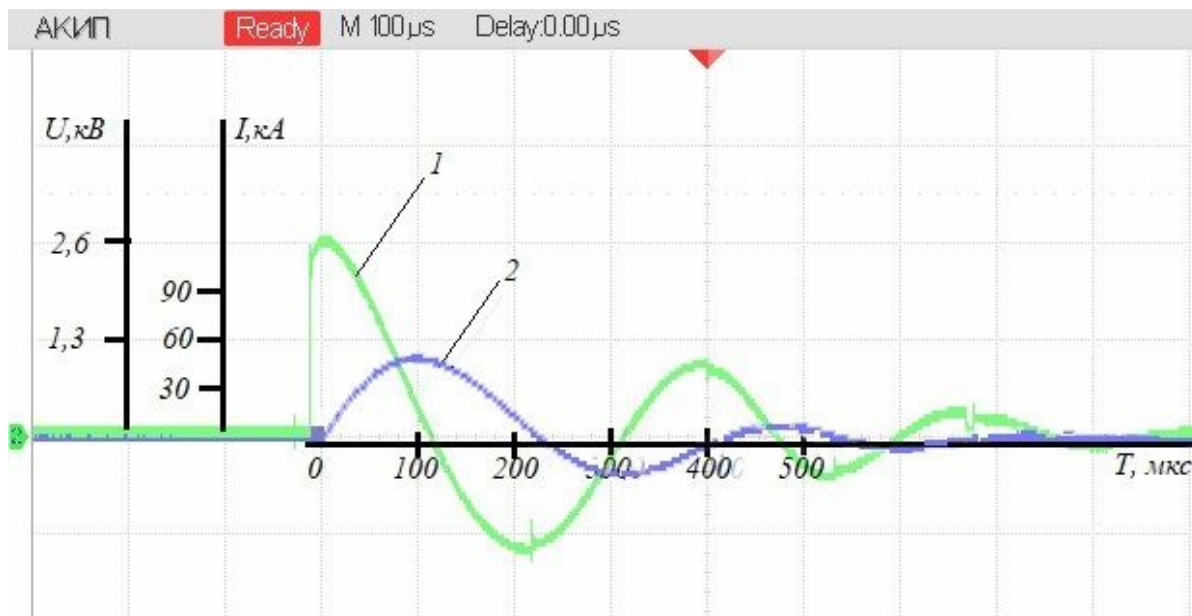
В зависимости от теплофизических свойств свариваемых сплавов, были предложены технологические приемы подготовки кромок и взаимного расположения свариваемых деталей: с предварительным статическим контактом стержневого элемента, имеющего микровыступ на торце, с предварительным зазором или контактом между деталями при плоской поверхности на торце стержневого элемента [6].

На основе теоретического анализа аналогичных разрядно-импульсных процессов, выдвинута гипотеза о формировании соединения в процессе ВКС, которая позволила объяснить механизм образования сварного соединения.

Определены основные параметры процесса ВКС, оказывающее наибольшее влияние на процесс активации свариваемых деталей: водимая энергия, зависящая в основном от напряжения заряда батарей конденсатором, длительность процесса очистки (горения дуги), величина силового воздействия (магнитного давления).

Последние два параметра зависят от числа витков спирали индуктора, характеризующейся индуктивным сопротивлением. При увеличении длительности активации поверхностей, увеличивают число витков спирали, при этом снижается амплитуда тока разряда, но увеличивается значение силового воздействия и наоборот.

Процесс ВКС реализуется синусоидальным затухающим разрядом тока, рисунке 4.



1 – характер изменения напряжения; 2 – характер протекания тока разряда

Рисунок 4 – Осциллограммы параметров процесса ВКС

Для супержестких режимов воздействия при ВКС характерна длительность протекания импульса тока  $(20-400) \cdot 10^{-6}$  с, амплитудой воздействия до  $300 \cdot 10^3$  А, импульсным давлением до  $5 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>, что на несколько порядков превышает параметры режимов контактной конденсаторной сварки.

Особенностью включения индуктора в электрическую цепь связано с необходимостью варьировать длительность теплового воздействия и давления создаваемого на зону соединения. С увеличением числа витков спирали Архимеда индуктора, снижается амплитуда тока, увеличивается длительность процесса и создаваемое давление. Регулируя эти параметры, возможно управлять шириной зоны термического влияния.

Кроме того, на характер предварительной активации свариваемых поверхностей влияет полярность тока (обратная или прямая). Ее влияние необходимо учитывать при сварке разнотолщинных конструкций из разнородных сплавов.

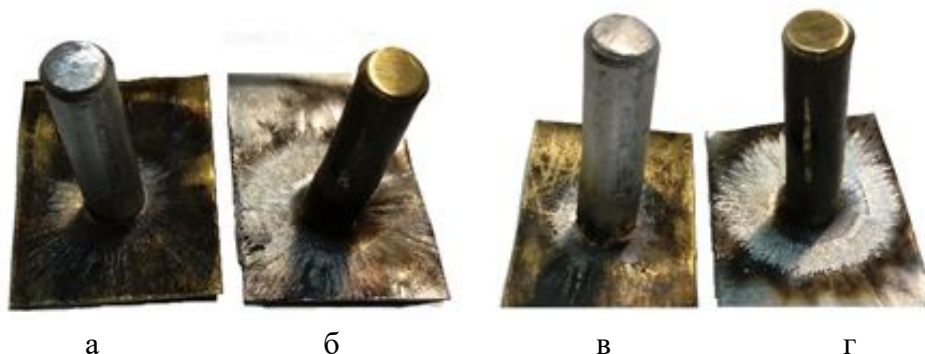
Экспериментальные образцы в разнородном сочетании, сваренные на разной полярности протекающего тока приведены на рисунке 5.

Режимы ВКС экспериментальных образцов при сварке стержней диаметром 10 мм с листами толщиной 0,8мм.: энергия  $W=7,5-8,5$ кДж, период разряда тока  $T=100-200$ мкс, магнитное давление  $P_m \leq 5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>.

Анализ экспериментальных образцов показал следующее. На поверхности листовой детали образуется ореол вытесненного расплавленного металла из зоны соединения. Размеры ореола позволяют судить об объеме расплавленного металла электрической дугой (электроэрозионная очистка) в зависимости от полярности тока и вытесненного на периферию за счет силового давления (магнитного), рисунке 5.

При сварке на обратной полярности (стержень – анод (+), лист – катод (-)), рисунке 5 а,б объем вытесненного металла из зоны сопряжения больше по сравнению с осуществлением процесса на прямой полярности.

При сварке на прямой полярности, часть тепловложения от электрической дуги затрачивается на объемный нагрев стержня и токоподводов, поэтому объем расплавленного металла меньше, рисунке 5 в,г.



на обратной полярности: а - стержень АМг2,5+лист Л63; б - стержень Л63+лист АМг2,5;  
на прямой полярности: в - стержень АМг2,5+лист Л63; г - стержень Л63+лист АМг2,5  
Рисунок 5 – Экспериментальные образцы, полученные ВКС

При ВКС на обратной полярности, прочность экспериментальных образцов выше на 10-30%. Это обусловлено разностью толщин свариваемых сплавов, а также неравномерным распределением температуры на аноде и катоде [7].

Выводы.

Для минимизации процессов, ответственных за формирование нежелательных фаз (интерметаллидных) необходимо использовать супержесткие режимы термосилового воздействия.

Последовательное соединение индуктора со свариваемыми деталями позволяет регулировать длительность теплового и величину силового воздействия, а также осуществлять вытеснение расплавленного металла на периферию зоны соединения, создавая условия для формирования соединения в твердой фазе.

При сварке разнородных сплавов из разнотолщинных конструкций, необходимо учитывать полярность тока с учетом теплофизических свойств, а также толщин тонколистовых сплавов.

#### Список использованных источников.

1. Маркашева Л.И. Физические основы формирования соединений в условиях сварки давлением / Л.И. Маркашева, Г.М. Григоренко, В.В. Арсенюк // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: тр. международной конференции (пос. Кацивели, Крым, 16-20 сентября 2002). – Крым, 2002. – С. 72-79.
2. Черкасов В.К. Способы сварки металлов давлением. – Вологда: ВГУ, 2015. – 47 с.
3. Калеко Д.М. Конденсаторная приварка шпилек в производстве космической техники / Д.М. Калеко, Н.А. Четвертко, Г.П. Царьков // Автоматическая сварка. – 1994. – № 5-6. – С. 45-47.
4. Нескоромный С.В., Стрижаков Е.Л. Устройство для ударной конденсаторной сварки стержневых деталей с плоским основанием // Патент России №, 2008, Бюл. №5.
5. Каракозов Э.С. Соединение металлов в твёрдой фазе. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.
6. Классификация приемов и исследование процесса высоковольтной конденсаторной сварки / Е.Л. Стрижаков, С.В. Нескоромный, Р.В. Меркулов, С.О. Агеев // Сварочное производство. – 2015. – № 3. – С. 42-46.
7. Dyurgerov, N., Lenivkin, V. Stability of pulsed –arc consumable electrode welding (Article). Welding International. Vol. 30, Is. 2, 1. p.p. 119 – 122 (2016).

УДК 621.791.14

**МОДЕРНИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ  
ПОД СВАРКУ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**Людмирский Ю.Г.<sup>1</sup>; Крамской А.В.<sup>2</sup>; Ассауленко С.С.<sup>1</sup>; Камышанов С.П.<sup>1</sup><sup>1</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону<sup>2</sup>Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш», г. Волгодонск

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы модернизации устаревших металлоконструкций, которые изготовлялись сваркой плавлением. Предложены конструктивно-технологические методы перехода к изготовлению конструкций с помощью сварки трением с перемешиванием, которая осуществляется в твёрдой фазе. Показаны конструктивные формы и технологии изготовления конструкций, которые сохраняют служебное назначение конструкций, обеспечивают требуемую долговечность и позволяют получить изделия при минимальных затратах труда и времени.

В настоящее время в нашей стране эксплуатируется большое количество металлоконструкций, спроектированных и изготовленных в 60-70 годах прошлого века, находящиеся в стадии исчерпания ресурса работоспособности, требующие модернизации или проектирования и изготовления новых [1].

При модернизации устаревших металлоконструкций необходимо учитывать, вскрывшиеся эксплуатационные недостатки, разработать рекомендации по их устранению за счёт применения рациональных конструктивно-технологических решений. При этом необходимо найти такие конструктивные формы и технологии их изготовления, которые сохраняют их служебное назначение, обеспечат требуемую долговечность, надёжную работу в эксплуатации и позволят получить изделия при минимальных затратах на материалы и изготовление. Наилучшее удовлетворение этих требований является основным критерием при выборе варианта модернизации и при изготовлении новых конструкций.

На смену широко применяемым сталям и сплавам приходят новые материалы с высокими эксплуатационными свойствами: алюминиевые, титановые, магниевые и др. сплавы.

Основными методами их соединения являлись способы сварки плавлением, которые из-за высокого нагрева вызывают разупрочнение соединений. Это приводит к тому, что в конструкции реализуется 65-75% от статической и усталостной прочности основного металла.

В 1991г. Институтом сварки Великобритании (TWI), был запатентован новый способ сварки трением, осуществляемый в твёрдой фазе – сварка трением с перемешиванием (СТП).

Основные преимущества СТП отмечаются в работах [2, 3,4, 5, 6]:

- стыковые швы обеспечивают 90-95% от прочности основного металла;
- деформации в 6-7 раз меньше, чем при электродуговых процессах сварки;
- снижается масса изделия, так как не используются присадочные материалы, нет выпуклости швов или головок заклёпок;
- снижается энергопотребление в 3-4 раза;
- экономичность процесса за счёт сокращения использования сварочных материалов и высокой скорости сварки  $V_{св} = 60$  м/ч;
- экологичность процесса и ряд других преимуществ.

Технология СТП наиболее широко используется для сварки алюминиевых сплавов, но она может также использоваться и для сварки: меди, магния, титана и их сплавов, и для сварки сталей разных классов.

Недостатки процесса СТП:

- высокая стоимость оборудования;
- иногда наблюдается непровар в корне шва;
- в конце шва образуется остающееся глухое отверстие;

- при сварке требуется жёсткое закрепление деталей;
- при СТП нет возможности ввести присадочный материал, поэтому большинство типов соединений, выполняемых угловыми швами (угловые, тавровые, нахлесточные), желательно модернизировать (изменить) на стыковые или проплавные, не изменяя назначения конструкции, улучшая её технологичность и эксплуатационные качества.

Цель работы. Разработать конструктивно – технологические рекомендации по модернизации ранее созданных конструкций и для создания новых конструкций, в которых целесообразно использовать сварку трением с перемешиванием, обеспечивая минимальные затраты на материалы и на производство работ.

Рассмотрим основные типы сварных соединений, выполняемых сваркой плавлением с использованием присадочных материалов, и возможность их замены на сварные соединения, выполняемые СТП без присадочных материалов.

В верхней части рисунка 1 показаны стыковые и нахлесточные соединения, выполняемые сваркой плавлением, а в нижней части рисунка представлены соединения, адаптированные под СТП.

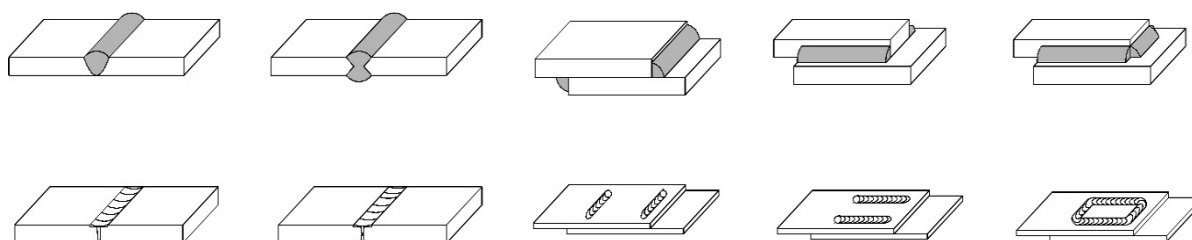
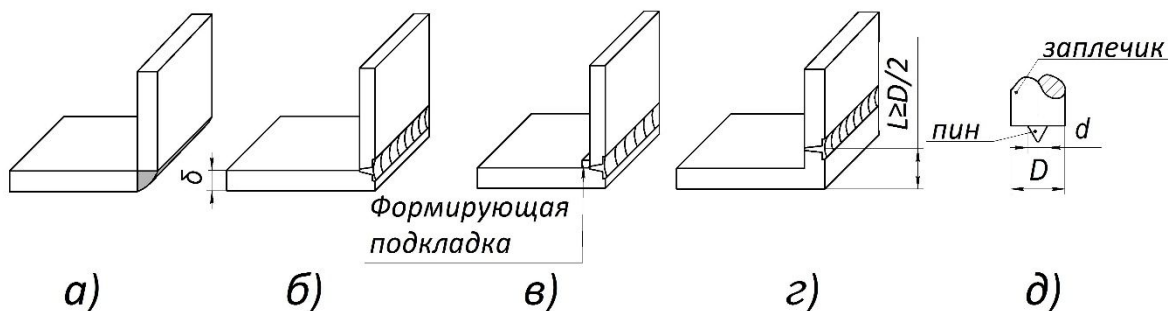


Рисунок 1 – Конструкции стыковых и нахлесточных соединений, выполненных сваркой плавлением и аналогичные конструкции, выполненные сваркой трением с перемешиванием.

Конструкция стыковых соединений практически не изменилась. Единственным изменением является тот факт, что не требуется разделка кромок и зазор при сборке деталей под сварку должен быть не более 0,3мм. Получаемые преимущества, связанные с переходом на СТП, описаны ранее.

Конструкция нахлесточных соединений не изменилась, но при выполнении СТП угловые швы заменены на «проплавные». При правильно подобранных режимах СТП конструктивная прочность нахлесточных соединений не снижается.

На рисунке 2 показаны сварные угловые соединения: 2 (а) - швы выполнены сваркой плавлением; на рисунке 2 (б, в, г) - конструкции угловых соединений, которые технологичны для их выполнения СТП.

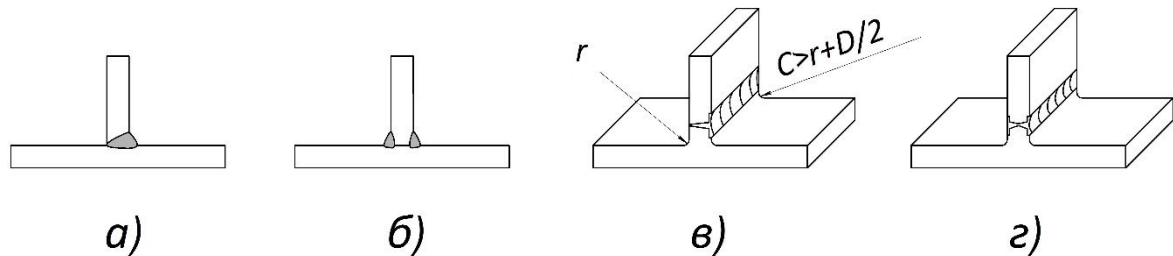


а – швы, выполненные сваркой плавлением; б, в, г – швы, выполненные СТП

Рисунок 2 – Конструкции угловых соединений

К угловому соединению, показанному на рисунке 2б, можно переходить, если толщина  $\delta$ , больше половины диаметра заплечика инструмента (диаметр заплечика инструмента в зависимости от свариваемых толщин меняется в пределах 10-20мм). Для обеспечения высокой прочности углового соединения СТП рекомендуется выполнять на формирующей подкладке, как показано на рисунке 2в. Если от углового соединения требуется обеспечить прочность, равную основному металлу, то рекомендуется выполнять сварное соединение, показанное на рисунке 2г. При этом прямолинейный участок длиной  $L$  должен быть более половины диаметра заплечика инструмента.

На рисунке 3 показаны тавровые соединения, выполненные: а – односторонней сваркой плавлением с разделкой кромок, б – двусторонней сваркой плавлением без разделки кромок. Для получения аналогичных тавровых соединений, но выполняемых с использованием СТП, на рисунке 3б и рисунке 3в показаны односторонние и двусторонние тавровые соединения. В этих соединениях используется экструдированный профиль, что позволило перейти от угловых швов к стыковым швам обеспечить прочность тавровых соединений, не уступающую прочности основного металла.



а) односторонней сваркой плавлением с разделкой кромок, б) двусторонней сваркой плавлением без разделки кромок, соединения в) и г) выполненные СТП

Рисунок 3 – Конструкции тавровых соединений, выполненных

Для обеспечения качества СТП конструктивный размер  $C > r + D/2$ , где  $r$  – радиус профиля;  $D$  – диаметр заплечика инструмента. Требуемые профили выпускаются Челябинским ООО «Алюпроф» по чертежам Заказчика.

Большое количество нахлесточных разнородных соединений можно выполнять СТП, причём остающееся отверстие в более пластичном материале не снижает прочности соединения, если оно расположено, как показано на рисунке 4.

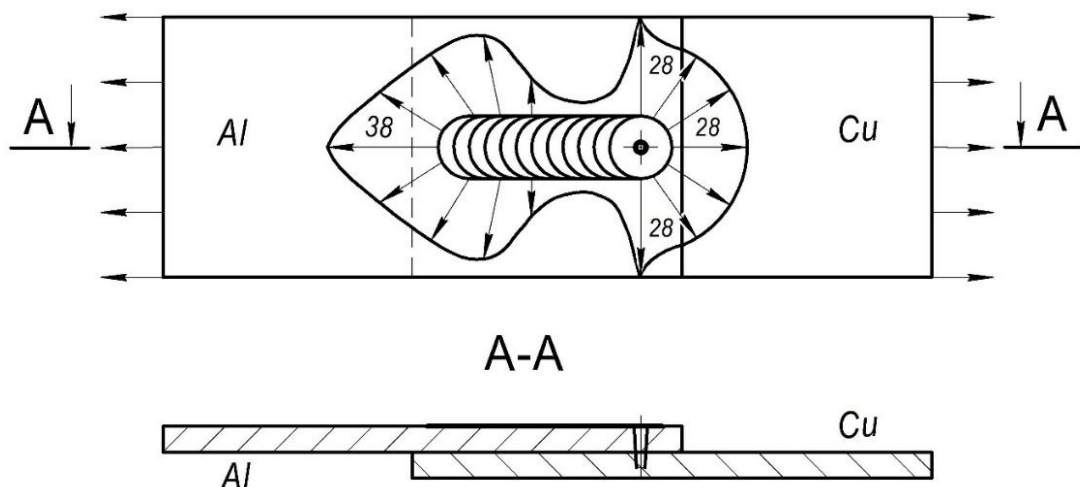


Рисунок 4 – Распределение напряжений в разнородном соединении (Al+Cu), при выполнении проплавного шва в направлении от алюминиевой пластины к медной.

При выполнении разнородных нахлесточных соединений проплавными швами сварку следует начинать со стороны алюминиевой пластины и заканчивать со стороны медной. Расположение отверстия в проплавном шве над медной пластиной вызывает повышение напряжений на краю отверстия (28МПа), однако, они значительно ниже, чем напряжения в том же соединении со стороны алюминиевой пластины (38МПа). Таким образом, расположение отверстия над медной пластиной не снижает несущую способность нахлесточного разнородного соединения.

Выводы:

1. Рассмотрены конструкции соединений, выполняемые сваркой плавлением, показаны пути их модернизации для перехода к сварке в твёрдой фазе (к сварке трением с перемешиванием).
2. Рассмотрены достоинства СТП, которые формируют экономические преимущества при сварке элементов конструкций.
3. Наиболее ощутимы преимущества достигаются при сварке разнородных металлоконструкций.

#### **Список использованных источников.**

1. Алёшин Н.П. Роль, значение, настоящее и будущее сварных металлоконструкций // Сварщик-Профессионал. 2005. №2. С. 2.
2. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч.1 / М.М. Штрикман // Сварочное производство. – 2007. – №9. – С.35-40
3. Лукьянов В.Ф. Производство сварных конструкций (изготовление в заводских условиях) / В.Ф. Лукьянов, В.Я. Харченко, Ю.Г. Людмирский – Ростов н/Д: ООО «Терра Принт», 2006. – 336 с.
4. Котлышев Р.Р. Сварка трением с перемешиванием. Ростов н/Д: издательский центр ДГТУ, 2012. -135 с.
5. Фролов В.А. Сварка трением с перемешиванием – плюсы и минусы/ В.А. Фролов [и др.]// Сварочное производство. – 2008. -№10. –С. 12-19.
6. Сергеева Е.В. Сварка трением с перемешиванием в авиакосмической промышленности // Автоматическая сварка. – 2013. №5.- С. 58-62.

УДК 621.791

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ АРГОДУГОВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДУГИ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ИНФОРМАЦИИ

Алёшин Н.П., Перковский Р.А., Гуркин С.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Аннотация.** Статья посвящена принципам управления процессом многослойной аргодуговой сварке неплавящимся электродом с поперечными колебаниями при использовании дуги в качестве источника информации. В работе описаны реализация функций автоматического поддержания длины дуги, контроля глубины проплавления при сварке корневого слоя, управления центром и амплитудой колебаний электрода при сварке заполняющих слоев.

Аргодуговая сварка широко используется для изготовления ответственных соединений в атомной, аэрокосмической, химической и других отраслях промышленности.

Для повышения качества сварного соединения широко используют автоматические установки, которые позволяют снизить субъективный фактор, повысить производительность, улучшить условия труда сварщиков. Однако, несмотря на название установки «автоматическая», в большинстве своем оборудование реализуют процесс механизированной сварки. На рынке автоматического аргодугового сварочного оборудования представлены следующие фирмы: Технотрон, НИТИ Прогресс, НИКИМТ, Констар (Россия), OrbitalumToolsc (Германия), AMI Arc Machines (США), Polysoude (Франция). Как правило, у всех производителей сварка происходит по заранее подготовленным программам с коррекцией параметров в процессе сварки по пути, времени или углу. Для визуального дистанционного контроля за процессом сварки оборудование оснащается телекамерами и регистраторами параметров процесса. Несмотря на имеющиеся методы контроля во время сварки, оператору необходимо принимать непосредственное участие в процессе сварки каждого соединения (корректировать траекторию движения горелки, параметры процесса сварки и т.д.), т.е. реализуется процесс полностью механизированной сварки.

Для коррекции поперечного положения сварочного электрода часто используются оптические телевизионные или лазерные датчики. Несмотря на высокую точность работы таких систем часто возникают проблемы с совмещением координат датчика, поперечного привода и реального положения электрода. Оптические системы слежения имеют габариты, сравнимые или более чем сварочная горелка, что усложняет их встраивание в сварочные головки. Кроме того, объективы требуют дополнительной защиты от испарений из сварочной ванны и брызг металла.

Для стабилизации высоты электрода над изделием широко используются системы АРНД, однако их работа сильно затруднена при сварке с поперечными колебаниями или при использовании импульсного режима.

Одной из самых важных проблем при сварке корневого слоя является стабилизация глубины проплавления [1]. Сегодня ни один из серийных сварочных автоматов не имеет встроенных систем управления глубиной проплавления. Глубина проплавления стабилизируется за счет программирования режимов или использованием алгоритмов без обратных связей, например, стабилизация погонной энергии.

Разработка автоматических комплексов, позволяющих в процессе сварки автоматически управлять качеством формирования сварного шва, является актуальным направлением, особенно в условиях строительства обвязки трубопроводов на АЭС. Для обеспечения автоматического управления качеством сварного шва необходимо решить четыре задачи:

Управление глубиной проплавления при сварке корневого слоя.



Слежение за центром стыка при сварке заполняющих слоев.

Слежение за шириной колебаний при сварке заполняющих слоев.

Поддержание стабильной длины дуги.

Для решения указанных задач был разработан программно-аппаратный комплекс для сварки толстостенных труб при строительстве атомных станций, позволяющий решить все четыре задачи без применения дополнительных датчиков, используя только дугу в качестве источника информации. В механической части комплекса применена орбитальная сварочная головка M15 фирмы ArcMashin (США) которая была оснащена специально разработанной системой управления и сварочным источником с возможностью формирования импульсов тока от 0,5 мс. Основные элементы системы управления:

Промышленный компьютер №1 для управления стандартной циклограммой процесса многослойной орбитальной сваркой неплавящимся электродом в среде аргона.

Промышленный компьютер №2 формирования сигналов коррекции режимов сварки и параметров колебаний.

Блок синхронного изменения тока дуги, напряжения дуги и поперечного положения электрода с частотой 10 кГц.

Блок управления двигателями сварочной головки, формирующий силовые напряжения и обратные связи по скорости и положению механизмов поперечных колебаний, вертикального перемещения горелки, движения каретки и подачи присадочной проволоки.

Видеокамера для наблюдения за процессом.

Пульт управления.

Промышленный компьютер №1 обеспечивает формирование сигналов для всех элементов комплекса и позволяет реализовать стандартную циклограмму сварки с разбивкой всего диаметра трубы на любое число секторов и проходов. Сварка может производиться в непрерывном или импульсном режимах с поперечными колебаниями. Для наблюдения за процессом используется видеокамера. С помощью пульта управления можно корректировать режимы сварки и параметры колебаний в процессе сварки.

Промышленный компьютер №2 позволяет реализовать четыре задачи управления, используя только информацию о поперечном положении горелки, токе и напряжении на дуге в качестве обратной связи. Блок измерения тока и напряжения на дуге с частотой 10 кГц преобразует аналоговые сигналы в цифровой поток для дальнейшей обработки. Ток сварки измеряется с помощью бесконтактного датчика Холла компенсационного типа с разрешением 1 А. Канал измерения напряжения снабжен блоком защиты от осциллятора, так как измерения производятся непосредственно на сварочной горелке. Разрешение канала измерения напряжения 30 мВ. Канал измерения поперечного положения сварочной горелки использует встроенный в головку потенциометр и имеет разрешение 0,2 мм.

Для управления глубиной проплавления корневого слоя используется зависимость величины проплавления от частоты вынужденных колебаний сварочной ванны [2]. При переходе от непровара стыка к полному проплавлению, частота колебаний сварочной ванны ступенчато изменяется в пределах от 50 до 15 Гц. Система управления проплавлением реализует обратную связь, регулирующую ток сварки для удержания частоты вынужденных колебаний сварочной ванны в диапазоне 25...35 Гц.

Основная проблема заключается в измерении амплитуды и частоты колебаний сварочной ванны. Оптические методы измерения обладают высокой точностью, но сложно применимы в промышленном оборудовании из-за больших габаритов, требования точной настройки и обслуживания. Измерение напряжения на дуге не требует применения дополнительных датчиков, но сложно реализовать из-за большого уровня электромагнитных помех при сварке.

В разработанном сварочном комплексе для управления проплавлением используется напряжение на дуге. Для возбуждения колебаний в сварочной ванне разработан специальный быстродействующий сварочный источник, формирующий импульсы

амплитудой до 400А и длительностью от 0,5 до 3 мс. Для возможности точного измерения параметров колебаний сварочной ванны в сварочном источнике применена схема фазосдвигающего моста с двумя встречно включенными трансреакторами и удвоением выходного тока, что позволило добиться собственных шумов на выходе сварочного источника не более 20 мВ.

Для определения момента начала импульса используется сигнал тока (Рисунке 1). Аппаратура управления позволяет задать время, амплитуду и частоту повторения импульсов, возбуждающих колебания. Наилучшие результаты получены при импульсе тока 290 А, длительностью 2 мс частой 1 Гц.

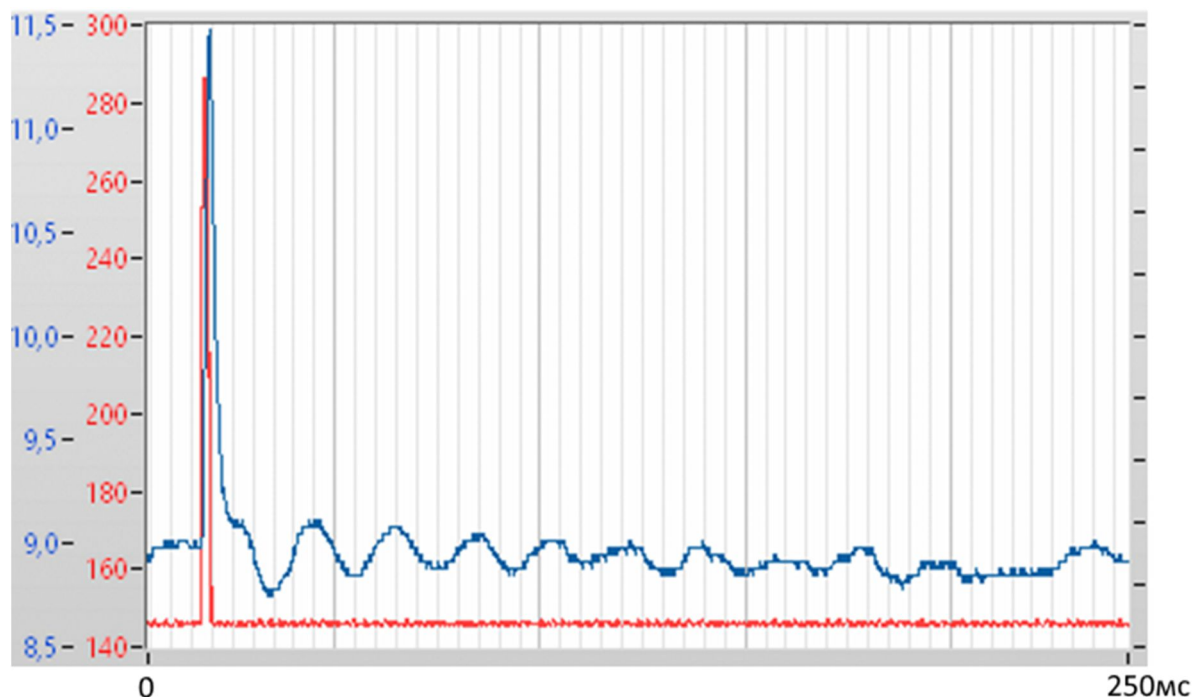


Рисунок 1 – График тока (красный) и напряжения (синий)

Компьютер №2 вычисляет основную частоту колебаний сварочной ванны и сравнивает ее с пороговым значением 30 Гц. Управляющее воздействие выдается в Компьютер №1 в виде коррекции тока сварки. Возбуждающие импульсы имеют малую длительность и не влияют на тепловые процессы в сварочной ванне. Однако скачки напряжения не позволяют использовать стандартную систему АРНД, измеряющую среднее напряжение на дуге. Для исключения влияния импульсов на измерение напряжения на дуге используется временная селекция, исключающая из измерения момент импульса тока и 100 мс после него.

Для слежения за центром стыка при сварке корневого слоя шва используется видеокамера, с помощью которой до сварки горелка последовательно подводится к четырем точкам центра стыка примерно через 90 градусов по ходу движения горелки. Программно рассчитывается отклонения установки пояса относительно центра стыка и вычисляется требуемое положение сварочной горелки для каждого углового положения с дискретностью 1 градус.

Сварка заполняющих слоев производится с поперечными колебаниями. Для управления центром и шириной колебаний применен специальный алгоритм, обрабатывающий сигнал напряжения на дуге совместно с данными о поперечном положении электрода (Рисунок 2).

Чем ближе горелка приближается к кромке, тем меньше напряжение на дуге. При равенстве напряжений на кромках можно говорить о совпадении центра колебаний с серединой разделки. Сравнивая напряжения на дуге на левой и правой кромках в течение

одного периода колебаний, формируется сигнал отклонения центра колебаний от центра разделки и передается в компьютер №1 для коррекции.

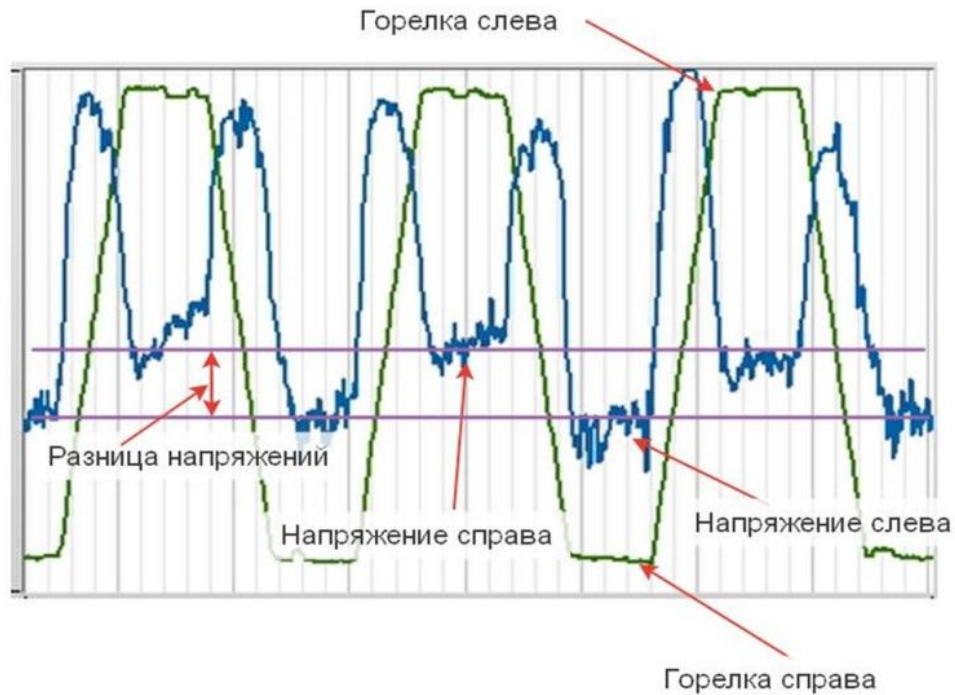


Рисунок 2 – Сигналы напряжения (синий) и поперечного положения горелки (зеленый) при колебаниях.

Для автоматического управления шириной поперечных колебаний электрода используются также сигналы напряжения на дуге и поперечного положения электрода (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Сигналы напряжения на дуге (синий) и поперечного положения сварочной горелки (зеленый)

Как видно из графиков, напряжение на дуге максимально в момент движения электрода между кромками и понижается при приближении к кромкам. За параметр, используемый для управления амплитудой колебаний, принята разность напряжений между средним значением напряжения на дуге по центру стыка и на краях. Если электрод при колебаниях не доходит до стенок разделки, то напряжение не будет уменьшаться, так как длина дуги не меняется. И наоборот, чем ближе электрод подходит к стенкам, тем меньше напряжение дуги и тем больше разница между напряжением по центру и по краям. Таким образом, установив порог разности напряжений в 0,3 В на каждом цикле колебаний можно корректировать ширину колебаний в нужную сторону.

Для реализации алгоритма поддержания длины дуги при поперечном сканировании используется стандартный алгоритм с ПИД регулятором в цепи обратной связи. Но в качестве входного сигнала используется напряжение, измеренное при нахождении электрода по центру колебаний.

Совместная работа алгоритмов слежения за центром стыка, регулирования ширины колебаний и поддержания длины дуги позволяет осуществить сварку заполняющих проходов без предварительного сканирования и с высоким качеством.

При сварке облицовочного прохода не работают алгоритмы определения центра стыка и ширины колебаний, так как нет выступающих кромок. Для сварки облицовочного слоя запоминается центр и амплитуда колебаний электрода на последнем заполняющем проходе для каждого углового положения и эти данные используются для облицовочного прохода, но с увеличенной амплитудой колебаний.

Таким образом, применив специально разработанное оборудование и программное обеспечение удалось создать автоматическую сварочную установку [3], обеспечивающую формирование качественного сварного шва без участия оператора даже при неточностях закрепления направляющего пояса и наличии отклонений в геометрии сборке стыка.

#### **Список использованных источников.**

1. Гладков Э. А., Киселев О. Н., Перковский Р. А. Контроль и управление глубиной проплавления при дуговой сварке : учеб. пособие / Гладков Э. А., Киселев О. Н., Перковский Р. А. ; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. - 71 с. : ил. - Библиогр.: с. 69-71.
2. Гладков Э.А., Симакова Н.А., Перковский Р.А., Бродягина Т.В.. Система контроля и регулирования глубины проплавления при аргонодуговой сварке ответственных изделий по осцилляции сварочной ванны. Глобальная ядерная безопасность 2019, 1(30), с 47-58.
3. Алёшин Н.П., Перковский Р.А. Гуркин С.В., Коберник Н.В., Сорокин С.П. Орбитальная аргонодуговая сварка неплавящимся электродом трубопроводов автоматическим комплексом с контролем глубины проплавления., Сварка и диагностика, 2021г., №6, страницы: 39-42.

УДК 621.791.92:621.7.07

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАПЛАВЛЕННЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ АРМАТУРЫ КОТЛОВ НА ОСНОВЕ  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПОСОБА РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ  
ПОКРЫТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ (РДН)**

Шилов Д.С., Полетаев Ю.В., Щепкин В.В.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

**Аннотация.** Целью настоящей работы является исследование причин снижения качества (твердости и трещиностойкости) наплавленных соединений запорной арматуры технологических элементов трубопроводов котлов. В работе выполнен анализ литературного обзора по существующей проблеме; вскрыт механизм и причины растрескивания наплавки; предложены технологические рекомендации по ручной дуговой наплавке электродами.

Повышение качества и срока службы наплавленных уплотнительных поверхностей деталей арматуры котлов является актуальной задачей современного сварочного производства энергетического оборудования. Её решение неразрывно связано с исследованием и разработкой научных основ теории и технологии наплавки.

В настоящее время разработаны и внедрены в производство: дуговые; электрошлаковые; плазменные; лучевые; индукционные и другие способы наплавки [1 - 6]. Выбор способа наплавки определяется конструкцией, формой, размерами наплавляемой поверхности и массой изделия, а также высотой и химическим составом наплавленного слоя. Главные требования к способам наплавки заключаются в получении качественного износостойкого наплавленного металла при минимальном проплавлении детали и оптимальной производительности процесса.

Следует отметить, что в производстве преобладает ручная дуговая наплавка (РДН) покрытыми электродами малопроизводительный, но простой и универсальный способ, обеспечивающий при достаточном мастерстве сварщика наплавленный металл удовлетворительного качества. РДН производится преимущественно в 2...3 слоя на углеродистые и легированные стали. Для исключения образования холодных трещин перед наплавкой обязателен подогрев детали. Минимальную температуру подогрева рекомендуется устанавливать в зависимости от температуры мартенситного превращения основного металла. После наплавки необходим отжиг для осуществления возможности механической обработки наплавленного металла, а затем закалка с отпуском для улучшения её структуры. Вместе с тем, эффект от упрочняющей металл термической обработки часто не достигается, так как её режимы для основного и наплавленного металлов в большинстве случаев оказываются несовместимыми.

РДН выполняют электродами, преимущественно, с основным типом покрытия диаметром 2...6 мм на постоянном токе обратной полярности. Диаметр электрода определяют в зависимости от толщины наплавляемого слоя металла, массы изделия, его формы и пространственного положения наплавляемой поверхности. Наплавку ведут на минимально возможном токе (плотность тока в пределах 10...20 А/мм<sup>2</sup>) и напряжении с целью снижения доли участия основного металла в наплавленном. Также для уменьшения проплавления изделия электрод наклоняют в сторону противоположную направлению наплавки и производят поперечные перемещения его конца, что перераспределяет тепловую мощность дуги и позволяет получить широкий валик наплавленного металла с минимумом примеси металла изделия. При установившемся процессе плавления электрода под действием дуги происходит равномерно.

Как показывают результаты исследований при наплавке уплотнительных поверхностей энергетической арматуры, наблюдаются нестабильные значения твердости (таблица 1) и отдельные случаи образования трещин (рисунке 1). Наплавка уплотнительных поверхностей колец осуществлялась электродами ЦН-6Л, диаметром 4 мм, производства ООО «СиМ-Электрод», наплавка на тарелки электродами ВПН-1, диаметром 4мм. Было наплавлено три кольца и две тарелки. Наплавку на тарелках выполнили электродами ВПН-1 не менее чем в три слоя, без учета подслоя (наплавка электродами ЦЛ-25/2). При этом межваликовая температура при наплавке на детали из стали 20 и 25Л не превышала 1000С.

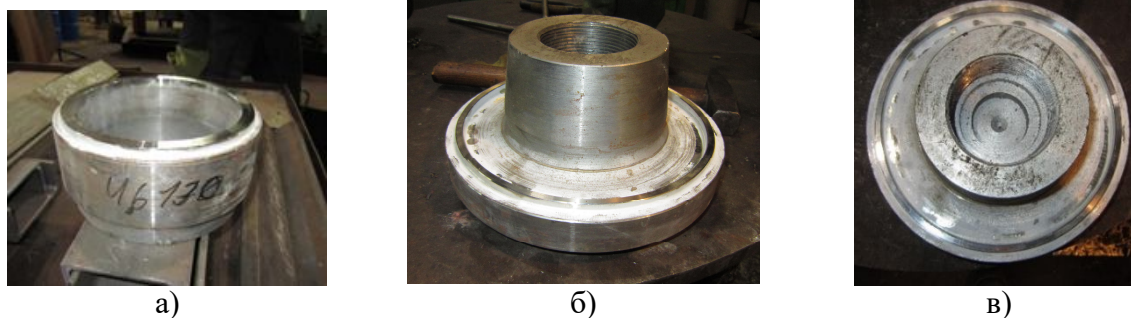


Рисунок 1 – Общий вид кольца (седла) (а) и тарелки (б, в) забракованных ОТК по причине неудовлетворительных значений твердости (у кольца) и выявленных трещин (у тарелки).

Таблица 1 – Значения твердости на кольце и тарелке запорной арматуры

Наименование	Твердость по нормативным документам (большая или равная)	Средняя твердость по поверхности наплавки
Кольцо (электроды ЦН- 6Л)	28 HRC	35 – 38 HRC
Тарелка (электроды ВПН-1)	23 HRC	25 – 30 HRC

Для тарелок с наплавкой электродами ВПН-1 необходимость в термической обработке не регламентируется. Для уменьшения напряженного состояния и предупреждения образования трещин в наплавленном металле наплавка выполняется «ниточными» швами, без поперечных колебаний электрода. Ширина наплавленного валика должна составлять не более 3-х диаметров электродов. Высота наплавленного слоя должна составлять 3 – 4 мм. Направление наложения каждого слоя должно чередоваться.

С целью изучения морфологических особенностей растрескиваний выполнены вырезки темплетов для макро и микроисследований. Были выявлены дефекты в виде макротрещин или микротрещин типа «частокол», которые образовались в зоне наплавленного соединения (рисунке 2). Морфология холодных трещин может иметь межкристаллитный, транскристаллитный или смешанный характер [3-5]. Поперечные, типа «частокол», холодные трещины преимущественно образуются в легированных сталях при сварке в условиях жесткого закрепления свариваемых заготовок или при сварке круговых швов. Если горячие трещины бывают более разветвленными (они захватывают больший объем), то ХТ имеют, как правило, плоский прямолинейный характер. Зазор в ХТ шире и четко ориентирован в одном направлении, потому что в момент образования трещины усадочные напряжения в температурной зоне ХТ значительно выше.

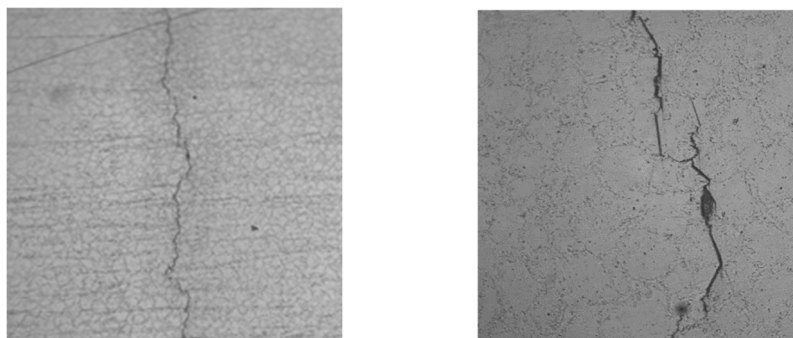


Рисунок 2 – Холодные трещины типа «частокол» на поверхности наплавленного слоя

Следует отметить, что количество ХТ уменьшается с увеличением температуры предварительного подогрева образца, причем для горячих трещин такая зависимость вообще не наблюдается. Количество ХТ уменьшается с увеличением погонной энергии сварки. Для горячих трещин эта зависимость в большинстве случаев обратная. При фрактографическом анализе в месте распространения ХТ часто находят микрзоны со ступенчатым изломом, что никогда не наблюдается в горячих трещинах.

ХТ это дефекты, которые образуются по окончании сварки или после нанесения отдельных слоев наплавленного металла, когда температура в зоне наплавленного соединения окажется ниже 250-300°C. Образование ХТ начинается с возникновения очага разрушения. Таким очагом зарождения трещин явился острый концентратор – радиус перехода от подслоя к основной наплавке, получаемый в результате механической обработки наплавленного металла (рисунок 3).

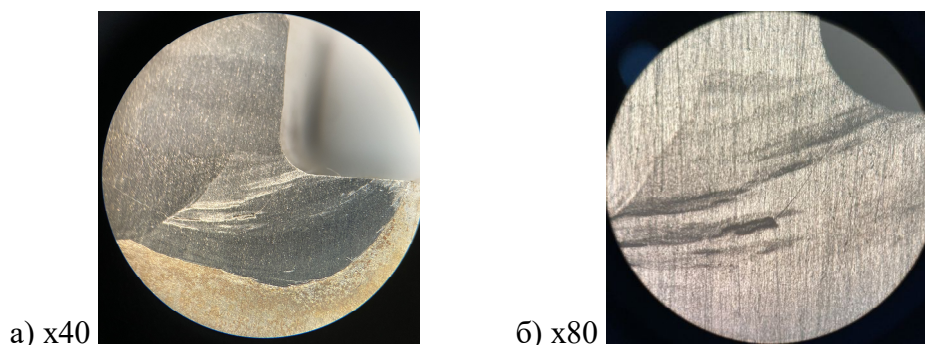


Рисунок 3 – Поперечный разрез наплавленного соединения; острый радиус перехода от подслоя к основной наплавке (а); участок перемешивания основного металла и наплавленного в зоне радиуса перехода (б).

В результате выполненных теоретических исследований вскрыт механизм и основные причины снижения качества наплавленного металла:

Одним из главных факторов, влияющих на образование ХТ, является водород:

С целью устранения источника водорода необходимо осуществлять прокалку или сушку по паспортному режиму. Важным являются условия хранения электродов после прокалки. Через 1,5 – 2 суток хранения на воздухе эффект прокалки полностью исчезает. Рекомендуется хранение материалов после прокалки в сушильных шкафах, герметичных пеналах или в вакуумных пакетах;

Наиболее простым решением проблемы снижения содержания водорода является применения такой технологии и параметров режима сварки, которые, исключают охрупчивание вследствие структурных превращений в металле и облегчают диффузионное удаление водорода. Важным является величина скорости охлаждения металла наплавки, которая зависит от количества внесенного тепла, то есть от величины погонной энергии при сварке. В ряде случаев увеличение погонной энергии дает положительные результаты

Неблагоприятное влияние водорода усиливается в зонах концентрации напряжений из-за локализации напряжений. Так, в зоне радиуса перехода (образованного при механической обработке наплавки) от подслоя к основной наплавке теоретический коэффициент концентрации напряжений  $\sigma_{теор}$  может достигать величины 1,5 – 3,0. Именно этот участок наплавленного соединения явился первоначальным очагом зарождения ХТ (см. рис.3).

Структурно – фазовые превращения:

Охрупчивание наплавленного металла в результате фазового превращения зависит от химического состава сплава, и от применяемого термического цикла сварки (ТЦС), который выражается, например, скоростью охлаждения в интервале температур 800 – 5000С. ТЦС можно регулировать путем изменения технологии и параметров режима наплавки (погонной энергии) и применения предварительного подогрева или последующего нагрева, т.е. путем управления тепловым режимом наплавки.

В результате фазовых превращений в сплаве формируется структурная и механическая неоднородность, которую можно оценить по величине твердости. Для обеспечения прочной однородности наплавленного соединения в основном требуется, чтобы максимальная величина твердости в отдельных участках не превышала более чем на 20 – 30% среднюю величину.

В случае получения бездефектного наплавленного соединения с неудовлетворительным значением твердости необходимо изменить технологию и параметры режима наплавки или подвергнуть изделие термической обработке (отпуску или отжигу).

Выводы.

Повышение качества и свариваемости металла наплавки возможно на основе устранения или ослабления влияния вышеперечисленных негативных технологических и температурных факторов и разработки оптимальной технологии процесса, например, наплавки «колеблющимся» электродом обеспечивающей мягкий термический цикл и достижение требуемого структурно – фазового состава наплавленного соединения.

Для проведения экспериментального исследования разработаны четыре варианта технологических рекомендаций по наплавке и конструкция контрольных образцов идентичных контролируемым производственным деталям.

#### **Список использованных источников.**

1. Соколов Г.Н., Лысак В.И. Наплавка износостойких сплавов на прессовые штампы и инструмент для горячего деформирования сталей. Моногр. / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак //ВолГТУ. - Волгоград, 2005. - 284 с.
2. Кальянов В.Н. Мартенситно – стареющие стали для наплавки штампов / В.Н. Кальянов, В.А. Багров // Сварочное производство. - 2003. - №2. - С.35-37.
3. Кондратьев И. А. Исследование свойств наплавленного металла типа мартенситостареющих сталей / И.А. Кондратьев, И.А. Рябцев, Я.П. Черняк // Автоматическая сварка. - 2004. - №10. -С.16 – 18.
4. Королев Н.В. Метод расчетного определения фазового состава и структуры износостойких наплавочных сплавов / Н.В. Королев, Н.В. Пименова //Сварочное производство. -2002. -№4. -С.11 – 16.
5. Соколов Г.Н. Влияние соотношения хрома, молибдена и углерода на структуру и свойства наплавленного металла системы Fe-Cr-Mo-C // Сварочное производство. - 2000. - №11. - С.3 – 5.
6. Переплетчиков Е.Ф. Структура и свойства высокоуглеродистых высокованадиевых сплавов на железной основе для наплавки / Е.Ф. Переплетчиков, И.А. Рябцев //МиТОМ. - 2003. -№5. -С.36 – 40.



УДК 621.791.14

**СВАРКА ТРЕНИЕМ ШТУЦЕРОВ И ПАТРУБКОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

Щепкин В.В., Полетаев Ю.В.

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону

**Аннотация.** Целью настоящей работы являлась разработка процесса сварки трением (СТ) штуцеров и патрубков малого (до 80 мм) диаметра с конусной контактирующей поверхностью. Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи: выполнен анализ литературных данных по существу проблемы; разработана конструкция и изготовлены имитаторы штуцеров и патрубков для экспериментальных исследований; выполнены металлографические исследования качества экспериментальных сварных соединений.

Основным способом соединения толстостенных кольцевых сварных соединений штуцеров и патрубков малого (до 80 мм) диаметра корпусного оборудования ТЭС и АЭС является ручная дуговая сварка, которая способствует формированию грубой крупнозернистой структуры и склонности к образованию трещин в металле шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Низкие механические свойства стали 10ГН2МФА и недостаточная стойкость металла ЗТВ сварных соединений против образования межзеренных трещин при сварке и термической обработке (ТТО) способствуют проведению повторных дорогостоящих ремонтов и снижению эксплуатационной надежности сварных узлов [1]. В связи с этим был предложен способ сварки трением.

Как показывают результаты исследований применение традиционной цилиндрической формы свариваемой поверхности требует применения машин с повышенной мощностью, характеризуется заметным перегревом стыка и не стабильным качеством. При проведении экспериментальной сварки в начале сварки произошел отрыв нижней части имитатора штуцера, а при продолжении сварки получилось бесформенное сварное соединение.

Известен способ сварки трением штуцеров и патрубков с предварительной выточкой канавки на корпусе [2], которая позволяет выполнять сварное соединение на параметрах близких к стыковой сварке трением и в процессе сварки канавка заполняется пластичным металлом. Но как свидетельствуют результаты исследований зачастую данные соединения имеют дефекты в виде несплавлений или смещения оси соединения.

В этой связи было предложено применить конусную поверхность свариваемых деталей. Получение данного сварного соединения потребовало разработки способа сварки, обеспечивающего соединение основания большой толщины со толстостенными штуцерами и патрубками малого диаметра с конусной контактирующей поверхностью (рисунок 1), отличающегося тем что сварка выполняется с оптимальным тепловложением, которое достигается за счет последовательного включения в стадию нагрева кольцевых участков конической поверхности соединяемых деталей, обеспечивающая надежное соединение и минимальный рост зерна, требуемую структуру и механические характеристики сварного соединения штуцеров и патрубков малого диаметра, в состоянии без последующей термической обработки или с термообработкой до более низких температур.

Для реализации этого технического предложения, был разработан способ и технология сварки трением позволяющая обеспечить оптимальное тепловложение, позволяющее получать качественные сварные соединения малого диаметра и большой толщины.

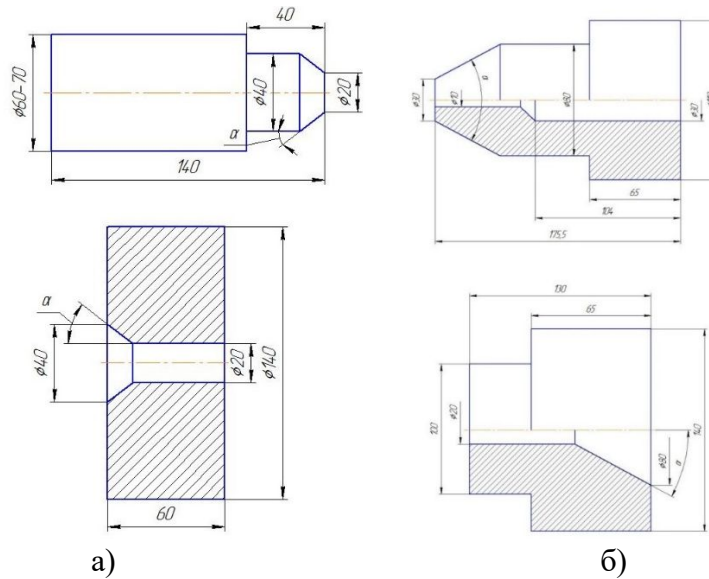


Рисунок 1 – Эскиз имитаторов штуцерного (а) и патрубкового (б) узлов

Для выбора оптимального угла контактирующих поверхностей подготовили пять образцов с углами развертки от 30 до 40 градусов с шагом 2,5 градусов. Полученные образцы показали относительно высокое качество сварных соединений при обоснованно выбранных параметрах режима сварки трением. Из перечисленного ряда изготовленных сварных моделей наиболее качественные (без видимых технологических дефектов типа «несплавление») сварные соединения получены при подготовке конусной поверхности с углом  $\alpha = 37,5$  градусов, при следующих параметрах режима сварки [2 и 3]: для штуцера диаметром 40 мм: время редуцирования тред = 6 – 10 сек.; давление нагрева  $P_n = 376$  кПа; давление проковки  $P_{пр} = 617$  кПа; время сварки  $t_c = 27-32$  сек; для патрубка диаметром 80 мм: время редуцирования тред = 6 – 10 сек.; давление нагрева  $P_n = 6,37$  МПа; давление проковки  $P_{пр} = 10,7$  МПа; время сварки  $t_c = 27-32$  сек.

В соответствии с выполненными исследованиями описана циклограмма процесса, которая свидетельствует, что в течении 27 секунд, проходит процесс поэтапного формирования качественного сварного соединения, без перегрева и технологических дефектов (рисунок 2).

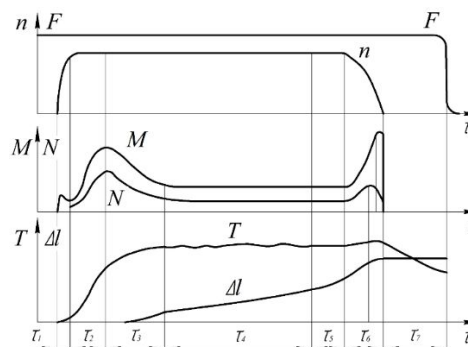


Рисунок 2 – Циклограмма процесса сварки трением

Подготовка к сборке, сборка и сварка осуществляется в следующей последовательности. В массивной и на трубчатой деталях вытачиваются конусы с заданным углами развертки, при этом на массивной детали угол развертки конуса несколько больший, чем у трубчатой детали (см. рисунок 1). Далее свариваемые детали устанавливают и закрепляют в неподвижном и подвижном зажимных устройствах сварочной машины. С

целью обеспечения оптимального тепловложения устанавливаются требуемые параметры процесса сварки (давление нагрева, давление осадки, время нагрева, скорость вращения).

Далее детали предварительно сжимают для обеспечения соосности и устранения люфтов на начальном этапе сварки: включают привод подвижного зажимного устройства; начинают процесс трения и нагрева поверхностей свариваемых деталей; процесс завершают осадкой и выдавливанием наружу пластичного металла (грата). В процессе сварки можно выделить следующие фазы [4, 5]:

Первая фаза – происходит начальная притирка нижней части конусных поверхностей.

Вторая фаза – увеличение числа взаимодействующих микровыступов, увеличение площади контакта и быстрый рост температуры на первоначальном участке контакта.

Третья фаза характеризуется постепенным увеличением температуры в месте контакта с образованием вязкого металла и, как следствие, начинается процесс подъема вдоль стыка пластифицированного металла (образования грата), который соответственно подогревает последующие кольцевые участки конической поверхности, которые вступают в процесс нагрева.

Четвертая фаза – процесс поэтапного формирования сварного соединения. В данной фазе происходит поэтапный нагрев всего сварочного соединения за счет включения в процесс нагрева кольцевых участков конической части.

Пятая фаза – фаза квазистационарного процесса трения, которая характерна установившемся состоянием основных параметров процесса.

Шестая фаза – происходит резкое, но плавное торможение, частота вращения падает до нуля, в связи с чем немедленно образуются металлические связи, образующие неразъемное сварное соединение.

Седьмая фаза – стадия проковки. Образовавшееся соединение подвергается деформации сжатия осевыми усилием. Данную стадию можно рассматривать как своеобразную высокотемпературную механическую обработку сварного соединения, способствующую измельчению зерна, а также повышению прочности и вязкости металла.

В предлагаемом способе фаза четыре различается по продолжительности в зависимости от размера контактирующих конусных поверхностей, так как в процессе сварки последовательно включаются новые кольцевые участки соединяемых конусных поверхностей. Это обеспечивает оптимальное тепловложение, качественное соединение и минимальный рост зерна, а также требуемую структуру и механические характеристики сварного соединения.

Радиографический и ультразвуковой контроль образцов показали удовлетворительные результаты [5]. Сварные модели, без удаления грата, образовавшегося в процессе сварки и характерная макроструктура, показаны на рисунке 3. Максимальная ширина сварного шва составляет 20-25 мм и соответствует протяженности зоны максимального термодформационного воздействия. Макроструктура состоит из зон с различной травимостью, четко видна линия сплавления. В макроструктуре можно наблюдать дефект в виде узкого кольцевого непровара в нижней части сварного соединения, но данный дефект удаляется в процессе механической обработки выполненного сварного соединения (удаления грата).

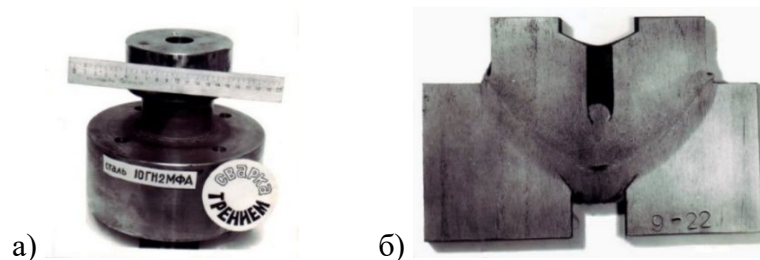
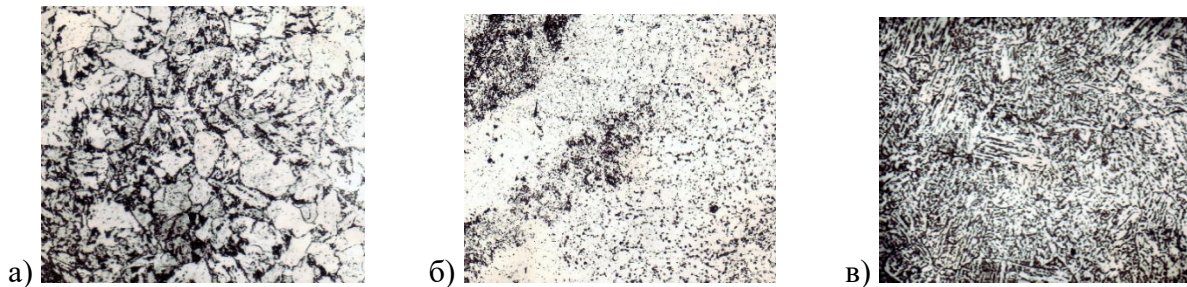


Рисунок 3 – Сварная модель (а) и макроструктура (б) сварного соединения патрубка, диаметром 80 мм, из стали 10ГН2МФА.

Микроструктура, характерная для различных зон сварного соединения, представлена на рисунке. Основной металл имеет структуру верхнего бейнита (рисунок 3а). Зона термического влияния представляет собой смесь бейнитных зерен и мелкоиглочатого феррита с ярко выраженными следами деформации (рисунок 3б). Линия сплавления имеет структуру нижнего бейнита (рисунок 3в). Механические свойства металла сварного соединения оказались несколько пониженными по сравнению с основным металлом. Результаты исследований показали, что для улучшения структуры и повышения механических свойств сварного соединения стали 10ГН2МФА необходимо проведение термической обработки (отпуска).



а – основной металл; б – зона термического влияния; в – линия сплавления, х500

Рисунок 4 – Микроструктура сварного соединения из стали 10ГН2МФА в состоянии после сварки

#### Заключение.

1. На основании результатов теоретических исследований разработаны способ и технология сварки трением штуцеров и патрубков малого диаметра (до 80 мм) из стали 10ГН2МФА.

2. Выполнена экспериментальная проверка разработанной технологии. Получены положительные результаты неразрушающего и разрушающего контроля подтвердившие, что достигнуто требуемое по нормативным документам качество сварных соединений штуцеров и патрубков малого диаметра.

3. В результате металлографических исследований, экспериментально доказано, что при сварке трением конусных контактирующих поверхностей в отличие от цилиндрической поверхности, тепловложение в сварной стык сокращается, что способствует измельчению структуры металла шва и зоны термического влияния и получению высоких механических свойств металла сварного соединения.

#### Список использованных источников.

1. Полетаев Ю.В. Сварка теплоустойчивых сталей большой толщины / Ю.В. Полетаев, В.Ю. Полетаев / Моногр. /Донской гос. техн. ун-т.- Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. - 167с.

2. Вилль В.И. Сварка металлов трением / В.И. Вилль. - Ленинград: Машиностроение, 1970. - 175 с.

3. Щепкин В.В. Метод определения параметров режима сварки трением изделий из углеродистой стали (науч. статья) /В.В. Щепкин, Ю.В. Полетаев/ Актуальные проблемы науки и техники. 2020: материалы нац. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 25-27 марта 2020 г. / Дон. гос. техн. ун-т. - Ростов н/Д.: ДГТУ, 2020. - С. 1106-1108. – URL:

4. Полетаев Ю.В. Сварка трением штуцеров и патрубков малого диаметра из углеродистой стали 22К / Ю.В. Полетаев, В.Ю. Полетаев, В.В. Щепкин // Вестник ДГТУ. - 2017. -№3. -С.89-95.

5. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. НП-104-18. - М.:2019. - 248с.

УДК 621.791.021

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ СБОРКИ  
ВНУТРЕННИХ КРОМОК ПОД СВАРКУ ДЕТАЛЕЙ ТРУБОПРОВОДОВ  
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МОНТАЖНЫХ РАБОТ НА ТРУБОПРОВОДАХ**

Синакаев Р.Т.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа

**Аннотация.** При сборке трубопроводов и их деталей неизбежно возникает смещение кромок из-за разных допусков на размеры элементов. При значительном смещении кромок требуется выполнять плавный переход конца одного из элементов, при этом появляется вероятность значительного утонения стенки данного элемента. При ремонте оборудования используется метод наплавки для восстановления поверхности. В данной работе рассмотрен способ наплавки внутренней поверхности трубы для новых изделий при монтаже, что позволит сохранить толщину стенки у элемента с меньшим внутренним диаметром.

При проведении входного контроля труб по ГОСТ 8732 и деталей по ГОСТ 17375; ГОСТ 17376; ГОСТ 17377; ГОСТ 17378; ГОСТ 17379; ГОСТ 17380 выявляются отклонения по наружному диаметру, что приводит к значительным затруднениям по обеспечению стыковки кромок и увеличению трудоемкости работ. Допуск на фактический наружный диаметр труб по ГОСТ 8732 и отводов по ГОСТ 17380 приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Допуск на наружный диаметр труб по ГОСТ 8732

Наружный диаметр, мм	Предельное отклонение для труб точности изготовления	
	повышенной	общей
до 50 включ	± 0,5 мм	± 0,5 мм
св.50 до 219 включ	± 0,8 мм	± 1,0 мм
свыше 219	± 1,0 мм	± 1,25 мм

Таблица 2 – Допуск на наружный диаметр отводов, переходов, тройников по ГОСТ 17380

Наружный диаметр номинальный, мм	Предельное отклонение, мм
До 60,3 включительно	+ 1,6 - 0,8
Свыше 60,3 до 114,3 включительно	± 1,6
Свыше 114,3 до 219,1 включительно	+ 2,4 - 1,6
Свыше 219,1 до 457,0 включительно	+4,0 - 3,2
Свыше 457,0	+ 6,3 - 4,8

Для обеспечения качественного выполнения корня сварного шва, в соответствии с требованиями ГОСТ 32569 в собранных под сварку стыковых соединениях из труб и деталей одинаковой номинальной толщины, не подлежащих механической обработке после сварки в зоне шва, допускаемое смещение кромок (несовпадение поверхностей соединяемых деталей) должно быть не более соответствующих величин, указанных в таблице 3.

При сборке деталей и труб с большим отклонением от номинального значения возникают трудности по обеспечению стыковки внутренних кромок (рисунок 1).

Смещение кромок по наружному диаметру допускается до 30 % от толщины стенки тонкого трубного элемента, но не более 5 мм. При превышении этих значений требуется обеспечивать плавный переход, с углом скоса не более 15° (рисунок 2).

Таблица 3 – Нормы допускаемых смещений кромок при сборке поперечных стыковых соединений

Номинальная толщина свариваемых деталей	Максимальное допускаемое смещение кромок в стыковых соединениях
До 6	0,1 S + 0,3
От 7 до 10	0,15 S
Св. 10 до 20	0,05 S + 1,0
Св. 20	0,1 S, но не более 3

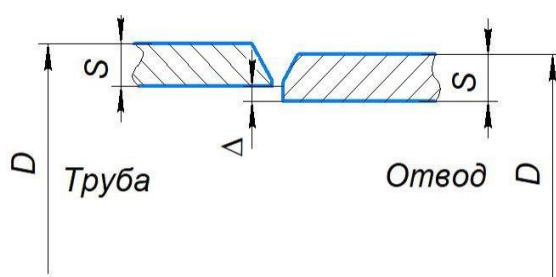


Рисунок 1 – Затруднительная стыковка кромок

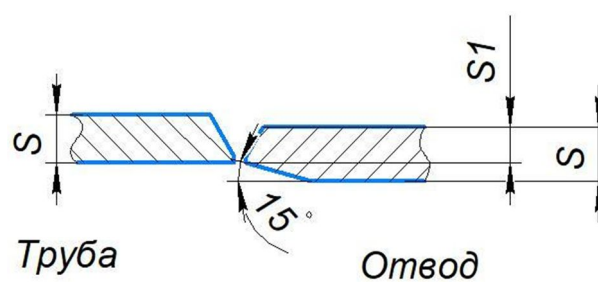


Рисунок 2 – Обработка кромок с выходом резца под углом не более 15°

Ниже приведены значения максимального несовпадения кромок для наиболее широко применяемых номенклатур диаметров трубопроводов [1].

В случае обработки внутренней кромки детали с меньшим внутренним диаметром согласно требованиям ГОСТ 32569-2013 с выходом резца под углом не более 15° (рисунок 2), остаточная толщина деталей составит значения, приведенные в таблице 4.

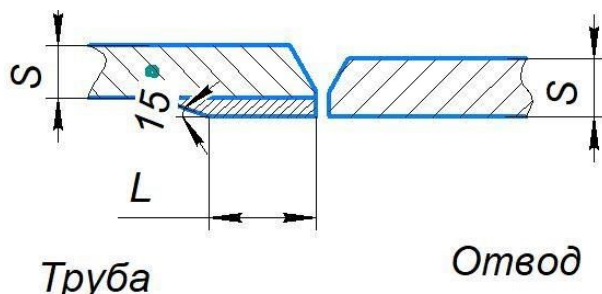
Таблица 4 – Остаточная толщина деталей при обработке внутренней кромки детали.

D ном.	D факт. трубы	D факт. детали	Толщина Sном.	Δ смещение кромок по внутреннему диаметру	S1, остаточная толщина после обработки внутренней кромки деталей с меньшим диаметром
DN150	160	157,4	6	2,3	3,7
DN200	221	217,4	6	2,8	3,2
DN250	275	270	8	3,5	4,5
DN300	327	323	8	3,0	6,0
DN400	430	423	10	4,0	6,0
DN500	535	525	12	6,9	5,1

С целью сохранения номинальной толщины стенки деталей и обеспечения выполнения требований ГОСТ 32569 при сборке труб с деталями со смещением кромок, превышающим допустимое значение, предлагается выполнить наплавку внутренней поверхности трубы, прилегающей к кромке стыкуемой с деталью (Рисунок 3), что полностью соответствует требованиям п.6.13 СТО 38.17.003-2009 «Сварка технологических трубопроводов и печных змеевиков при ремонте и реконструкции нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок»

В соответствии с требованиями нормативной документации по сварке (СТО 38.17.003-2009), если разность внутренних диаметров стыкуемых трубных элементов превышает допустимую по ГОСТ 32569-2013, то для обеспечения плавного перехода в месте стыка при внутреннем диаметре более 125 мм может быть применен метод наплавки внутренней

поверхности трубного элемента, имеющего больший диаметр. Наплавка выполняется одиночными кольцевыми валиками в направлении изнутри к концу трубы. Наплавка выполняется ручной дуговой или ручной аргодуговой сваркой с использованием сварочных материалов, применяемых для сварки данного стыка при режиме подогрева и охлаждения, используемого, для данной стали. Толщина наплавленного слоя после обработки шлифмашиной не должна превышать 6 мм [2].



После шлифовки длина наплавки должна быть не менее следующих значений:

- DN 125-219 мм – 20 мм
- DN более 219 до 273 мм – 30 мм
- ДУ более 273 мм – 50 мм.

Рисунок 3 – Наплавка внутренней поверхности трубы при сборке со смещением кромок

Метод наплавки внутренней поверхности может быть использован для труб из малоуглеродистых и низколегированных кремнемарганцовистых сталей и коррозионностойких сталей аустенитного класса без термической обработки наплавленной зоны [3].

Для обеспечения возможности применения этого метода для труб из теплоустойчивых хромомолибденовых сталей (15ХМ, 1Х2М1, 15Х5М, Х9М) после наплавки должна быть выполнена термическая обработка конца трубы с наплавкой по режиму для данной стали, рекомендуемому НД.

Предлагаемая технология, разрешенная по СТО 38.17.003-2009 распространяется на сварку при ремонте технологических установок. В данной работе предлагается использовать метод наплавки для обеспечения требуемой точности сборки внутренних кромок на сварочные работы, производимые при монтаже новых трубопроводов. Это позволит сохранить номинальную толщину свариваемых деталей при сварке.

#### Список использованных источников:

1. Tokarev, A. S. Determining Optimal Geometric Dimensions of Alternative Design Elements of Rolled and Welded Tube-to-Tube Sheet Joints / A. S. Tokarev, D. V. Karetnikov, A. M. Fayrushin // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020) : Серия: LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING, Chelyabinsk, 18–22 мая 2020 года. – Chelyabinsk: Springer Science+Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic Publishers B.V., 2021. – P. 227-233. – DOI 10.1007/978-3-030-54814-8\_28. – EDN SLXTFZ.

2. Яковлева, Д. Н. Разработка новых конструкций узла тройникового соединения трубопровода с целью увеличения работоспособности / Д. Н. Яковлева, А. М. Файрушин // Актуальные проблемы науки и техники : Материалы I Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию начала производства авиационной техники в городе Сарапуле, Сарапул, 01–31 мая 2020 года. – Сарапул: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2020. – С. 28-32. – EDN YRDRNX.

3. Файрушин, А. М. Моделирование новых конструкций узла тройникового соединения трубопровода с целью увеличения работоспособности / А. М. Файрушин, Д. Н. Яковлева // Булатовские чтения. – 2020. – Т. 4. – С. 173-176. – EDN IGORWP.

УДК 621.791.015

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ЗАМЕНЕ ДЕФЕКТНОГО УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА, НАХОДИВШЕГОСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Казаков С.Ю.<sup>1</sup>, Мансуров И.Р.<sup>2</sup>

Филиал АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфанефтехим», г. Уфа,  
ООО «Башнефть-Строй», г. Уфа

**Аннотация.** Во время ремонта на технологической установке возникают ситуации необходимости сварки новых участков трубопровода с участками, находившимися в эксплуатации. В этом случае велика вероятность несовпадения кромок стыка по внутренней поверхности. Кроме того, изношенный стык трубы не может обеспечить высокое качество корня шва. Предлагается использовать наплавку на внутреннюю поверхность изношенной трубы, что позволит обеспечить номинальную толщину деталей и высокой качество корня сварного шва. Также предлагается использовать описанный метод экспресс-оценки свариваемости труб после длительной эксплуатации в средах, содержащих сероводород.

При ремонте технологических установок на нефтехимических производствах возникает необходимость замены участков технологического трубопровода, отбракованных по результатам экспертизы промышленной безопасности. Нормы отбраковки по остаточной толщине стенки трубопроводов установлены в ГОСТ 32569-2013 «Трубопроводы технологические стальные», которые приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Отбраковочные толщины для труб и деталей трубопроводов (в миллиметрах)

Наружный диаметр, DN	<25	<57	<114	<219	<325	<377	>426
Наименьшая допустимая толщина стенки	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0

При ремонте технологических установок, когда приходится выполнять замену участков изношенных трубопроводов возникает необходимость стыковки нового участка трубопровода со старой, изношенной трубой, которая не достигла отбраковочной толщины.

Износ старых трубопроводов, как правило, происходит по внутренней поверхности трубы. На рисунке 1 показаны фотографии внутренней поверхности технологических трубопроводов, изношенных в результате коррозионного и эрозийного износа в процессе эксплуатации.



Рисунок 1 – Внутренние поверхности изношенных труб

Таким образом, при замене дефектного участка получаем разнотолщинность стыкуемых труб, и как следствие, нестыковку кромок по внутреннему диаметру трубопровода и вновь вставляемой «катушки» от 1 мм и более.



Получить качественное сварное соединение при нестыковке внутренних кромок более 1 мм по внутреннему диаметру крайне затруднительно [1].

Для устранения разнотолщинности по внутреннему диаметру трубы нормативная документация, в частности СТО 38.17.003-2009 «Сварка технологических трубопроводов и печных змеевиков при ремонте и реконструкции нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок», предлагает следующие способы:

- 1) расточка трубы с меньшим внутренним диаметром, показана на рисунке 2;
- 2) раздача трубы с меньшим внутренним диаметром, показана на рисунке 3.

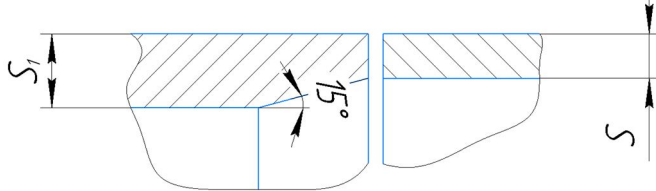


Рисунок 2 – Расточка трубы



Рисунок 3 – Раздача трубы

Расточка труб – это наиболее распространенный способ устранения разнотолщинности. Однако указанный способ приводит к уменьшению толщины «катушки», что отрицательно повлияет на срок эксплуатации трубопровода. Кроме того, при сварке корня шва в соединении участвует металл старой трубы, что приводит в повышенной вероятности возникновении дефектов в корне шва и как следствие в соединении в целом [2].

Применение раздачи ограничено типоразмерами и группой стали деталей трубопровода. При сварке корня шва в соединении также участвует металл старой трубы, что приводит в повышенной вероятности возникновении дефектов в корне шва и как следствие в соединении в целом.

Кроме этого, нормативный документ СТО 38.17.003-2009 предлагает третий способ устранения разнотолщинности – это наплавка внутренней поверхности элемента с большим внутренним диаметром, этот способ приведен на рисунке 4.

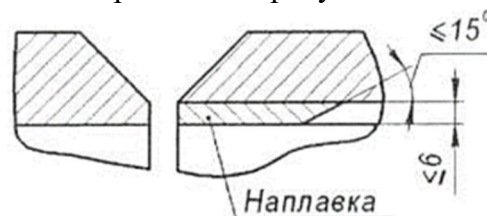


Рисунок 4 – Наплавка внутренней поверхности трубы при стыковом соединении

Наплавка выполняется одиночными кольцевыми валиками в направлении изнутри к концу трубы. Наплавка выполняется ручной дуговой или ручной аргодуговой сваркой с использованием сварочных материалов, применяемых для сварки данного стыка при режиме подогрева и охлаждения, используемого, для данной стали. Толщина наплавленного слоя после обработки шлифмашиной не должна превышать 6 мм. Нормативный документ также регламентирует длину наплавленного слоя в зависимости от диаметра трубы. Длина наплавленного слоя должна составлять от 20 до 50 мм.

При выполнении наплавки внутренней поверхности старых изношенных тонкостенных труб толщина труб увеличивается за счет уменьшения внутреннего диаметра. При последующей подготовке наплавленных кромок с учетом новой, большей толщины деталей в зоне сварного стыка, корневой шов выполняется по кромкам, образованным из вновь наплавленного (свежего) металла. Это позволяет снизить вероятность образования дефектов в корне шва, вызванных выделением растворенного водорода из старого металла. Соответственно снижается вероятность образования дефектов в сварном соединении в целом. Примеры наплавки старой трубы изнутри представлены на фотографиях рисунка 5.



Рисунок 5 – Фотографии выполненной наплавки внутренней поверхности трубы, находившейся в эксплуатации

Такой способ стыковки кромок может быть использован для трубопроводов с Ду 70 и выше. Так соединение С56 по ГОСТ 16037 рекомендуется применять для трубопроводов с наружным диаметром 70 мм и выше. Подварочный шов этого соединения находится на расстоянии не менее 30 мм от кромки фланца, а для больших диаметров 40...50 мм и более. Обработка полученных наплавки может выполняться с применением прямых шлифовальных машинок.

Технология сварки технологических трубопроводов и печных змеевиков при их ремонте и реконструкции должна учитывать возможные изменения структуры и свойств основного металла, особенно при сверхнормативных сроках эксплуатации, которые снижают (ухудшают) свариваемость и свойства получаемых сварных соединений. Нормативная документация по ремонтам предлагает способы оценки свариваемости металла после эксплуатации.

Но предложенные способы требуют проведения сварки дополнительных контрольных соединений из материала старых труб и их сравнение с образцами, сваренными из новых труб той же марки материала. Кроме того, для сравнения результатов кроме неразрушающих методов контроля предлагается выполнять металлографические исследования для сравнения образцов из старых и новых труб.

Такие сравнительные испытания должны выполняться заблаговременно, до начала ремонтов и с участием и руководством представителей технадзора эксплуатирующей организации, т.к. решение об отбраковке могут принять только представители заказчика. Выполнение сравнительных испытаний по в рамках ограниченного времени, выделенного на проведение ремонтов установок крайне затруднительно, а часто невозможно [3].

Предлагается использовать экспресс-оценку свариваемости труб после длительной эксплуатации в средах, содержащих сероводород. Она не требует подготовки специальных образцов и проведения длительных испытаний и дает качественную оценку возможности получения бездефектного сварного соединения при ремонте труб после длительной эксплуатации в средах, содержащих сероводород, который присутствует в той или иной степени, в большинстве трубопроводов.

**Экспресс-Оценка свариваемости труб после длительной эксплуатации в средах, содержащих сероводород.**

1 Экспресс-оценка основана на определении влияния газонасыщенности металла труб на формирование металла сварочной ванны.

2 Проводится методом точечного нагрева до начала сварочных работ.

3 На зачищенной до металлического блеска поверхности трубы ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом выполняется точечный нагрев с оплавлением

поверхности без применения присадочного материала. После завершения нагрева проводится визуально-измерительный контроль оплавленного участка. Нагрев должен проводиться с внутренней стороны трубы на расстоянии 30...50 мм от предполагаемого места расположения ремонтного стыка. При невозможности выполнить нагрев изнутри трубы, для труб малого диаметра с толщиной стенки не более 5 мм, допускается выполнять нагрев снаружи трубы.

4 При получении плотного бездефектного металла в месте оплавления допускается проведение ремонтных сварочных работ.

5 При получении после точечного нагрева на поверхности оплавленного металла пор, раковин и вздутий проводится обезводороживающая обработка металла труб по режимам дегазации. Нагрев до температур 350...400°C, выдержка в течении 1 часа. Дегазации подвергается участок трубы длиной не менее 0,5 м, после чего на середине обработанного участка повторно проводится экспресс-оценка свариваемости

6 При получении плотного бездефектного металла в месте оплавления допускается проведение ремонтных сварочных работ.

7 При обнаружении после дегазации дефектов на оплавленной поверхности, трубы считаются непригодными для ремонтных сварочных работ. Решение о дальнейшей эксплуатации участков трубопроводов, не подлежащих ремонту сваркой, принимается по результатам технического обследования представителями технадзора заказчика.

#### **Заключение:**

1. Предлагаемый способ стыковки внутренних кромок труб позволяет:

- сохранить номинальную толщину свариваемых деталей в зоне сварки;
- обеспечить качество сварки корня шва.

2. Предлагается разрешить использование данного способа стыковки кромок для труб с наружным диаметров 70 мм и выше:

- при замене дефектных участков технологических трубопроводов;
- при монтаже технологических трубопроводов.

3. Предлагается учесть способ Экспресс-Оценки свариваемости труб после длительной эксплуатации в средах, содержащих сероводород в нормативной документации, регламентирующей ремонт технологических трубопроводов.

4. Предлагается внести изменения в проектно-сметную документацию, учитывающую увеличение трудоемкости сборочно-сварочных работ при применении такого способа стыковки кромок.

#### **Список использованных источников:**

1. Файрушин, А. М. Оценка работоспособности штуцерных узлов сосудов давления в условиях циклического режима эксплуатации / А. М. Файрушин, А. В. Исламова // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2021. – № 1. – С. 13-24. – DOI 10.17122/ogbus-2021-1-13-24. – EDN LMEDWZ.

2. Karpov, A. L. Analysis of Methods of Protection of Inner Surface of Welds of Field Pipelines / A. L. Karpov, M. Z. Zaripov, A. M. Fayrushin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2021. – P. 042037. – DOI 10.1088/1755-1315/666/4/042037. – EDN MKNZJS.

3. Исмагилов, И. И. Разработка технологического процесса напыления внутренней поверхности ловильной головки УЭЦН / И. И. Исмагилов, А. М. Файрушин // 71-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: Материалы 71-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2-х томах, Уфа, 26 апреля – 06 мая 2020 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – С. 331. – EDN НРКАНУ.

## ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

УДК 621.791

### ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУЦИЙ С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИТЕРИЕВ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО ТИПА

Гильманшин Р.А.

ООО «ГСП-2» АО «Газстройпром», г. Уфа

**Аннотация.** Статья посвящена вопросам оценки несущей способности сварных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами на основе использования критериев интерполяционного типа, учитывающих характер разрушения металлоконструкций с геометрические параметры дефектов и сварных соединений, а также свойства основного металла или сварных соединений. Анализ представленных расчетных данных позволяет оценить диапазон их допустимых размеров дефектов, не приводящих к снижению эксплуатационных нагрузок, действующих на сварные металлоконструкции в процессе их эксплуатации, исходя из обеспечения требуемого уровня допускаемых напряжений.

Нормирование дефектов в сварных металлоконструкциях, как правило, основывается на методах расчета их несущей способности с учетом предполагаемого механизма разрушения в процессе эксплуатации. При этом процедура определения допустимых размеров дефектов проводится, исходя из реализации наиболее неблагоприятного с точки зрения потери несущей способности случая, отвечающего минимальному уровню разрушающих напряжений [1-3]. Такая постановка нормирования дефектов способствует значительному увеличению объема ремонтных работ, что приводит к увеличению стоимости и сроков изготовления или ремонта конструкций

В последнее время при оценке несущей способности металлоконструкций широкое распространение получили методики расчета, основанные на применении критериев интерполяционного типа, базирующихся на принципе граничной интерполяции. В соответствии с данным подходом решение для промежуточных состояний представляется в форме интерполяционных соотношений между известными граничными интерполяциями, соответствующими двум альтернативным механизмам разрушения: хрупкому и вязкому. Использование данного подхода позволяет, на наш взгляд, провести нормирование дефектов с учетом их месторасположения, остроты в вершине дефектов, а также свойств основного металла или сварных соединений.

В основе предлагаемого решения положен один из критериев интерполяционного типа [4], учитывающий смешанный характер разрушения металлоконструкций в процессе их эксплуатации

$$\left(\frac{\Lambda_i}{\Lambda_\rho}\right)^s + \left(\frac{K_I}{K_{IC}(\rho)}\right)^{2s} \leq 1, \quad (1)$$

где  $s$  – параметр интерполяции (как правило, принимают  $s = 2$ );  $K_{IC}(\rho)$  – критический коэффициент интенсивности напряжений (вязкость разрушения металла конструкции или сварного соединения);  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений, который может быть представлен в следующем виде [5]

$$K_I = \sigma_{НОМ} \sqrt{\frac{\pi}{2}} l \cdot f_k \cdot f_M \cdot f_{Пл} \cdot f_\rho; \quad f_k = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi}{2} \frac{l}{t}\right)} \quad (2)$$

где  $\sigma_{НОМ}$  – номинальные напряжения в стенке металлоконструкции;  $l$  – размер (глубина) дефекта в направлении толщины металлоконструкции  $t$ ;  $f_k$  – поправка на толщину стенки металлоконструкции (поправка Федерсена [5]);  $f_M$  – поправка на местоположение дефекта

( $f_M = 1,12$  – для поверхностного дефекта;  $f_M = 1$  – для внутреннего дефекта, [5]) (рисунок 1);  $f_{Пл}$  – поправка на пластичность, учитывающая особенности образования пластической зоны в окрестности вершины дефекта.

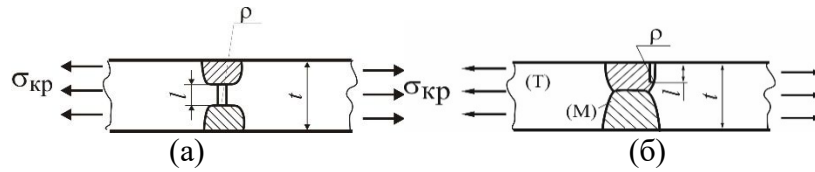


Рисунок 1 – Фрагмент сварного соединения с внутренним непроваром (а) и поверхностным несплавлением на границе сплавления (б):

(Т) – основной металл; (М) – сварной шов

Для однородных сварных соединений в соответствии с подходом [3], поправка  $f_{Пл}$  может быть получена на основе расчетной схемы, приведенной на рисунке 2.

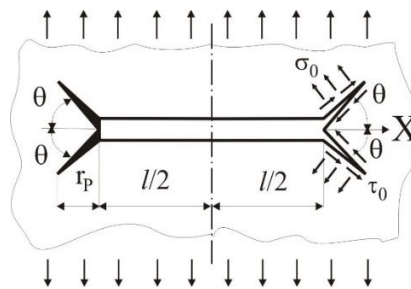


Рисунок 2 – Расчетная схема для учета пластической зоны в окрестности вершины дефекта

$$f_{Пл} = \left[ \frac{\cos^2 \theta}{1 - \cos \theta} + \frac{1}{4} \left( \frac{1}{\cos \theta} - \cos 2\theta \right) \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол наклона клинообразной зоны пластичности в окрестности вершины дефекта (для случая плоской деформации  $\theta = \pm \frac{\pi}{4}$  и  $f_{Пл} = 0,84$ ).

Поправка на остроту дефекта  $f_\rho$  при определении коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  была получена на основе корректировки решения Гриффитса путем учета зависимости размеров зоны разгрузки над и под дефектом от величины радиуса в окрестности его вершины [3]

$$f_\rho = \left[ 1 - \frac{(\pi - 2)(2 - \sqrt{2})}{\pi} \frac{2\rho}{l} - \frac{(\pi - 1) - (\pi - 2)(2 - \sqrt{2})}{\pi} \left( \frac{2\rho}{l} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Для трещиноподобных дефектов типа непровара, несплавлений, подрезов и т.п.  $f_M \approx 1$ .

Критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{IC}$  также зависит от остроты в вершине дефекта и для рассматриваемого случая может быть определен с учетом следующего соотношения [3]

$$K_{IC}(\rho) = K_{IC} F_\rho \quad (5)$$

где  $F_\rho$  – поправка на остроту дефекта при определении  $K_{IC}$

$$\begin{cases} F_\rho = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}; \rho_0 = 0,08r_\rho; r_\rho = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K_{IC}}{\beta\sigma_b} \right)^2; \text{ при } \rho > \rho_0 \\ F_\rho = 1; \text{ при } \rho \leq \rho_0 \end{cases} \quad (6)$$

Параметры, расположенные в левой скобке соотношения (1),  $\Lambda_i$  и  $\Lambda_\rho$  описывают границу диапазона интерполяции, отвечающую вязкому разрушению рассматриваемых соединений с концентратором (дефектом).

Величину  $\Lambda_i$ , характеризующую уровень накопленных повреждений в окрестности вершины концентратора, определяли в соответствии с [3, 5] с учетом эффекта концентрации напряжений в окрестности вершины дефекта [6].

$$\Lambda_i = 0,278 \frac{K_I^2 K_\sigma^2}{\sigma_T E \rho} \quad (7)$$

где  $K_\sigma$  – коэффициент концентрации напряжений в окрестности вершины дефекта конечного радиуса [7].

Так например, для рассматриваемых сварных соединений из стали ВСт.3пс при условиях эксплуатации металлоконструкций ( $T = -60^\circ\text{C}$ ) и уровне допускаемых напряжений  $[\sigma] = 0,66\sigma_T$  ( $n=1,5$ ) диапазон допустимых размеров поверхностных дефектов  $[0; (l/t)_d]$  с радиусом в вершине  $(0,1 \dots 0,14)$  мм находится в интервале  $[0; 0,1]$  (см. рисунок 3).

Математически допустимый интервал размеров дефектов для рассматриваемого случая может быть представлен следующим соотношением

$$0 \leq \left( \frac{l}{t} \right)_d \leq 10 \frac{\Lambda_\rho}{f_M^2} \frac{E}{\sigma_T} \frac{\rho}{t} \frac{n^2}{K_\sigma^2} \quad (8)$$

Как видно, диапазон допустимых размеров дефектов определяется целым рядом параметров, характеризующих тип дефекта ( $f_M, \rho$ ) механические свойства металла сварных соединений ( $E, \sigma_T, \sigma_b, \Lambda_\rho, m, \gamma$ ), вид, жесткость и концентрацию напряженного состояния ( $\nu_\sigma, \Pi, K_\sigma$ ), толщину металлоконструкций ( $t$ ), условия эксплуатации (температуру  $T$ ), и принятым коэффициентом запаса прочности  $n$ .

#### Список использованных источников.

1. Белокур И.П. О критериях оценки дефектов сварных соединений /И.П. Белокур, В.В. Панасюки др. //Автоматическая сварка. – 1975. - №5.–С.30 - 33.
2. Макаров И.И. Критерии оценки технологических дефектов в сварных конструкциях //Сварочное производство. – 1975.– №12. – С. 9-12.
3. Шахматов М.В., Ерофеев В.В. Коваленко В.В. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами – Челябинск: ЦНТИ, 2000.– 227с.
4. Морозов Е.М. Двухкритериальные подходы в механике разрушения // Проблемы прочности, 1985, №10.– С.103-108.
5. Махутов Н.А. Сопrotивляемость элементов конструкций хрупкому разрушению.-М.: Машиностроение, 1973.– 200с.
6. Ерофеев В.В. Об особенностях использования принципа граничной интерполяции при нормировании дефектов в сварных металлоконструкциях /В.В. Ерофеев, О.А. Гребенщикова //Материалы УП Уральской НП-конференции: Сварка. Реновация. Триботехника. - Н. - Тагил: НТИ (филиал) УРФУ, 2015.
7. Келли А. Высокопрочные материалы. – М.: Изд-во «Мир», 1976.-256с.

УДК 620.1

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПО  
ТИПАМ ДЕФЕКТОВ СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
ДИФРАКЦИОННО-ВРЕМЕННЫМ МЕТОДОМ**Аджибае Д.А.<sup>1</sup>, Савичев М.П.<sup>2</sup>, Тайметов А.П.<sup>1</sup><sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа.<sup>2</sup>ООО «ГАЦ РБ», г. Уфа.

**Аннотация.** Статья посвящена разработке методики ультразвукового контроля стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом (TOFD). Рассматриваются порядок настройки дефектоскопа для проведения TOFD. В результате экспериментов на контрольных образцах с искусственными дефектами описаны критерии выявления и интерпретации дефектов на дефектограммах TOFD. Составлен атлас типовых дефектов сварки плавлением, таких как пористость, включения, непровары.

В отличие от эхо-импульсного метода, при котором регистрируются отраженные сигналы от поверхности дефектов, в основе метода TOFD лежит принцип регистрации сигналов, дифрагированных на краях дефекта. Этот метод чувствителен к дефектам любого типа, независимо от их направленности, и особенно актуален для обнаружения вертикально ориентированных дефектов, плохо выявляемых эхо-импульсным методом. Например, несплавление между валиками, характерное для сварки сварных соединений с узкой разделкой в 30 градусов. Амплитуда сигнала не используется для определения размера дефекта. Глубина несплошности определяется временем прохождения дифракционных сигналов. Также имеются характерные мертвые зоны метода TOFD – приповерхностная и корневая зоны сварного шва. Поэтому TOFD обычно комбинируют с классическим эхо-импульсным контролем группой одноэлементных преобразователей или фазированной решеткой. При этом метод TOFD используют для поиска дефекта и уточнения его глубины и высоты, а браковку производят по скану, полученному эхо-импульсным методом.

На данный момент разработаны и введены в действие все необходимые стандарты для широкого применения метода TOFD за рубежом [6] и на территории Республики Беларусь [2]. В России нормативный документ введен в действие недавно - с октября 2022 года [1]. Обучение правильной интерпретации дефектов со сканов проводится на изображениях типовых дефектов. К сожалению, в имеющейся нормативной документации [1,2,6] таких изображений недостаточно и указано [1], что применение метода TOFD требует дополнительной подготовки дефектоскописта по настройке оборудования и расшифровке сканов [1].

Целью работы является разработка атласа дефектов, содержащего критерии выявления и интерпретации дефектов на дефектограммах TOFD. Для достижения поставленной цели необходимо изготовить образцы с искусственными дефектами, провести их неразрушающий контроль и сопоставить полученные TOFD-сканы с результатами рентгенографического контроля, ультразвукового контроля «традиционным» эхо-импульсным методом и результатами металлографических исследований.

Рассмотрим настройку метода TOFD. Пара пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) с продольными волнами и одинаковыми углами ввода, располагаются на расчетном расстоянии на противоположных сторонах сварного шва. Контроль производится за один проход без поперечного перемещения относительно сварного шва. Для толщин от 10-50 мм применяют преобразователи с углами ввода 70°- 60° и частотами от 3 до 15 МГц [1]. Один из ПЭП (генератор) излучает ультразвуковые сигналы, которые улавливаются преобразователем (приемником) на другой стороне сварного шва. В бездефектных сварных соединениях приемный преобразователь улавливает сигналы двух волн: одной, идущей по поверхности, и другой, отражающейся от донной поверхности. Когда присутствует какая-

либо несплошность, например, трещина, происходит дифракция ультразвуковой волны от ее краев. Используя измеренное время прохождения импульса, можно рассчитать глубину вершины трещины. Точку пересечения осей диаграмм направленности передатчика и приемника выбирают на глубине, равной 2/3 толщины контролируемого образца (рисунок 1).

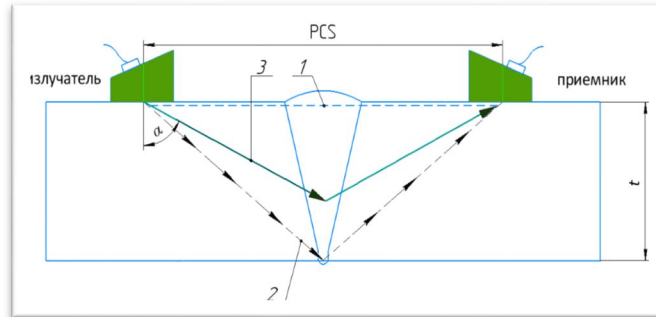


Рисунок 1 – Выбор расстояния между преобразователями TOFD

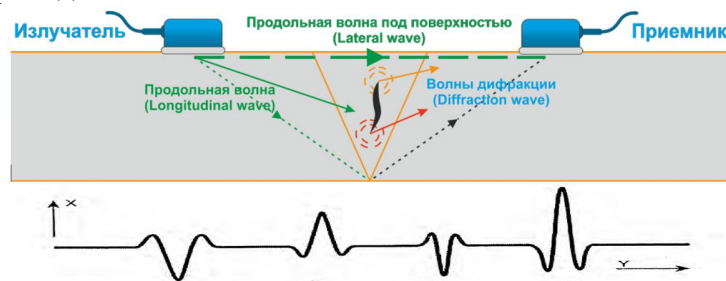
1 – продольная волна под поверхностью; 2 эхо-сигнал от донной поверхности;  
3 – продольная волна

Расстояние между точками ввода приемника и излучателя PCS, мм, рассчитывается по формуле:

$$PCS = 2 * \frac{2}{3} * t * tg(\alpha)$$

где t-толщина стенки, мм;  $\alpha$ -угол ввода, град.

При работе излучателя формируется подповерхностная волна, распространяющаяся непосредственно под верхней поверхностью контролируемого объекта, и продольная волна, поступающая на приемник при отражении от донной поверхности. Поперечная волна, возникающая в результате преломления продольной волны, приходит к приемнику после отраженной продольной. Сигналы TOFD отображаются на экране в виде А-скана недетектированного сигнала. На В-скане (TOFD-скане) амплитуда сигнала отображается в градациях серого цвета. Отображение двухполярного невыпрямленного сигнала дает информацию о фазе сигналов. Подповерхностная волна и волна, отраженная от донной поверхности всегда находятся в противофазе. Дефект считается четко различимым и подлежит оценке, если дифрагированные сигналы от краев дефекта однозначно разделены (рисунок 2) [3]. Если изображение TOFD нечеткое и в каналах, работающих по эхо-импульсному методу, отсутствует сигнал, то такую индикацию следует расценивать как незначительную и проводить ее заново.



X – амплитуда; Y – время; a – боковая волна;

b – сигнал от верхнего края несплошности; c – сигнал от нижнего края несплошности;

d – эхо-сигнал от донной поверхности

Рисунок 2 – Изображение дифракции волн на верхнем и нижнем краях дефекта:

Длину показаний TOFD следует определять с помощью параболических курсоров в зависимости от величины перемещения датчика вдоль сварного шва. Фактическая длина дефекта может отличаться от измеренного значения из-за того, что ширина луча



ультразвукового преобразователя не равна нулю. Глубина дефекта равнотолщинного сварного соединения в TOFD определяется и измеряется автоматически встроенным калькулятором дефектоскопа. Начало развертки должно быть установлено как минимум за 1 мкс до начала сигнала от поверхностной волны и заканчиваться как минимум через 1 мкс после первого сигнала от донной поверхности. Усиление сигнала должно быть таким, чтобы уровень сигнала от головной волны находился от 20% до 30% предельной высоты экрана. Чувствительность метода TOFD значительно снижается при расположении дефектов вблизи к поверхности (до 1/3 толщины стенки от поверхности сканирования) [1,2].

При настройке чувствительности представлены способы настройки чувствительности для метода TOFD. Существует четыре уровня чувствительности: А, В, С, D. При этом достоверность контроля повышается от уровня А к уровню D. Уровень А используется для контроля сварных соединений толщиной до 50 мм. Для настройки чувствительности по уровню А нет необходимости использовать контрольные образцы (КО). В то время, как для уровней чувствительности В, С и D проверка чувствительности проводится с помощью КО. А для уровней С и D дополнительно необходимо проводить верификацию [1,2].

Для идентификации и интерпретации дефектов при анализе сканов TOFD следует обращать внимание на следующие характеристики:

- отклонение сигнала от головной волны;
- отклонение сигнала от донной поверхности;
- появление сигналов между головной волной и отражением от донной поверхности;
- фаза сигналов между головной волной и отражением от донной поверхности;
- сигналы с изменением фазы после первого отражения от донной поверхности.

Полученные в результате работы типовые изображения дефектов на дефектограмме TOFD скане приведены на рис. 3-5.

Дефект в виде непровара имеет следующие признак: на фоне сигнала от донной поверхности добавляется сигнал от верхней части непровара (рисунок 3). При наличии включения в сечении шва вблизи поверхности или выходящего на поверхность- сигнал от головной волны перекрывает сигнал от верхнего края дефекта (рисунок 4). Высоту дефекта при этом не измерить. Пористость в сечении шва выглядит как серия образов гиперболической формы. Скопление пор трудно анализировать, но легко опознать (рисунок 5).

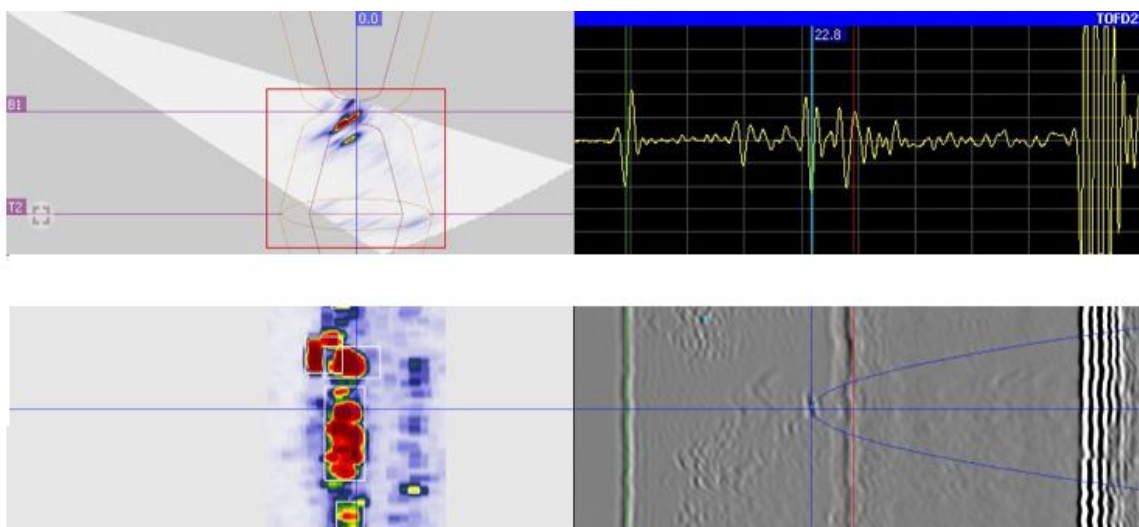


Рисунок 3 – Непровар в корне шва

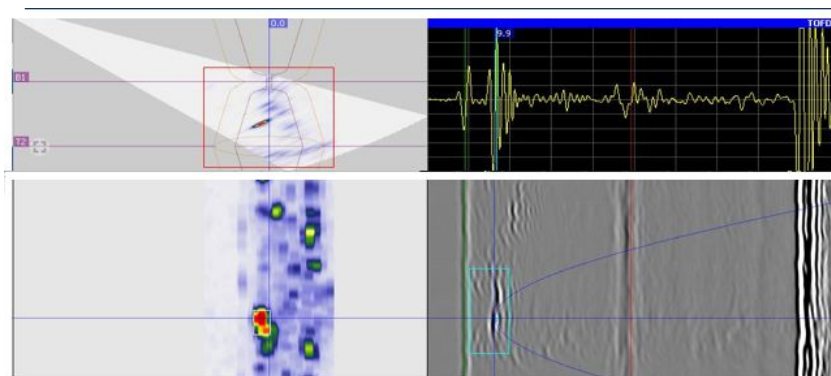


Рисунок 4 – Включение в сечение шва

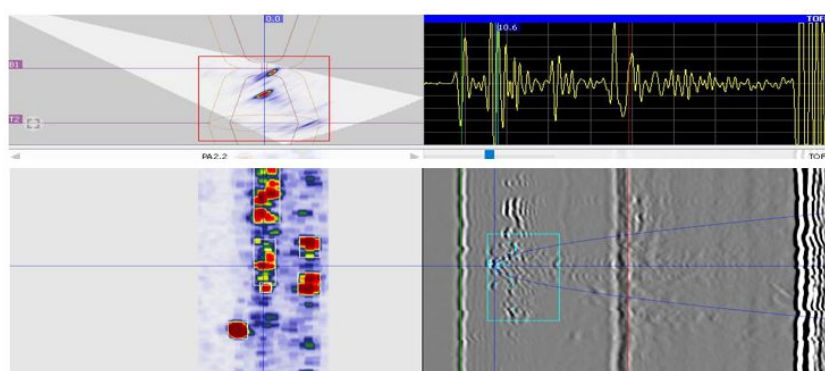


Рисунок 5 – Пористость в сечение шва

#### Выводы

1. Разработана методика проведения контроля методом TOFD стыкового сварного соединения толщиной 16 мм.
2. Получены соответствия между основными видами дефектов стыковых сварных соединений и результатами контроля на сканах TOFD. Описаны признаки их интерпретации по форме сигналов на скане TOFD.

#### Список использованных источников.

1. ГОСТ ISO 10863— 2022. Неразрушающий контроль сварных соединений Ультразвуковой Контроль. Применение дифракционно-временного метода (TOFD)
2. СТБ EN 583-6-2013. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой метод. Часть 6. Дифракционно-временной метод обнаружения и измерения несплошностей
3. Сайт компании «Olympus» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.olympus-ims.com>. – Дата доступа: 20.09.2022.
4. С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко; О. С. Сергеева. Приборы и методы акустического контроля. Методические указания к самостоятельной работе студентов специальности 1-540102 «Методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов». – Могилев; ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет, 2014.
5. Разработка методики ультразвукового контроля равнотолщинных стыковых сварных соединений дифракционно-временным методом. В. В. Атрошенко В.В., Д.А. Аджибае, М.П. Савичев. Уфимский государственный авиационный технический университет Уфа, Россия.
6. British TOFD standard BS 7706. Guide to Calibration and setting-up of the Ultrasonic Time of Flight diffraction (TOFD) technique for defect detection, location and sizing of flaws

УДК 621.642.39

**ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
УТОРНОГО УЗЛА ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА**

Зорин А.Е.<sup>1</sup>, Голосов П.С.<sup>1</sup>, Скорняков А.А.<sup>2</sup>, Мумриков М.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НИИ Транснефть», г. Москва

<sup>2</sup> НТЦ ООО «НИИ Транснефть» г. Уфа

**Аннотация.** Узел сопряжения стенки резервуара с дном (уторный узел) является одним из наиболее проблемных участков в конструкции вертикальных цилиндрических сварных резервуаров. Связано это с повышенной дефектностью уторных сварных соединений, а также неэффективностью ультразвукового и радиографического контроля (из-за наличия конструктивного непровара). В целях повышения контролепригодности данного узла предлагается выполнить его с полным проплавлением для исключения конструктивного непровара.

Отработка технологий неразрушающего контроля выполнена на образцах, изготовленных из участков (фрагментов) уторного соединения различного конструктивного исполнения: с технологическим непроваром и с полным проплавлением. Предварительно в образцах заложены искусственные дефекты (пазы, сверления) и естественные дефекты, полученные при нарушении заданных режимов сварки (поры, непровары). На подготовленные образцы составлены паспорта, в которых указаны типы дефектов и места их расположения. При составлении паспортов применены следующие методы контроля: ВИК, РК, УК, МК.

Ультразвуковой контроль проведен с применением дефектоскопа Harfang Veo (технология фазированных решеток). Схемы неразрушающего контроля, которые применялись в данной работе, показаны на рисунке 1.

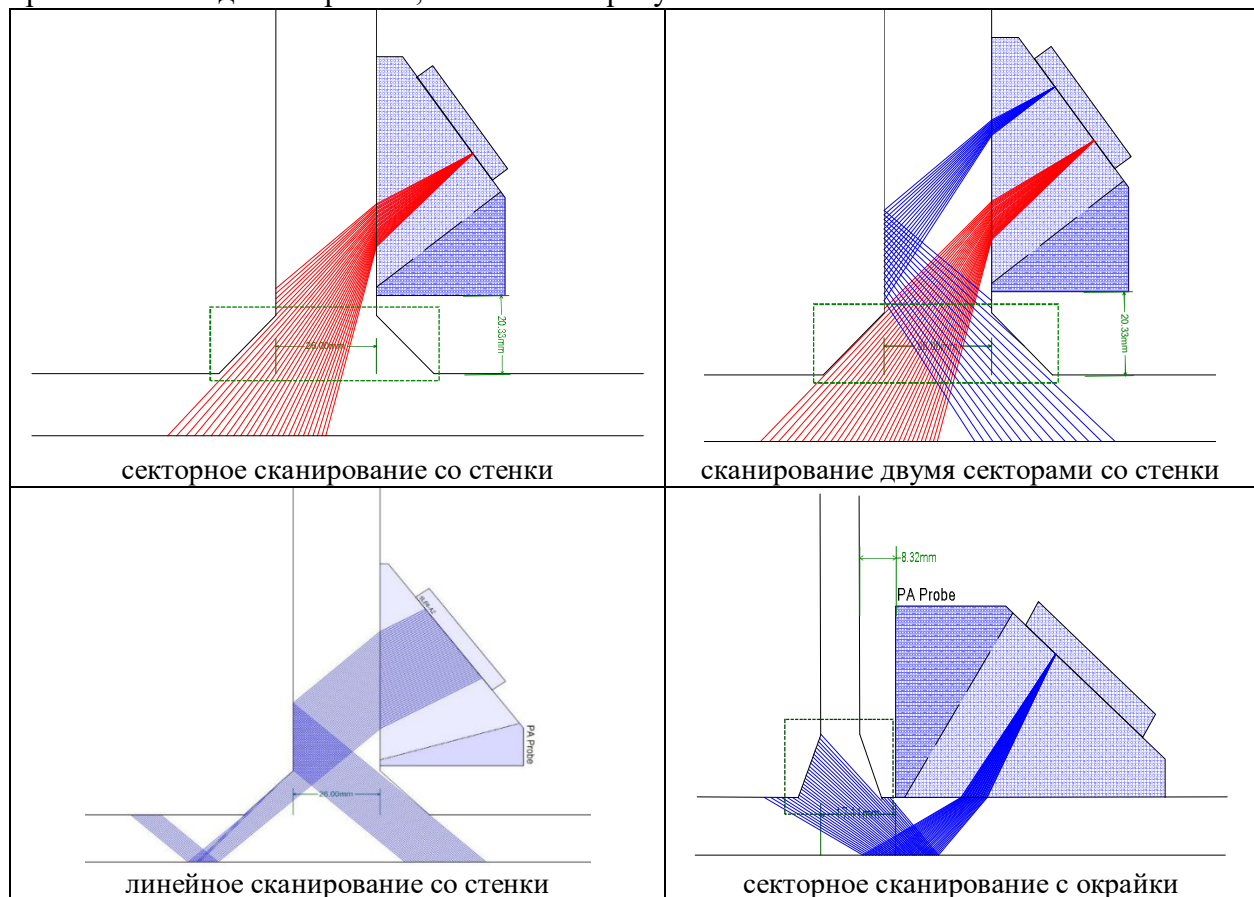


Рисунок 1 – Используемые схемы сканирования

Выполнен контроль образца с полным проваром по схеме секторного сканирования со стенки и крайки. Результаты контроля показаны на рисунке 2.

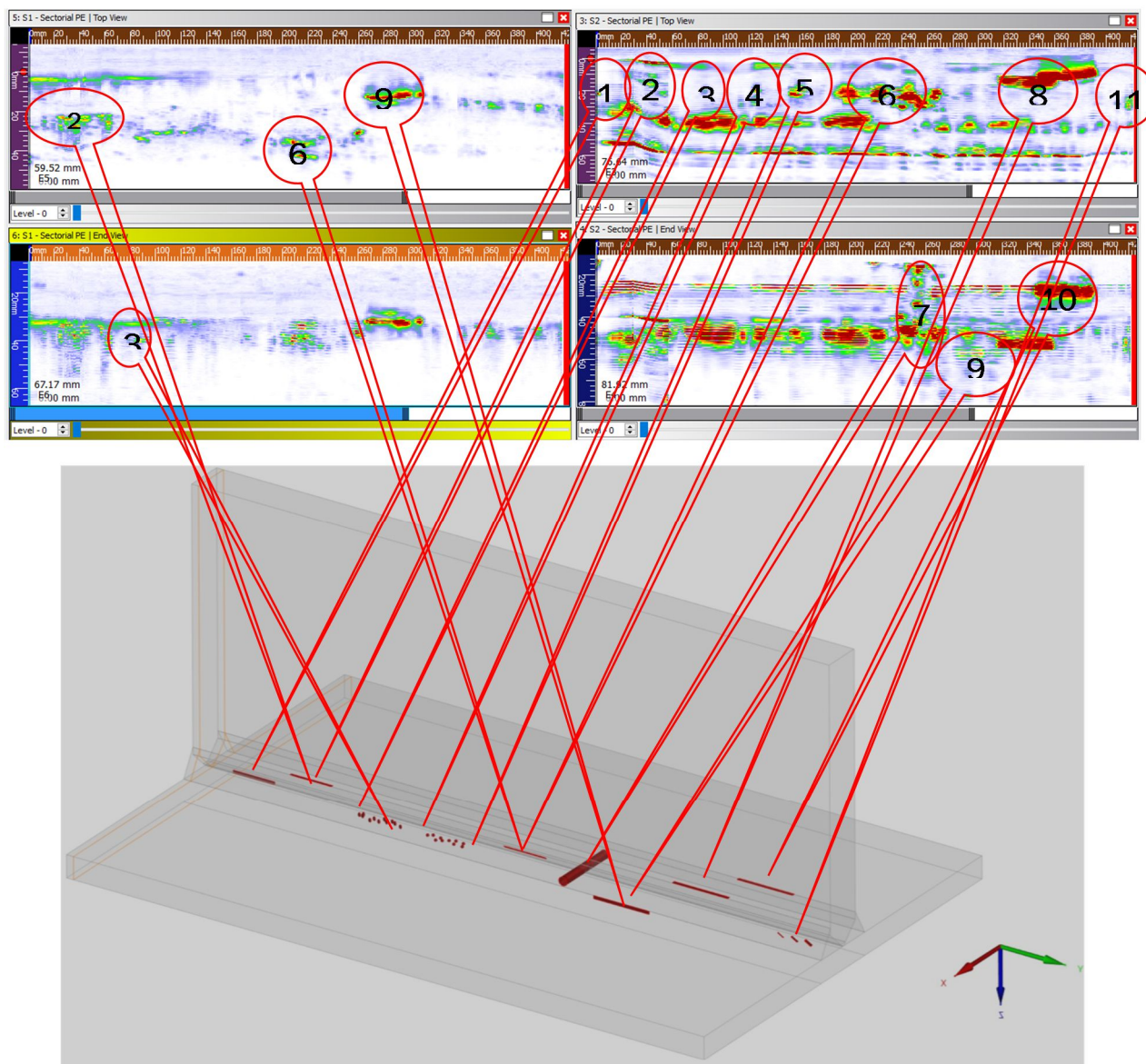


Рисунок 2 – Сопоставление результатов контроля сварного соединения с полным проваром с эскизом образца

В таблице 1 представлено сравнение результатов ультразвукового контроля с данными паспорта на образец с полным проплавлением.

Таблица 1 – Сравнение результатов УЗК с паспортом образца (секторное сканирование с окрайки и со стенки)

№	Наименование	Протяженность, мм	Глубина h, мм	Ширина, мм	Диаметр, мм	Протяженность, мм	Глубина h, мм*	Нумерация по рисунку 2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Параметры дефектов в соответствии с паспортом						Параметры дефектов по результатам выполненного неразрушающего контроля		
1	Непровар в корне шва	38,9	-	-	-	30	14	1
2	Шлаковое включение, выходящее на поверхность	45,4	1,6	2,6	-	32	От 0 до 5	2
3	Подрез	39,0	0,8	3,0	-	-	-	Скрыт геометрией
4	Шлаковое включение, выходящее на поверхность	5,7	2,5	8,1	-	9	0-8	3
5	Шлаковые включения	46,1	-	4,1	-	37	21	4
6	Поры	50,6	-	13,5	-	50	13	5
7	Несплавление	30,6	-	-	-	36	19	6
8	Имитация сквозного дефекта	-	-	-	6,1	30	0-26	7
9	Паз электроэрозионный	40,1	1,9	1,0	-	42	0	9
10	Паз электроэрозионный	40,1	1,5	1,0	-	40	15	8
11	Паз электроэрозионный	40,0	1,9	1,2	-	48	12	10
12	Наклонное сверление	-	13,5	-	0,6	3	26	(не фиксируется на поисковом уровне)
13	Наклонное сверление	-	14,8	-	1,4	4	26	11
14	Наклонное сверление	-	15,2	-	2,1	-	-	-

\* Глубина дефектов определялась в экспериментальных целях по различным алгоритмам. Контроль выполнялся со стороны окрайки и со стороны стенки

Из таблицы видно, что достоверно выявлено 11 дефектов из 14-ти, указанных в паспорте, при этом достоверно (выполнен браковочный критерий) определяется 11 дефектов из 13-ти. Вместе с тем имитаторы пор, которые часто возникают при сварке уторного сварного шва (сверления диаметром 2,1 мм; 1,4 мм и 0,6 мм), при применении рассматриваемой схемы контроля отдельно имеют выявляемость не более 0,33 (по паспорту из трёх дефектов бракуется лишь один дефект) с достоверностью не более 0,5 (бракуется один дефект из двух обнаруженных индикаций).

Результаты контроля (в секторном режиме сканирования со стенки и окрайки) сварного соединения с конструктивным непроваром, содержащего несплошности, представлены на рисунке 3.

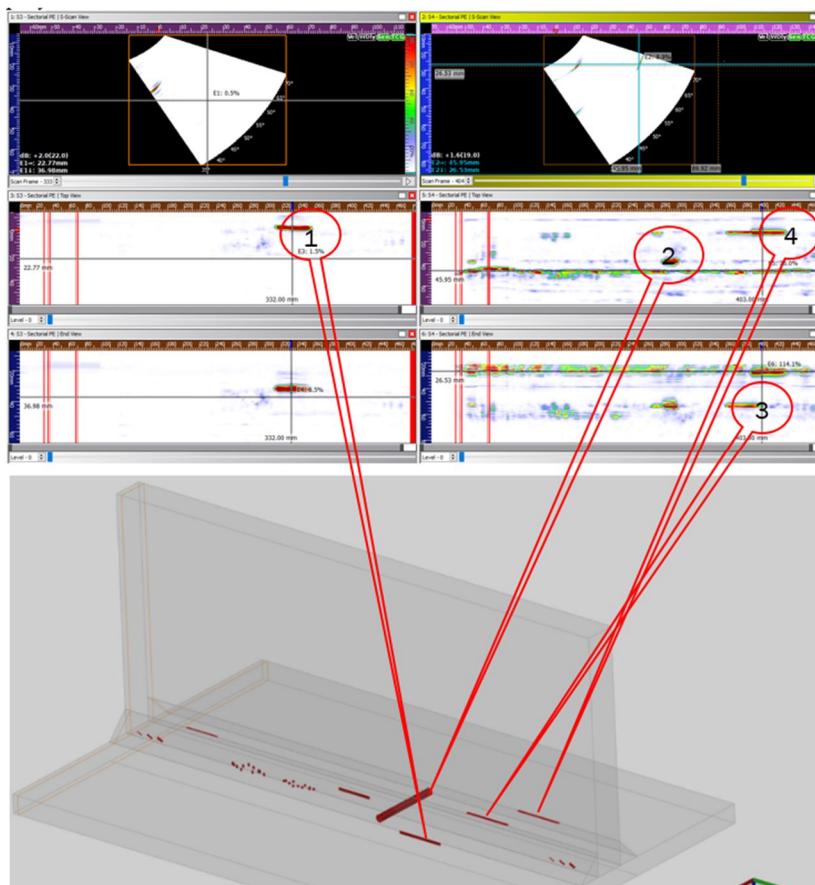


Рисунок 3 – Сопоставление результатов контроля сварного соединения с конструктивным непроваром с эскизом образца

Как видно из рисунка 3 достоверно выявлено только четыре дефекта. Наличие постоянного сигнала от края конструктивного непровара подтверждает, что значительная часть зоны контроля «затеняется», что ведет к возможной потере сигналов от дефектов.

#### Выводы

Показано, что применение конструкции уторного сварного соединения с полным проваром корневого слоя шва обеспечивает возможность применения ультразвукового метода контроля для оценки качества проведения сварочных работ, что повышает достоверность неразрушающего контроля и в целом способствует повышению надежности уторного сварного соединения.

#### Список использованных источников

1. РД-25.160.10-КТН-015-15 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Сварка при строительстве и ремонте стальных вертикальных резервуаров.
2. РД-23.020.00-КТН-018-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары стальные вертикальные для хранения нефти и нефтепродуктов объемом 1000-50000 куб.м. Нормы проектирования.
3. ГОСТ Р 58622-2019 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Методика оценки прочности, устойчивости и долговечности резервуара вертикального стального.
4. Зорин А. Е., Колесников О. И., Голосов П. С., Скорняков А. А. Оптимизация конструкции узла сопряжения днища со стенкой вертикального цилиндрического резервуара // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 5 (139), С. 129-147. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-5-129-147>.

## МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМООБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

УДК 669.245

### ТВЕРДОФАЗНАЯ СВАРКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Галиева Э.В.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

**Аннотация.** В работе на примере двух разноименных жаропрочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей интерметаллидной фазы  $\gamma''(\delta)\text{-Ni}_3\text{Nb}$  и  $\gamma'\text{-Ni}_3(\text{Al,Ti})$  соответственно, показана принципиальная возможность получения твердофазного соединения при сварке давлением в условиях низкотемпературной сверхпластичности. Эксперименты по сварке давлением были проведены в разноименном сочетании ЭК61//ЭП975. Проанализировано влияние температуры сварки на микроструктуру зоны твердофазного соединения и прочность сварных образцов.

**Введение.** Наибольшую распространенность в авиационных и ракетных двигателях получили жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) [1]. Из ЖНС изготавливают различные детали: рабочие и сопловые лопатки, диски компрессора и турбины, детали камеры сгорания и т.п.

Основными требованиями, предъявляемыми к материалам таких деталей, являются жаропрочность и стойкость против коррозии при высоких температурах. Однако увеличение жаропрочных свойств ЖНС привело к снижению пластичности и ухудшению обрабатываемости [2]. В виду того, что ЖНС являются трудно деформируемыми, для изготовления деталей целесообразно применять технологии сверхпластичности (СП). Одним из перспективных методов изготовления неразъемных соединений из ЖНС является сварка давлением в условиях СП, которая позволяет получать качественные соединения и сохранять исходные свойства свариваемых металлов [3-4].

Настоящая работа посвящена изучению влияния условий сварки давлением на формирование твердофазных соединений из деформируемых сплавов на основе никеля ЭК61 и ЭП975.

**Материал и методы исследования.** Сварку давлением в вакууме ( $2 \cdot 10^{-3}$  Па) проводили по схеме одноосного сжатия на установке фирмы Schenck Trebel, в разноименном сочетании сплавов ЭК61 и ЭП975 при температурах: 850 (пара образцов №1), 900 (пара образцов №2) и 925°C (пара образцов №3). Контактная поверхность образцов перед сваркой подвергалась полировке. Размер образцов для сварки: диаметр  $\varnothing=15,7$  мм, высота  $H=15$  мм (ЭП975) и  $H=20$  мм (ЭК61). Прочность сварных образцов оценивали по результатам механических испытаний на растяжение при комнатной и повышенной ( $T=650^\circ\text{C}$ ) температурах.

В исходном состоянии перед сваркой сплав ЭП975 имел мелкозернистую структуру, состоящую из зерен матричной  $\gamma$ -фазы размером  $8 \pm 1,5$  мкм и частиц  $\gamma'$ -фазы размером  $4 \pm 1,2$  мкм, а в теле зерен матричной  $\gamma$ -фазы выделены дисперсные частицы  $\gamma'$ -фазы [5]. Сплав ЭК61 [5,6] имел ультрамелкозернистую структуру, представляющую собой зерна матричной  $\gamma$ -фазы и частиц  $\delta$ -фазы размер, которых мене 1 мкм.

Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Mira 3LMH (TESCAN, Чехия). Распределение легирующих элементов исследовали методом энергодисперсионного анализа с использованием растрового электронного микроскопа Vega 3SBH (TESCAN, Чехия). Механические испытания на растяжения проводили на установке Instron 5982.

Результаты и обсуждение. При исследовании влияния температуры сварки давлением на формирование твердофазного соединения из разноименных никелевых сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 были выявлены следующие особенности. Установлено, что во всех случаях деформация локализуется в сплаве ЭК61 с исходной ультрамелкозернистой структурой, при этом сплав ЭП975 с микродуплексной структурой практически не деформируется.

На рисунке 1 представлена микроструктура локальных участков зоны твердофазного соединения. В зоне соединения видна четкая линия, которая является границей раздела двух сплавов. При низкой температуре указанная линия принимает криволинейный вид, а с ростом температуры ее криволинейность снижается.

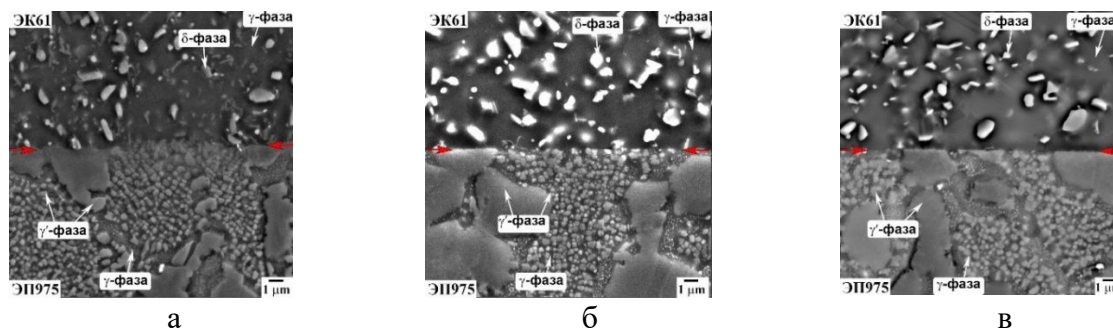


Рисунок 1 – Микроструктура зоны твердофазного соединения в сочетании сплавов ЭК61//ЭП975, после сварки давлением при различных температурах:  
а- 850°С, б - 900°С, в- 950°С

По результатам энергодисперсионного анализа установлено, что в результате сварки при высоких температурах формируется зона диффузионного взаимодействия, ширина которой с ростом температуры увеличивается в 2 раза с 10 до 20 мкм. Также изучали микроструктуру соединяемых сплавов вдали от зоны соединения (рисунок 2). По результатам исследований установлено, что микроструктура сплава ЭП975 термически стабильна, никаких микроструктурных изменений не происходит и исходная мелкозернистая структура сохраняется. В отличие от ЭП975, микроструктура сплава ЭК61 нестабильна. С ростом температуры деформации происходит частичное растворение δ-фазы, что приводит к снижению ее объемной доли с 27% до 15%, при этом размер матричной γ-фазы увеличивается в 2,5 раза.

Интересные результаты получились при оценке прочности соединения при испытаниях на растяжение. Установлено, что максимальная прочность при комнатной температуре наблюдается в образцах №1, полученных сваркой при  $T=850^{\circ}\text{C}$  и составляет 0,83 от прочности сплава ЭК61, а минимальная прочность достигается в образцах № 3, полученных при температуре  $925^{\circ}\text{C}$ . Вероятно, это связано с тем, что в сплаве ЭК61 после СД при  $T=925^{\circ}\text{C}$  вследствие частичного растворения δ-фазы, произошло разупрочнение сплава ЭК61, а также зоны соединения. В то же время максимальная прочность сварных образцов, испытанных при температуре  $650^{\circ}\text{C}$ , наблюдается в сварных образцах №3, полученных при  $T=925^{\circ}\text{C}$ . По-видимому, в процессе эксперимента при воздействии температуры в сплаве ЭК61, а также в зоне соединения, выделились упрочняющие частицы γ'-фазы, тем самым упрочнив сварной образец. Несмотря на то, что разрушение во всех случаях произошло по зоне соединения, поверхность излома свидетельствует о вязком характере разрушения.



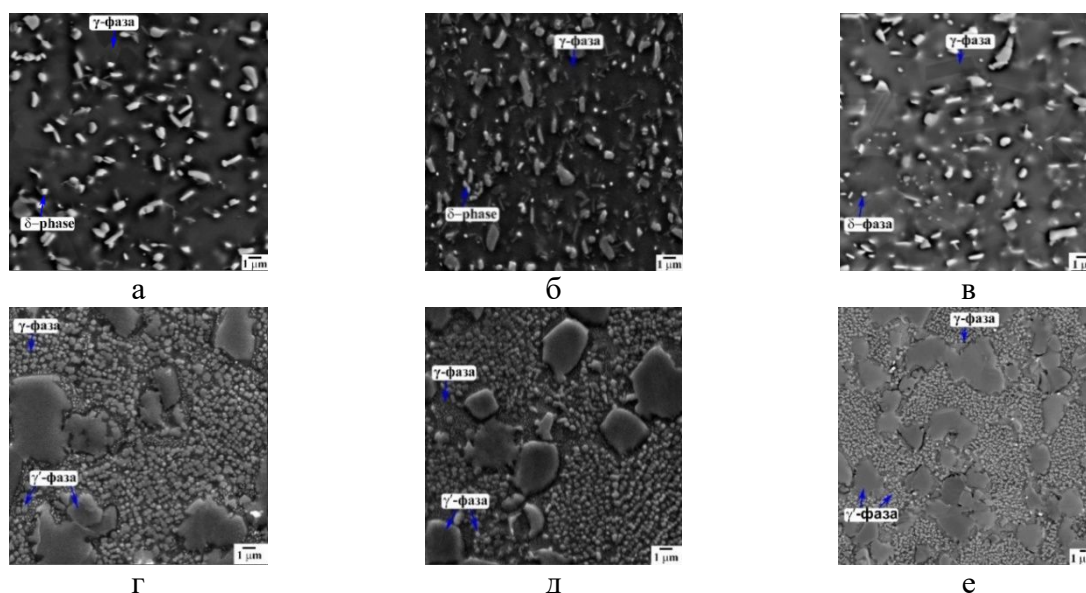


Рисунок 2 – Микроструктура сплавов ЭК61 (а-в) и ЭП975 (г-е) вдали от зоны соединения сварных образцов после сварки давлением при различных температурах: а, г – 850°C; б, д – 900°C; в, е – 950°C

**Заключение.** Показано, что сварка давлением в условиях сверхпластичности является эффективным методом для получения твердофазного соединения между деформируемыми жаропрочными никелевыми сплавами ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы.

Показано, что между сплавами, в результате взаимной диффузии элементов, формируется переходная зона диффузионного взаимодействия, шириной до 20 мкм.

Установлено, что максимальная прочность твердофазного соединения в сочетании разноименных никелевых сплавов ЭК61//ЭП975 при комнатной температуре составляет 0, 83, а при 650°C составляет 0,51 от прочности сплава ЭК61.

#### Список использованных источников.

1. Симс Ч. Т. Суперсплавы II: жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок [Текст]: в 2-х книгах. / Под ред. Ч. Т. Симса, Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля: пер. с англ. / Под ред. Р. Е. Шалина – М.: Металлургия, 1995. – 384с. – ISBN 5–87462–145–1
2. Кайбышев О.А. Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов [Текст] / О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. – М.: Наука, 2002. – 438 с. – ISBN 5–02–006431–9.
3. Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов, В.А. Валитов, Ш.Х. Мухтаров, П.А. Классман, В.В. Астанин. Наноструктурирование и твердофазная сварка труднообрабатываемых сплавов // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 295–300.
4. E.V. Galieva, R.Ya. Lutfullin, A.Kh. Akhunova, V.A. Valitov, S.V. Dmitriev. Effect of surface relief on solid phase joining of heat-resistant nickel superalloys // Science and technology of welding and joining. 2018. V. 23. № 7. P. 612–618.
5. Э. В. Галиева, А.А. Бикмухаметова, В. А. Валитов Формирование твердофазного соединения из разноименных сплавов на основе никеля ЭК61 и ЭП975 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19. №3. С. 394-401. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.012
6. E.V. Galieva, A.K. Akhunova, V.A. Valitov, E.Y. Klassman. Computer and physical modeling of multiple isothermal forging of EK61 superalloy // Letters on Materials. 2022. V. 12. №3. P. 243-248.

УДК 620.191.33

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АУСТЕНИТНОГО ВАРИАНТА СВАРКИ  
ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ**

Бадьин Ю.А.

Всероссийский научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт оборудования нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, г. Волгоград

АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», г. Волгоград

**Аннотация.** Технология сварки трубных элементов из теплоустойчивых сталей с использованием аустенитных электродов широко применялась с 1950-х гг. на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии и являлась основной при монтаже и ремонте трубопроводов и змеевиков печей из теплоустойчивых сталей. В ходе длительной эксплуатации оборудования с аустенитными сварными стыками выявилась проблема растрескивания в ходе эксплуатации. В настоящее время применение аустенитного варианта сварки ограничено случаями отсутствия технической возможности применения перлитного варианта сварки. Основной причиной этого можно считать недостаточно совершенную технологию сварки. Предлагается дальнейшее совершенствование технологии сварки на основе учета образования температурного перепада в трубах с рекомендацией по выбору электродных материалов.

**Введение.** Технология сварки трубных элементов из теплоустойчивых сталей с использованием аустенитных электродов широко применялась с 1950-х гг. на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии и являлась основной при монтаже и ремонте трубопроводов и змеевиков печей из теплоустойчивых сталей [1–2]. Исключение подогрева и термической обработки из технологии сварки послужило мощным стимулом применения аустенитного варианта сварки в сравнении с перлитным вариантом. Отечественная наука и производство имели приоритет в широком применении такого варианта сварки. Но в ходе эксплуатации оборудования с аустенитными сварными стыками выявилась проблема растрескивания.

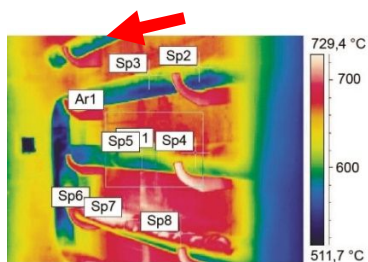
Проблемы совершенствования технологии сварки. Вопросу образования повреждений при эксплуатации аустенитных сварных соединений теплоустойчивых сталей уделялось большое внимание на протяжении значительного времени в отечественной науке. Большой объем работ по данной теме был выполнен во ВНИКТИнефтехимоборудование (г.Волгоград), ВНИИПТхимнефтеаппаратуры (г.Волгоград), ВНИИнефтемаш (г.Москва), УГНТУ (г.Уфа). Были разработаны и апробированы многочисленные усовершенствования в технологии сварки теплоустойчивых сталей по аустенитному варианту. При рассмотрении вопроса образования повреждений разнородных сварных соединений основное внимание привлекал коррозионный фактор растрескивания. В данной связи внимание фокусировалось на наличии диффузионной неоднородности сварного соединения и ее предотвращения. Также исследовалось циклическое воздействие в ходе периодических операций разогрева и охлаждения при операциях пуска и остановки. Большое внимание уделялось вопросу получения разнородных сварных соединений с высокими механическими характеристиками, с высокой несущей способностью, способностью противостоять разрушающим нагрузкам в ходе проведения механических испытаний.

В результате проведенных исследований были разработаны различные мероприятия. Для исключения диффузионной неоднородности в технологию сварки было введено применение электродных материалов с повышенной степенью легирования (АНЖР-2, АНЖР-1 и др.), введена технологическая операция наплавки кромок свариваемых деталей электродными материалами со средней и высокой степенью легирования, операция

предварительного подогрева перед сваркой, а также операция автотермообработки [1-2]. Были предложены мероприятия в виде применения сварки в среде углекислого газа и аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. Также предлагалось проведение операции «регулирования термических циклов», организация сопутствующего принудительного охлаждения в процессе сварки с целью уменьшения зоны подкалки для снижения степени механической неоднородности и повышения механических свойств сварных соединений. Рекомендовалось применение вибрационной обработки в процессе сварки, было предложено проведение сварки на действующем оборудовании под давлением рабочей среды. Названные мероприятия значительно усложнили технологию сварки, а также увеличили риски возникновения аварии в ходе сварочных работ. С применением данных мероприятий проблема растрескивания полностью не решилась или их применение затруднено. В настоящее время применение аустенитного варианта сварки теплоустойчивых сталей ограничено случаями отсутствия технической возможности применения перлитного варианта сварки [3]. Основной причиной этого можно считать недостаточно совершенную технологию сварки.

Дальнейшее совершенствование технологии сварки. В выполненных исследованиях не проводилось расчетного обоснования возникновения повреждений в виде растрескивания, в качестве механизма повреждения принимался во внимание только коррозионный фактор. Для совершенствования технологии сварки необходимо установление механизма повреждения с расчетным обоснованием возникновения повреждения с проверкой выполнения условий прочности. В настоящее время предложен механизм повреждения на основе учета фазовой неоднородности нагреваемых сред, что приводит к возникновению механического фактора повреждения разнородных сварных соединений [4-6].

Механический фактор повреждения сварных соединений. До сих пор при анализе эксплуатации сварных соединений механический фактор образования повреждений в виде растрескивания не рассматривался. При эксплуатации возможны ситуации, когда наличие паровой (газообразной) фазы оказывает воздействие на оборудование. Такая ситуация возможна, например, в случае эксплуатации трубчатых печей, оборудованных трубными экранами с горизонтальным расположением труб, а также технологических трубопроводов с протяженными горизонтальными участками. Пример образования фазового расслоения в трубах камеры радиации змеевика печи вакуумного блока установки первичной переработки нефти приведен на рисунке 1. Теплосъем на части трубы, занятой паровой (газообразной) фазой, сильно затрудняется, и она перегревается. В ходе перегрева верхней части труб возникают изгибные напряжения. Разнородное сварное соединение испытывает нагрузки изгиба, см. рисунок 2. Разнородные сварные соединения характеризуются наличием внутренних напряжений и для них нагружение изгибающими нагрузками часто является критическим, происходит растрескивание по линиям сплавления, см. рисунок 3. По аналогичному механизму могут вызываться повреждения разнородных сварных соединений технологических трубопроводов из теплоустойчивых сталей, транспортирующих рабочие среды, нагретые до высоких температур. Например, трансферные трубопроводы технологических печей, а также участки трубопроводной обвязки насосного оборудования.



(а)



(б)

Рисунок 1 – а: Результаты проведенного тепловизионного контроля змеевика, стрелкой показано наличие фазового расслоения продукта с образованием линии раздела фаз для трубы змеевика, разница температуры составляет до 100 °С; б: Вырезанный образец; перегрев верхней части трубы, соответствующей объему, занятому паровой фазой, определяется по наличию слоя окалины, видно расположение линии раздела фаз, показано стрелкой

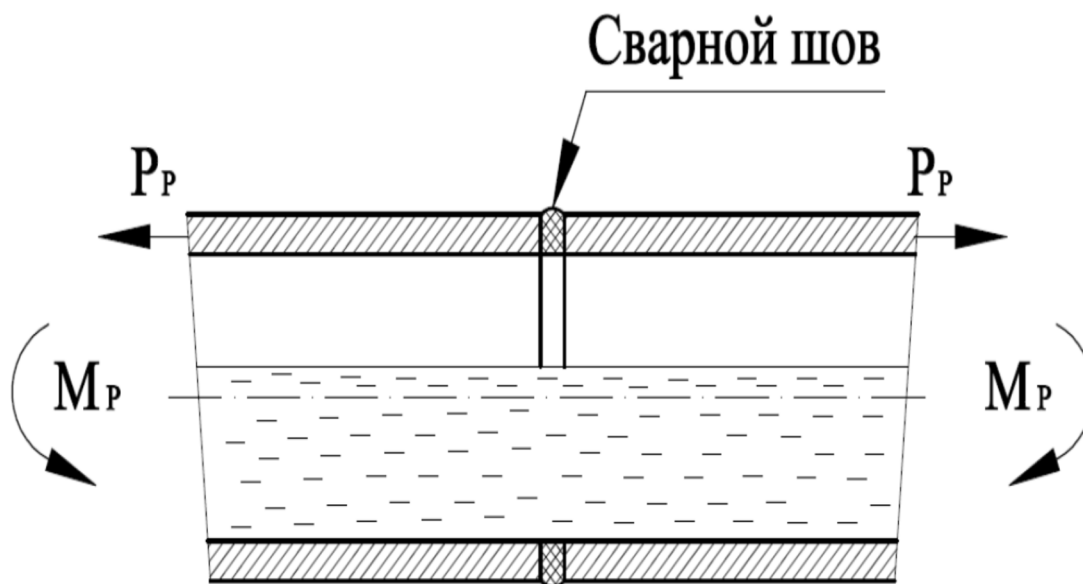


Рисунок 2 – Образование внутренних усилий в трубе от температурного перепада между верхней и нижней частями (продольное сечение)

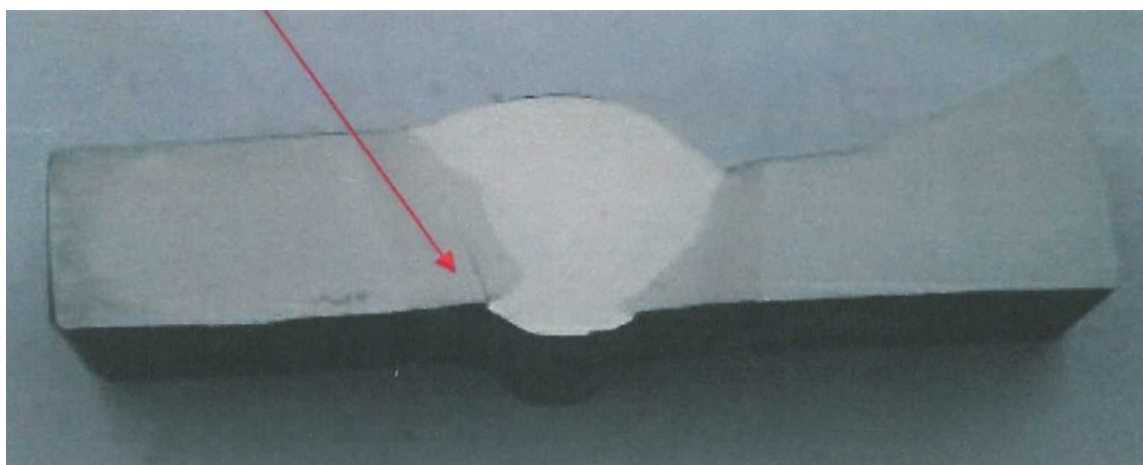


Рисунок 3 – Поперечное сечение аустенитного сварного шва с повреждением в виде растрескивания (показано стрелкой)

Учет внутренних напряжений в разнородных сварных соединениях. Разнородные сварные соединения характеризуются наличием внутренних напряжений вследствие разности коэффициентов линейного расширения основного металла и металла сварных швов. До настоящего времени не проводятся численные оценки таких внутренних напряжений. В [4-6] предложен подход к оценке величины касательных (сдвиговых) напряжений разнородных сварных соединений на основе оценки общего уровня напряжений сжатия в материале сварного шва от стесненности температурной деформации с момента сварки в процессе охлаждения до выбранной температуры. Данный подход представляется отражающим физическую картину в процессе сварки с момента застывания жидкого металла и охлаждения с физическим явлением образования «холодных трещин». Оценка внутренних напряжений в материале сварного шва от стесненности температурной деформации с момента сварки в процессе охлаждения до выбранной температуры проводится по формуле:

$$\sigma^t = \sum_{i=1}^n (\alpha_i^c \cdot E_i^c - \alpha_i^o \cdot E_i^o)$$

$n$  – число интервалов разбиения;

$t$  – расчетная температура, температура до которой производится охлаждение сварного соединения после сварки, °С;

$\alpha_i^c, \alpha_i^o$  – коэффициенты температурного линейного расширения металла шва и основного металла для  $i$ -го температурного интервала;

$E_i^c, E_i^o$  – модули продольной упругости металла сварного шва и основного материала для  $i$ -го температурного интервала.

Величина касательных напряжений, действующих по линиям сплавления сварных швов, при расчетной температуре  $t$  определится по формуле:

$$\tau^t = \sigma^t \cdot k, \text{ где}$$

$k$  – расчетный коэффициент учета фактической геометрии сварного соединения (угла наклона линий сплавления, относительного количества наплавленного металла и др.).

Пример результатов расчетов показан на рисунке 4. Применение электродных материалов с малой и средней степенью легирования никелем приводит к возникновению значительных внутренних напряжений.

На основе предложенного подхода с учетом механического фактора возникновения растрескивания была разработана методика уточненного расчета на прочность разнородных сварных соединений и предложены мероприятия по предотвращению повреждений с расчетным обоснованием на основе проверки условий прочности [4-6].

Повышение работоспособности разнородных сварных соединений. Основная рекомендация состоит в расширении применения сварочных материалов с высоким содержанием никеля. Коэффициенты линейного расширения сплавов на основе никеля и теплоустойчивых сталей (15X5M, 1X2M1 и др.) имеют близкие значения, это позволяет снизить внутренние напряжения в сварном соединении. В существующих отсутствуют прямые указания по применению высоконикелевых электродных материалов. Например, согласно [1-3, 7] для применения допускаются электродные материалы с различной степенью легирования никелем, например, ОЗЛ-6 с содержанием никеля 13% масс. Говорится, что «для сварки разнородных соединений, включающих теплоустойчивые стали и эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание, допускается применять аустенитные сварочные материалы, содержащие не менее 40 % никеля». Для обеспечения работоспособности разнородных сварных соединений необходимо указание применения исключительно высоконикелевых электродных материалов. Согласно [1-3] электроды с более высоким содержанием никеля могут применяться во всех случаях, где рекомендованы электроды с меньшим содержанием этого элемента. В качестве основных вариантов сварки установлено применение электродных материалов с повышенным

содержанием никеля. К сожалению, существующие нормативно-технические документы по проведению сварки не содержат однозначных указаний на необходимость применения высоконикелевых электродных материалов. Допускаются к применению материалы с малым и средним легированием никелем. В результате на практике применяются именно эти более дешевые и доступные материалы, что приводит к случаям растрескивания в ходе эксплуатации и негативно влияет на оценку применимости аустенитного варианта сварки теплоустойчивых сталей. Необходима коррекция нормативно-технических документов в части указания применения преимущественно высоконикелевых электродных материалов [6].

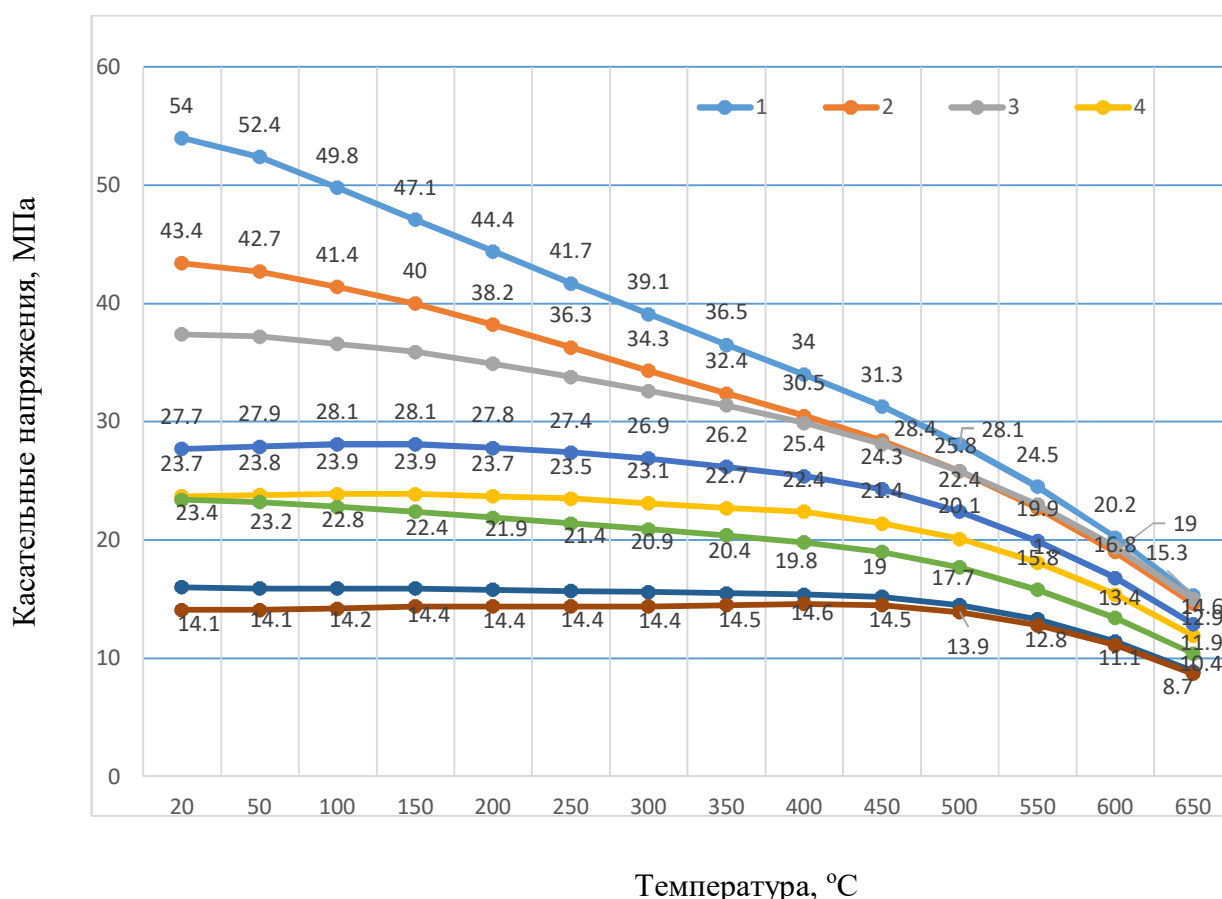


Рисунок 4 – Результаты расчета внутренних касательных напряжений в разнородных сварных соединениях для стали 15Х5М с различным материальным исполнением металла шва (марок электродных материалов) в зависимости от температуры;  
 1 – ОЗЛ-6; 2 – АНЖР-2; 3 – АНЖР-1; 4 – ХН70; 5, 6 - ХН75МБТЮ; 7, 8 – ХН78Т;

Результат применения рекомендаций. На основе результатов проведенных исследований была разработана инструкция по оперативному ремонту реакторов замедленного коксования (коксовых камер), изготовленных из хромомолибденовых сталей (12ХМ и др.). Планируется дальнейшая разработка изменений в нормативно-технические документы по проведению сварки трубопроводов и змеевиков в части рекомендаций по применению электродных материалов. В разработанной инструкции [8] отражены изменения в технологии сварки теплоустойчивых сталей по аустенитному варианту. Для предотвращения растрескиваний указывается применение исключительно высоконикелевых электродных материалов с содержанием никеля не менее 60% масс. Практика показала возможность обеспечения высокой работоспособности коксовых камер в условиях интенсивного растрескивания сварных соединений. Применение описанной технологии ремонта позволило исключить образование «холодных трещин» при

проведении ремонтной сварки в условиях низких зимних температур. С 2020 г. проходит успешная эксплуатация реакторов замедленного коксования на одном из нефтеперерабатывающих предприятий, число рабочих циклов каждого из 4-х реакторов превысило 400. Выявляемые растрескивания сварных соединений подвергаются ремонту по аустенитному варианту. Это показывает возможность применения аустенитного варианта сварки для оборудования из сталей, склонных к подкалке, эксплуатируемого в условиях высокотемпературного циклического нагружения.

#### **Список использованных источников.**

1. Технологическая инструкция по сварке трубопроводов и печных змеевиков из теплоустойчивых хромомолибденовых сталей без термической обработки сварных соединений при изготовлении, монтаже и ремонте нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок. Волгоград: Metallurgy, 1981. 28 с.

2. РД 38.13.004-86. Эксплуатация и ремонт технологических трубопроводов под давлением до 10,0 МПа (100 кгс/см). М.: Химия, 1988. 288 с.

1. СТО 38.17.003-2009. Сварка технологических трубопроводов и печных змеевиков при ремонте и реконструкции нефтеперерабатывающих и нефтехимических установок. Волгоград: ВНИКТИнефтехимоборудование, 2009. 208 с.

2. Бадьин Ю.А. Исследование причин повреждения аустенитных сварных соединений змеевиков нефтезаводского оборудования. // Нефтегазовое дело. 2021. №5. С.170-182. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-5-170-182.

3. Бадьин Ю.А. Повреждение аустенитных сварных соединений трубопроводов вследствие фазового расслоения нагретой среды. // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19, №6. С.151-164. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-6-151-164.

4. Бадьин Ю.А. Предотвращение растрескивания аустенитных сварных соединений трубопроводов из теплоустойчивых сталей. // Нефтегазовое дело. 2022. Т.20, №2. С.155-166. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-2-155-166.

5. ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры». Стандарт организации. Сварка разнородных соединений сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых, низколегированных, теплоустойчивых, высоколегированных сталей и сплавов на железоникелевой и никелевой основах. СТО 00220368-011-2007. Волгоград.

6. Технологическая инструкция ремонта трещин в основном металле и металле сварных соединений корпусов реакторов установок замедленного коксования аустенитными сварочными материалами. АО «ВНИКТИнефтехимоборудование». - Волгоград. 2020.

УДК 621.791.4:669.295

**СВЕРХПЛАСТИЧНОСТЬ И ТВЕРДОФАЗНАЯ СВАРИВАЕМОСТЬ  
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**Лутфуллин Р.Я.<sup>1,2</sup>, Файрушин А.М.<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Классическая диффузионная сварка, осуществляется при температуре, близкой к  $0,8T_{пл}$  сплава под действием напряжений ниже напряжения течения без макропластической деформации. Это обстоятельство может приводить к невозможности гарантированного качества твердофазного соединения (ТФС). Кардинальное решение проблемы обеспечения высокого качества ТФС достижимо при использовании эффекта структурной сверхпластичности (СП). Представлен обзор экспериментальных результатов по влиянию СП на твердофазную свариваемость. На сегодняшний день твердо установлена определяющая роль сверхпластической деформации в достижении требуемого качества сварки при температурах  $0,6 - 0,4$  от  $T_{пл}$ . При этом, влияние низкотемпературной СП на твердофазную свариваемость при пониженных температурах вызывает научно-практический интерес у исследователей и инженеров, оставаясь актуальной научно-технической задачей.

**Введение.** Твердофазная сварка кристаллических материалов в состоянии сверхпластичности (СП) – инновационный технологический метод обработки, основанный на использовании эффекта структурной СП [1]. Физическая основа этого метода – сверхпластическая деформация [1,2].

Впервые, влияние СП на возможность повышения технологичности сварки в твердом состоянии труднообрабатываемых титановых сплавов обнаружили и опубликовали советские исследователи [3] в 1975 году. Авторы [3] показали существенное (в 4 раза) снижение необходимого сварочного усилия и сокращение (6...30 раз) длительности процесса по сравнению с традиционной сваркой давлением.

Необходимо отметить, что классическая диффузионная сварка [4], по сути являющаяся разновидностью сварки давлением [5], проводится при температурах, близких к  $0,8$  от температуры плавления свариваемых сплавов при ограниченной пластической деформации. В этой связи, на практике, процесс диффузионной сварки сверхпластичных сплавов реализует начальную стадию сверхпластического течения. Следовательно, понимание механизма влияния структурной СП на кинетику формирования твердофазного соединения (ТФС) может быть полезным для расширения технологических возможностей, например, температурного интервала свариваемости кристаллических материалов при сварке давлением.

Целью данной статьи является краткий обзор исследований, связанных с влиянием структурной СП на твердофазную свариваемость кристаллических материалов и поиск перспектив дальнейшего использования СП в инновационных технологиях твердофазной сварки кристаллических материалов.

**Материал и методики эксперимента**

В качестве объектов исследования были рассмотрены мелкозернистые и ультрамелкозернистые (УМЗ) материалы, относящиеся к различным классам и проявляющие в определенных температурно-скоростных условиях сверхпластическое течение, в частности, титановые, алюминиевые, никелевые сплавы, стали, интерметаллиды и керамика.

Основной метод исследования – физическое моделирование процесса твердофазной сварки давлением.



Исследования микроструктуры сварных образцов проводили с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов.

Механические испытания осуществляли по известным и стандартным методикам.

Результаты и обсуждение.

Влияние скорости деформации на твердофазную свариваемость

Наиболее удобными объектами для исследования твердофазной свариваемости служат двухфазные титановые сплавы, проявляющие «природную» СП и в которых возможно относительно легко получить широкий спектр структур от крупнозернистых до УМЗ, включая нанокристаллические [1].

Рассмотрим известные [6] зависимости сдвиговой прочности твердофазного соединения в мелкозернистых (тип А) и крупнозернистых образцах (тип Б) сплава ВТ14 от времени (t) деформации, которые представлены на рисунке. 1.

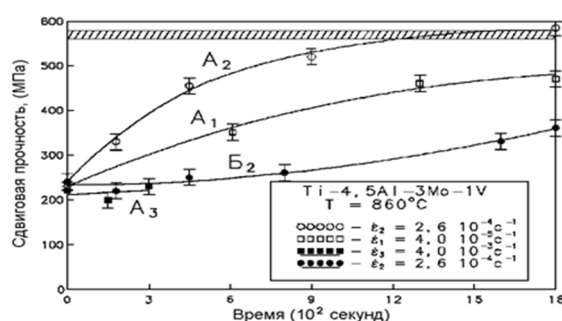


Рисунок 1 – Зависимость прочности ТФС  $\tau_{ср}$  от времени деформации образцов А (микроструктурная структура) и Б (крупнозернистая пластинчатая структура) типа из сплава ВТ14 при  $T = 860 \text{ }^\circ\text{C}$ .  $A_1$  (□) -  $\xi = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ;  $A_2$  (○) -  $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ;  $B_2$  (●) -  $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ ;  $A_3$  (■) -  $\xi = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ .

Для формирующегося твердофазного соединения в образцах А типа наиболее сильная зависимость прочности сдвиговой прочности от времени характерна для деформации, близкой к оптимальной со скоростью  $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ , соответствующая II (оптимальной) области СП [2] (кривая  $A_2$ ). Деформация образцов в III (высокая скорость) области СП (кривая  $A_3$ ) не приводит к существенному изменению прочности ТФС. Кривая  $A_1$ , отражающая зависимость прочности среза от времени при деформации образцов в I области (ползучесть) СП, занимает промежуточное положение между кривыми  $A_2$  и  $A_3$ . В образцах типа Б, деформированных со скоростью деформации  $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$  (имитация условий традиционной горячей деформации) прочность ТФС на начальной стадии деформации изменяется слабо и только после 300 секунд, что соответствует деформации  $\epsilon = 5 \dots 10\%$ , наблюдается тенденция к ее росту (кривая  $B_2$ ).

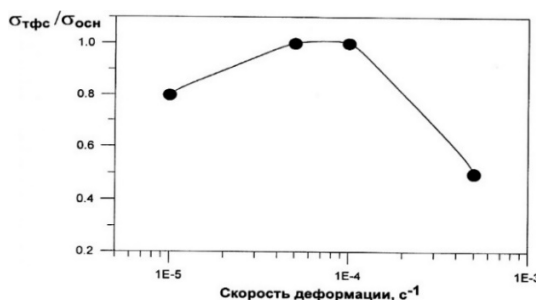


Рисунок 2 – Изменение отношения  $\sigma_{тфс} / \sigma_{осн}$  для  $V_2O_5$  керамики в зависимости от скорости деформации при температуре сварки  $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$  и степени деформации  $\epsilon = 15\%$ .

Результаты структурных изменений (изменение пористости и площади схватывания) коррелируют с эволюцией механических свойств. Аналогичные результаты по влиянию

скорости деформации были получены и при твердофазном соединении модельной мелкозернистой керамики  $Vi_2O_3$  (рисунке 2). Видно, что свойства основного материала достигаются при осуществлении деформации в условиях, соответствующих оптимуму СП

Влияние степени деформации на твердофазную свариваемость.

Положительное влияние степени сверхпластической деформации на качество ТФС показано на примере сварки большого количества кристаллических материалов – алюминиевых сплавов, титановых сплавов, сталей, жаропрочных никелевых сплавов, интерметаллидов и керамики [7]. Особенности твердофазной сварки в условиях сверхпластической деформации является незначительное снижение прочности получаемого соединения при росте пластичности сваренных образцов и ударной вязкости, обусловленное ростом зерен [7]. Эта особенность особенно наглядно проявляется при переходе к УМЗ материалам [1]. На примере титановых сплавов установлена необходимость существенно меньшей степени деформации при сварке УМЗ образцов для достижения равнопрочного соединения [7].

Влияние отжига на залечивание пор в сварных соединениях.

Отжиг активизирует диффузионные процессы в пределах зоны твердофазного соединения и его роль неоднозначная по формированию механических свойств. Для титановых сплавов отжиг практически не влияет на уменьшение размеров пор, сопоставимых или больше среднего размера зерен [7], в жаропрочных никелевых сплавах возможно проявление эффекта Киркендала, но самым неблагоприятным фактором может служить выделения вторичных интерметаллидных фаз по границе твердофазного соединения, например, при сварке разнородных сплавов [5].

Универсальность влияния сверхпластичности на твердофазную свариваемость.

Повышение качества ТФС при сварке давлением в режиме проявления сверхпластической деформации отмечено для большинства кристаллических материалов, включая металлические сплавы, интерметаллиды и керамику [7]. Наиболее ярко воздействие СП на твердофазную свариваемость выявлено при сварке двухфазных титановых сплавов, которые склонны к проявлению «природной СП» [5-7] при хорошей растворимости оксидной пленки в процессе нагрева в вакууме. Сложнее обстоят дела с твердофазной сваркой алюминиевых сплавов. Для разрушения прочной поверхностной оксидной пленки алюминиевых сплавов, обычно требуется значительная деформация [7].

Влияние размера зерен на твердофазную свариваемость.

Результаты механических испытаний твердофазного соединения на сдвиговую прочность в зависимости от температуры сварки и исходного структурного состояния титанового сплава ВТ14 с исходной мелкозернистой (1,5 мкм) и крупнозернистой (300 мкм) структурой представлены на Рис. 1. Условия твердофазной сварки отличались лишь по температуре, сварочное давление было постоянным и составляло 2,0 МПа, длительность сварки также была постоянной и равнялась  $3,6 \times 10^2$  секунд. Результаты механических испытаний наглядно иллюстрируют, что наиболее качественное соединение достигается в температурных условиях, близких к оптимальному проявлению сверхпластичности. При уменьшении среднего размера зерен от более 300 мкм до 1,5 мкм фиксируемая температура схватываемости сплава ВТ14 понижается примерно на  $120^\circ C$ , достигая нижнего температурного значения  $T = 700^\circ C$ . Как известно [1,4,5], при температуре  $700^\circ C$  диффузионные процессы в титановых сплавах существенно подавлены и наблюдаемый эффект схватывания вероятнее всего определяется особенностями механизма деформации микрокристаллических материалов, важную роль в котором играет зернограничное проскальзывание [1,2,6,7]. Действительно, как показали результаты фрактографических исследований излома ТФС, первичные очаги схватывания наблюдаются по локальным группам зерен, вероятно, участвующих в зернограничном проскальзывании. При этом, резкая активизация диффузии по границам зерен при развитии ЗГП [1,2,6,7], по всей видимости, обеспечивает эффективную локальную «очистку» поверхности соединяемого

сплава до ювенильного состояния, в которых и наблюдаются первичные очаги схватывания [7]. Таким образом, при уменьшении размера зерен и обеспечения условий развития в материале ЗГП, возможно ожидать определенного понижения температуры схватывания. В этой связи представляется интересным рассмотрение результатов экспериментов по твердофазной сварке УМЗ материалов в условиях проявления низкотемпературной СП.

Серьезной научно-технической проблемой в авиационном машиностроении является твердофазная сварка жаропрочных никелевых сплавов, широко применяемых в турбореактивных двигателях гражданского назначения, включая ракетные двигатели [1]. Эта проблема, в первую очередь, определяется высокой температурой сварки и вытекающими из нее технологическими трудностями. Однако перевод жаропрочных никелевых сплавов Инконель 718 и его отечественного аналога сплава ЭК61 в сверхпластичное состояние с исходным средним размером зерен  $\sim 0,5$  мкм позволил успешно осуществить твердофазную сварку цилиндрических образцов при пониженных температурах, начиная с  $T = 850$  °С [7].

Уменьшение зерен до УМЗ состояния в интерметаллиде TiAl приводит к проявлению в нем признаков низкотемпературной СП и позволяет успешно, уже при относительно низкой температуре 850 °С, сваркой давлением соединить в твердом состоянии цилиндрические образцы [7].

Опубликованные экспериментальные результаты успешной твердофазной сварки [1,5,6,7] прямо подтверждают выдвинутое ранее предположение об универсальном характере влияния СП на свариваемость в твердом состоянии однородных сверхпластичных материалов. В этой связи, на основе вышеизложенного и, принимая во внимание единую природу СП течения в металлах, интерметаллидах и керамике [1,5,6,7], представляется справедливым утверждение о единой и, преимущественно деформационной, природе механизма формирования твердофазного соединения для любых кристаллических материалов, соединяемых в СП состоянии.

Выводы.

1. Влияние сверхпластичности на твердофазную свариваемость кристаллических материалов носит универсальный характер и приводит к повышению качества сварки с увеличением степени деформации.

2. Перспективным представляется использование эффекта низкотемпературной сверхпластичности в технологиях твердофазной сварки при пониженных температурах ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов.

#### **Список использованных источников.**

1. Мулюков Р.Р. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии / Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. – М.: Наука, 2014. 284с.
2. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.
3. Шоршоров М.Х., Дзnelадзе Э.М., Тихонов А.С. и др. // Сварочное производство. 1975. №11. С. 20–21.
4. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М.: Машиностроение, 1968. 331 с.
5. Каракозов Э.С. Сварка давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
6. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya. and Berdin V.K. The effect of superplasticity on the solid state weldability of the titanium alloy Ti-4,5Al-3Mo-1V // Acta Metall. Mater. 1994. Vol.42. No.8. P. 2609–2615.
7. Lutfullin R.Ya. Superplasticity and solid-state bonding of materials. Chapter 4.3. in Severe Plastic Deformation. Towards Bulk Production of Nanostructured materials. Ed. Burnhanrttin S. Altan. Nova Science Publishers. New York, 2006. P. 381–398.

УДК 621.791.14

**СВАРКА ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ТРУБ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 6063: ТЕРМООБРАБОТКА**Имаев М.Ф.<sup>1,2</sup>, Кабирова Д.Б.<sup>1</sup>, Хайретдинов Н.Ф.<sup>1</sup>, Фаттахов Д.З.<sup>1,3</sup>, Фазлыяхметов Р.Ф.<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа<sup>3</sup>Башкирский государственный университет, г. Уфа

**Аннотация.** Исследовали влияние термомеханической обработки, заключающейся в последовательном проведении закалки твердого раствора, сварки трением с перемешиванием и искусственного старения на микротвердость и микроструктуру труб диаметром 156 мм и толщиной 3 мм из алюминиевого сплава 6063. Установлено, что такая обработка обеспечивает достижение высокой и однородно распределенной микротвердости, а также отсутствие аномального роста зерен в зоне соединения.

**Введение.** Алюминиевые сплавы 6XXX серии являются термоупрочняемыми, обладают высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью, поэтому широко используются в транспорте и строительстве, авиационной и транспортной промышленности. В последнее десятилетие для соединения деталей сплавов этой серии широко используют сварку трением с перемешиванием (СТП). Выгода от применения СТП связана с тем, что это экологически чистый процесс, не сопровождающийся выделением газов, протекает в твердофазном состоянии без плавления и искажения формы материала. Однако многочисленные исследования показали, что механические свойства этих сплавов в зоне СТП часто распределены неравномерно. В частности, после СТП наблюдается пониженный уровень твердости в зоне термического воздействия [1-3].

Старение после СТП, как правило, приводит к повышению твердости только в зоне перемешивания, но не сопровождается таким же увеличением твердости в зоне термического воздействия [1-5]. Данный факт объясняется следующим образом [2, 3]. СТП вызывает сильный разогрев и интенсивное перемешивание материала, что приводит к растворению упрочняющих частиц. Последующее старение после СТП сопровождается выделением частиц упрочняющих фаз и повышением микротвердости. Однако в зоне термического воздействия микротвердость растет незначительно, и наблюдаются минимумы, как на стороне набегания, так и на стороне отхода. Низкий уровень микротвердости в зоне термического воздействия вызван тем, что при СТП разогрев материала в этой области недостаточен для полного растворения упрочняющих частиц. При последующем старении количество выделившихся упрочняющих мелких частиц незначительно, а сохранившиеся после СТП частицы при старении теряют когерентность с матрицей и укрупняются. По этой причине микротвердость в зоне термического воздействия после старения не достигает микротвердости основного материала. В работе [3] провели более сложную термообработку. После СТП провели закалку твердого раствора и искусственное старение. Благодаря этому удалось выровнять микротвердость по образцу, однако в зоне перемешивания произошел аномальный рост зерен. Очевидно, что для того, чтобы получить высокую и равномерно распределенную микротвердость и при этом избежать аномального роста зерен необходимо после СТП исключить закалку твердого раствора, ограничившись только отжигом на старение.

Целью данной работы было исследовать влияние последовательно выполненных закалки твердого раствора, СТП и искусственного старения на распределение микротвердости и микроструктуру соединений труб из алюминиевого сплава 6063, полученных методом сварки трением с перемешиванием.

**Методика эксперимента.** В качестве объекта исследования были выбраны трубы диаметром 156 мм и толщиной 3 мм из алюминиевого сплава 6063. Состав сплава по EN573-

З (масс.%): 0,45-0,9%Mg, 0,2-0,6%Si, 0,35%Fe, 0,1%Cu, 0,1%Mn, 0,1%Ti, 0,1%Zn, прочие элементы 0,15%, 97,5-98,35%Al. До проведения СТП небольшие отрезки труб подвергли отжигу на твердый раствор при температуре 570°C, 10 мин и закалке в воду. Далее с помощью специальной оснастки трубы были соединены методом СТП (рисунок 1). Конструкция инструмента для СТП описана в работе [6]. Скорость сварки составляла  $v = 30$  мм/мин, частота вращения инструмента  $\omega = 1000$  об/мин, давление сварки 10 МПа. После проведения СТП соединения труб были подвергнуты искусственному старению при температуре 170°C, 14 ч.

Образцы для исследования микроструктуры и измерения микротвердости вырезали на электроэрозионном проволочно-вырезном станке перпендикулярно направлению сварки. Микротвердость определяли по методу Виккерса на цифровом микротвердомере МВТ-71У4.2 при нагрузке 0,5 Н и длительности ее приложения 10 с. Микротвердость измеряли с шагом в 1 мм вдоль линии, расположенной на расстоянии около 1 мм от поверхности контакта трубы с инструментом. Микроструктуру исследовали на световом микроскопе «Axiovert-100A» и растровом электронном микроскопе TESCAN MIRA 3, снабженном приставкой для исследования дифракции обратно-отраженных электронов (EBSD).

#### Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 представлен внешний вид труб после соединения методом СТП. Соединение качественное, как снаружи, так и изнутри. На рисунке 1 а видно место окончания сварки. Примененный в данной работе инструмент с перемещаемым относительно заплечика наконечником позволяет герметично закрыть место выхода наконечника из зоны сварки.

На рисунке 2 представлены распределения микротвердости в зоне соединений, полученных непосредственно после СТП (режим 1) и после последовательно выполненных закалки на твердый раствор, СТП и старения (режим 2). В соединении, выполненном по режиму 1, микротвердость в зоне перемешивания уменьшилась до 50-55 НV. В соединении, полученном по режиму 2, напротив, микротвердость высокая (80-93 НV) во всех зонах СТП. Отсутствие провалов микротвердости в зоне термического воздействия объясняется тем, что закалка твердого раствора перед СТП позволила растворить частицы, а последующая СТП не привела к выделению упрочняющих частиц. Поэтому старение после СТП не привело к формированию минимумов в зоне термического воздействия. Таким образом, термомеханическая обработка, заключающаяся в последовательном выполнении закалки твердого раствора, СТП и искусственного старения дает высокую и равномерно распределенную микротвердость в интервале 80-93 НV.

Исследование макроструктуры показало, что после проведения старения в зоне соединения отсутствует аномальный рост зерен (рисунке 3). Это подтверждает и исследование микроструктуры в обратно-отраженных электронах. Средний размер зерен в зоне перемешивания находится в интервале 10-20 мкм (рисунке 4).



Рисунок 1 – Соединение труб из алюминиевого сплава 6063 размером  $\varnothing 156/3$  мм методом СТП: (а) вид снаружи; (б) вид изнутри.

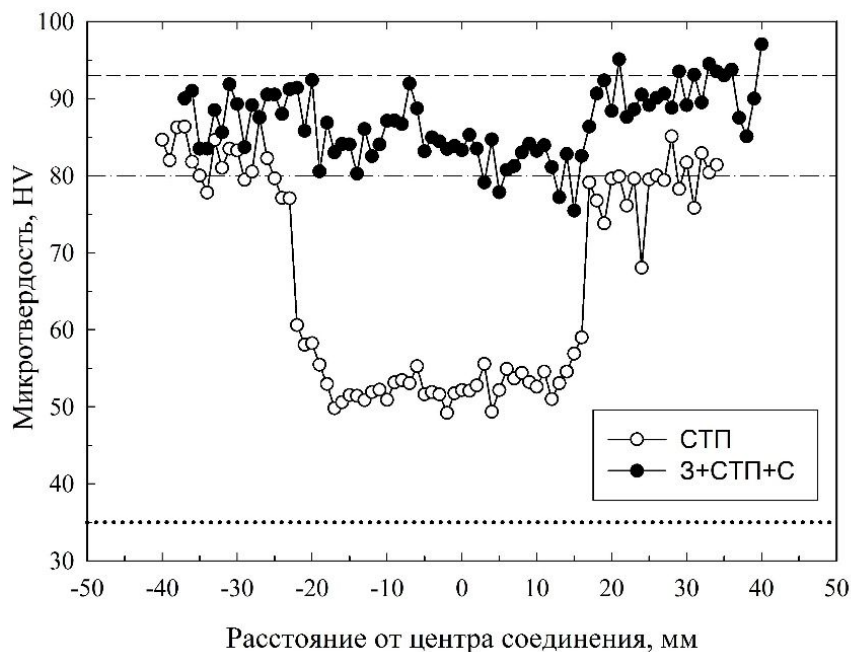


Рисунок 2 – Распределение микротвердости в зоне соединения. Положительная сторона – сторона набегания, отрицательная – сторона отхода. Микротвердость в состоянии поставки 80 HV (штрихпунктирная линия), микротвердость после закалки 35 HV (штриховая линия), микротвердость после закалки и старения 93 HV (пунктирная линия).

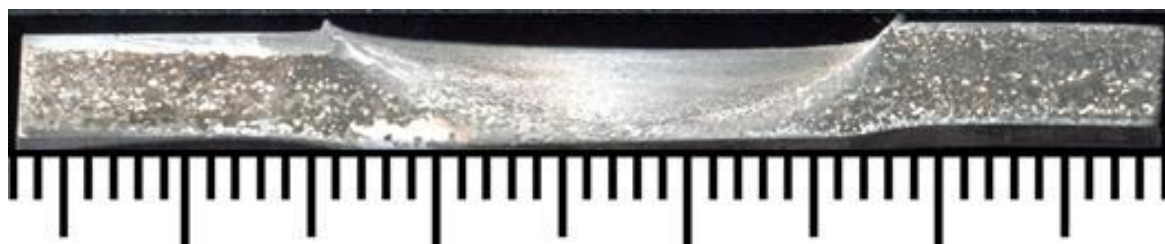


Рисунок 3 – Макроструктура зоны соединения после обработки по режиму 2.

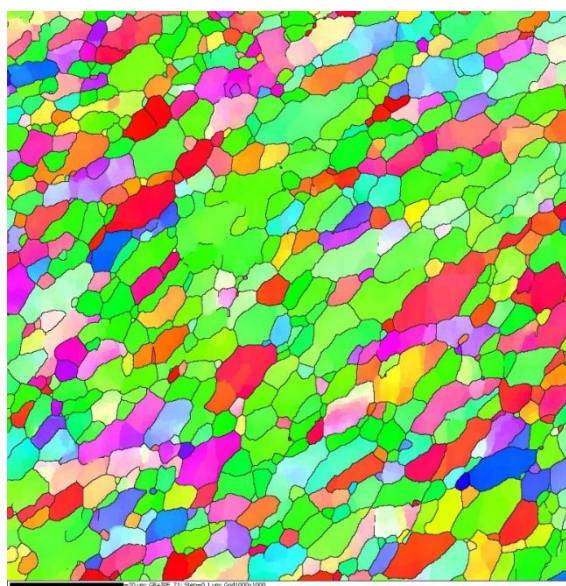


Рисунок 4 – Микроструктура зоны перемешивания после обработки по режиму 2. Маркер=20 мкм.

### Выводы

1. Проведено соединение алюминиевых труб диаметром 156 мм и толщиной 3 мм методом сварки трением с перемешиванием.

2. Разработан новый режим термомеханической обработки (закалка твердого раствора + сварка трением с перемешиванием + искусственное старение), позволяющий обеспечить высокую и однородно распределенную микротвердость в зоне соединения на уровне микротвердости основного материала, а также избежать аномального роста зерен.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в соответствии с Государственным заданием ИПСМ РАН (№ АААА-А19-119021390106-1). Работа выполнена на базе Центра коллективного обслуживания «Структурные и физико-механические исследования материалов» Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

### Список использованных источников.

1. G. Liu, L.E. Murr, C-S. Niou, J.C. McClure, F.R. Vega. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum // Scripta Materialia, 1997, v. 37, no. 3, p. 355-361.

2. Yutaka S. Sato, Hiroyuki Kokawa, Masatoshi Enomoto, Shigetoshi Jogan, Takenori Hashimoto. Precipitation sequence in friction stir weld of 6063 aluminum during aging // Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, v. 30a, p. 3125-3130 <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0223-5>.

3. Tao Wang, Yong Zoua, Kenji Matsuda. Microstructure and microtextural studies of friction stir welded AA6061-T6 subjected to different rotation speeds // Materials and Design 2016, v. 90, p. 13–21 <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.100>.

4. Ehab A. El-Danaf, Magdy M. El-Rayes. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 AA in as welded and post weld heat treated conditions // Materials and Design 2013, v.46, p. 561–572 <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.047>.

5. Валеева А. Х., Ахунова А. Х., Кабирова Д. Б., Имаев М. Ф., Фазлыяхметов Р. Ф. Влияние длины наконечника инструмента на упрочнение алюминиевого сплава Д16 при обработке трением с перемешиванием // Letters on Materials 2021, v.11 (2), pp. 119-124 <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-2-119-124>.

УДК 539.374.1

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ ЯЧЕИСТЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ  
ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Сафиуллин Р.В.

Институт проблем сверхпластичности металлов, г. Уфа

**Аннотация.** В работе описаны результаты многолетних исследований по разработке технологии сверхпластической формовки и диффузионной сварки (СПФ/ДС), проводимые в ИПСМ РАН. Описаны основные преимущества технологии СПФ/ДС над традиционными. Приведены примеры использования данной технологии для изготовления типовых элементов летательных аппаратов таких как крыльевые и корпусные узлы, полые вентиляторные лопасти.

**Введение.** Проведенные в последние десятилетия в России и за рубежом исследования показывают, что высокую эффективность при изготовлении полых конструкций для авиакосмической техники обеспечивает технологический процесс, основанный на сочетании сверхпластической формовки с диффузионной сваркой. Благодаря реализации основных преимуществ сверхпластической деформации – низкие напряжения течения и большие пластические деформации, а также благодаря качественной диффузионной сварке, метод СПФ/ДС обеспечивает технологический прорыв в изготовлении тонкостенных конструкций сложного профиля с высоким коэффициентом использования материала при относительно низких энергетических и капитальных затратах [1].

Основные преимущества технологии СПФ/ДС

Основными преимуществами метода СПФ/ДС по данным [1, 2] являются:

1. простая форма заготовок;
2. высокий коэффициент использования материала;
3. сокращение количества сборочных элементов;
4. совмещение процесса формовки и сварки в одной операции;
5. возможность получения интегральных конструкций;
6. формуемость значительно выше традиционной;
7. точность и повторяемость деталей;
8. более высокое качество соединения по сравнению с традиционными способами;
9. возможность соединения друг с другом тонких и толстых сечений;
10. большая эффективность и экологическая безопасность разработки.

Совмещенный процесс СПФ/ДС позволяет использовать преимущества, создаваемые необыкновенными особенностями титановых сплавов - склонностью к сверхпластичности и диффузионной свариваемостью. Сочетание таких двух качеств позволяет получать титановые детали, которые не могут быть изготовлены другими способами [3]. В настоящее время ведущие авиакосмические компании США, Великобритании, Франции, Германии, Японии и Китая развивают и используют технологию СПФ/ДС для изготовления крупногабаритных изделий ответственного назначения [2-5].

**Полые конструкции:** Технологические схемы изготовления и примеры использования. Конструкции, получаемые методом СПФ/ДС, разделяют по количеству используемых листов на двух, трех и четырех листовые. Наибольшее применение при изготовлении силовых изделий типа крыльевых и корпусных узлов, вращающихся частей двигателя, используемых в авиакосмической промышленности, находят трехслойные гофрированные панели и четырехслойные ячеистые конструкции. Технологические схемы их получения и образцы конструкций приведены на рис. 1 [5].



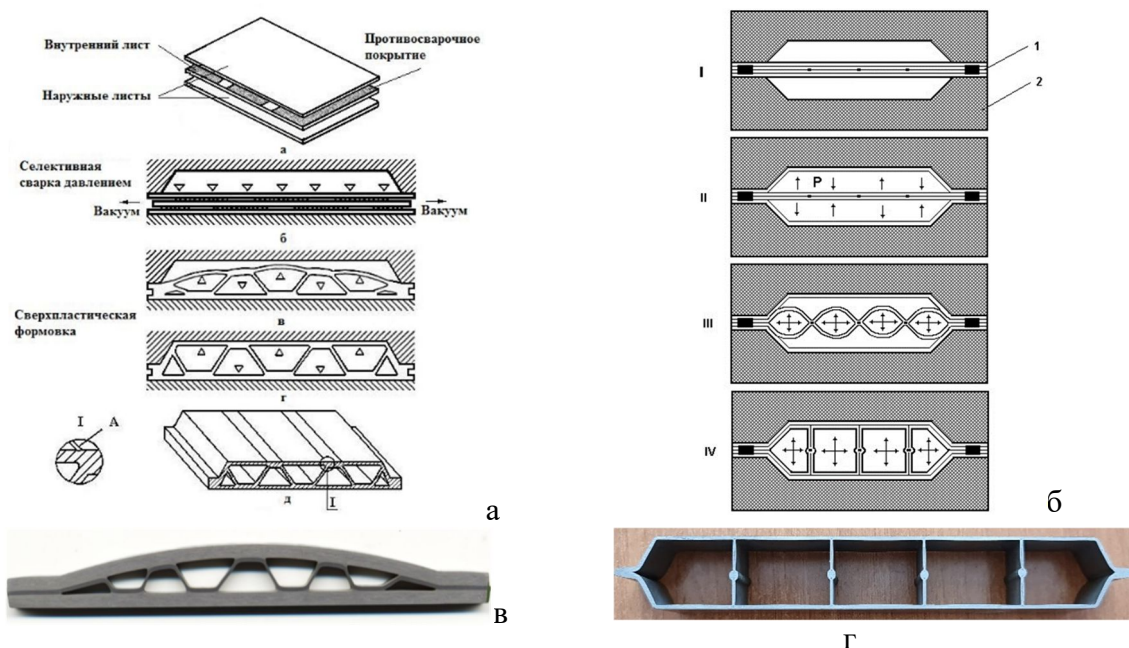


Рисунок 1 – Технологические схемы процессов получения трехслойных гофрированных панелей - а и четырехслойных ячеистых конструкций - б (1. - заготовка. 2. - оснастка) и образцы конструкций - в и г.

При изготовлении многослойных конструкций используются два основных способа: первый основан на использовании противосварочных покрытий (трехслойные конструкции) [6]; второй – на использовании предварительной сварки (четырёхслойные конструкции) [7]. По первому способу (рисунке 1, а) сваркой в твердом состоянии соединяют только определенные участки листовых заготовок, а остальные поверхности, благодаря нанесенному на них защитному покрытию, при этом не соединяются. После чего полученную заготовку деформируют в условиях сверхпластичности и придают конструкции сложную форму (3-х листовые конструкции). Наиболее ярким примером использования полых конструкций, изготовленных по данной технологии, является широкохордная полая лопатка вентилятора, изготавливаемая из титанового сплава Ti-6Al-4V фирмой Rolls-Royce и используемая в семействе двигателей Trend (рисунке 2).

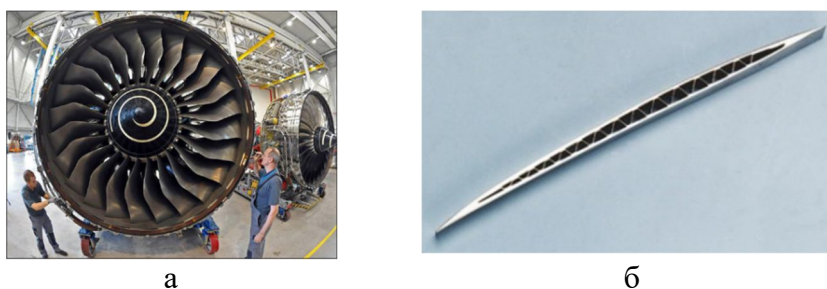


Рисунок 2 – Вентилятор двигателя фирмы Rolls-Royce с полыми лопатками(а), сечение полый лопатки (б).

При изготовлении четырехслойных конструкций с использованием предварительной сварки (рисунке 1 б) для соединения листов наполнителя применяют контактную шовную или точечную, электронно-лучевую или лазерную сварку в некоторых случаях используют диффузионную сварку. Получаемые многослойные ячеистые конструкции состоят из четырех листов двух наружных листов, являющихся обшивкой, и двух внутренних листов, представляющих собой силовой каркас – наполнитель (рисунке 3). Они характеризуются возможностью получения изделий с гладкими аэродинамическими обводами, равными

прочностными характеристиками на изгиб, как в продольном, так и в поперечном направлениях.

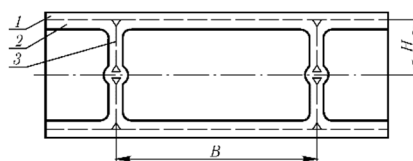


Рисунок 3 – Схема многослойной ячеистой конструкции: 1 – обшивка; 2 – наполнитель; 3 – ребро жесткости. В и Н – ширина и высота ячейки.

Наполнитель и обшивка, соединенные друг с другом диффузионной сваркой, совместно образуют жесткую интегральную конструкцию. Листы наполнителя предварительно соединяют прерывистыми сварными швами так, чтобы рисунок швов представлял собой ряды взаимно перпендикулярных линий, образующих прямоугольные ячейки. Прерывистость сварного шва обусловлена необходимостью создания отверстий, обеспечивающих проход деформирующего газа ко всем ячейкам в процессе формовки. Для соединения листов наполнителя наиболее удобна в промышленном использовании контактная шовная сварка. Она обеспечивает прочное соединение при температуре СПФ с минимальной шириной сварного шва и размерами околошовной зоны [8]. Примерами использования многослойных ячеистых конструкций для изготовления узлов авиакосмической промышленности могут служить предкрылки для самолета Мираж-2000 [9], трубопровод истребителя Tornado, изготовленный фирмой FormTech (Германия), многочисленные публикации сотрудников фирм Boeing и Airbus и многие другие, имеющиеся в зарубежных публикациях ведущих авиакосмических фирм мира. Сфера применения СПФ/ДС в настоящее время распространяется на получение: управляющих поверхностей, небольших аэродинамических поверхностей, различного рода силовых перегородок, корпусных элементов, газопроводов, вращающихся частей двигателя.

Исследования и разработка технологии СПФ/ДС в ИПСМ РАН.

В ИПСМ РАН более чем 30 лет проводятся фундаментальные научные исследования сварки в твердой фазе сверхпластичных материалов. Разработан целый ряд методик исследований. Они позволяют изучить кинетику и механизм процесса образования соединения в твердом состоянии в условиях сверхпластичности, исследовать формообразование многослойных конструкций, исследовать механические и эксплуатационные свойства получаемых конструкций, а также разработать технологические рекомендации по изготовлению конкретных изделий. В настоящее время в ИПСМ на основе типового технологического процесса разработаны опытные технологические процессы получения различного вида пустотелых интегральных конструкций сложной конфигурации и повышенной жесткости методом сверхпластической формовки и диффузионной сварки. С использованием данной технологии изготовлены из промышленных титановых сплавов опытные образцы новых типов сварных пустотелых конструкций - плоские, цилиндрические и криволинейные ячеистых панели. Особенностью полученных деталей (рис. 4) является то, что они практически охватывают все возможные схемы и варианты изделий, которые можно изготовить по технологии СПФ/ДС. Результаты механических испытаний и металлографических исследований узлов свидетельствуют о высоком качестве изготовленных изделий. Для осуществления процесса СПФ/ДС создан комплекс специализированного оборудования на базе промышленных электронагревательных печей и прессы, включающий штамповые блоки, автоматизированную систему управления процессом СПФ/ДС, контейнер для защиты рабочих поверхностей изделий от окисления. В ИПСМ проводятся комплексные работы, включающие фундаментальные научные исследования, конструкторские и технологические разработки.

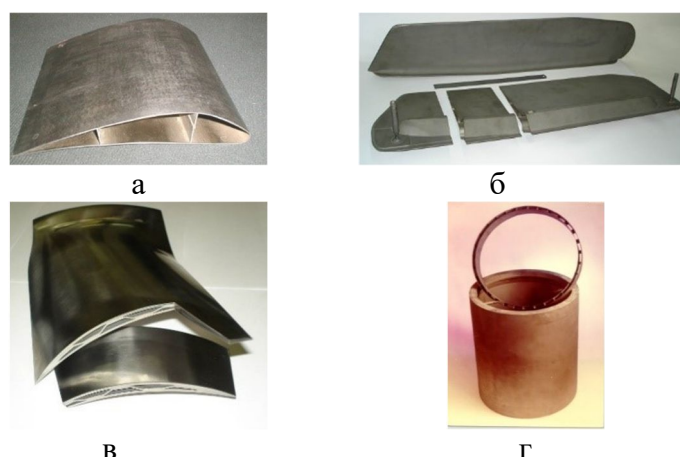


Рисунок 4 – Изделия, полученные по технологии СПФ/ДС в ИПСМ РАН: панель (а), крыло (б) лопатка имитатор (в), цилиндрический корпус (г).

Разработка интегральных технологий проводилась в тесном сотрудничестве с Российским Федеральным Ядерным Центром Всероссийским Научно-исследовательским Институтом Технической Физики (РФЯЦ-ВНИИТФ). В частности, в РФЯЦ-ВНИИТФ создано уникальное оборудование, разработаны методики испытаний и проведены испытания образцов многослойных ячеистых конструкций на усталость, сжатие, кручение и баллистический удар. Кроме того, были разработаны методики и создано оборудование для проведения неразрушающего контроля изделий, полученных по технологии СПФ/ДС лазерно-голографическими методами. Результаты совместных работ обобщены и изданы в совместной монографии – «Ячеистые конструкции» [1].

Наиболее важной и ответственной работой в последние годы является работа ИПСМ РАН совместно с АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и ПАО «ОДК-УМПО» по разработке конструкции и технологии изготовления полых широкохордной рабочей лопатки вентилятора для двигателя 5 поколения ПД-14 из титанового сплава ВТ6. Работа выполнялась по Федеральной Целевой Программе «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002 – 2010 годы и на период до 2015 года». Рабочая лопатка вентилятора – титановая, трехслойная, полый конструкции. Внутри лопатки находится гофрированный листовый наполнитель, который соединён сваркой в твердом состоянии с обшивками со стороны корыта и спинки. Отработка технологии изготовления полых лопаток проводилась на лопатках-имитаторах [10]. Была разработана конструкция лопатки-имитатора, изготовлена технологическая оснастка и автоматизированный комплекс управления параметрами процесса СПФ/ДС. При разработке технологии СПФ/ДС в ИПСМ РАН активно применяются методы компьютерного моделирования, позволяющие оценить возможность получения желаемой формы конструкции и оптимизировать технологические параметры. Совместными усилиями специалистов ИПСМ РАН и ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» был спроектирован и изготовлен штамповый блок для изготовления полноразмерных полых широкохордных рабочих лопаток вентилятора. ИПСМ РАН в тесной кооперации с предприятиями АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и ПАО «ОДК-УМПО» разработали опытную технологию и впервые в России изготовили партию полых широкохордных рабочих лопаток вентилятора для двигателя демонстратора технологий ПД-14. По результатам проведенной работы получены патенты РФ на способ изготовления полых вентиляторной лопатки и на установку для голографического контроля [11–15]. На рисунке 5 приведена полая широкохордная рабочая лопатка вентилятора после окончательной механической обработки и сборки первого двигателя демонстратора ПД-14 в ПАО «Авиадвигатель».

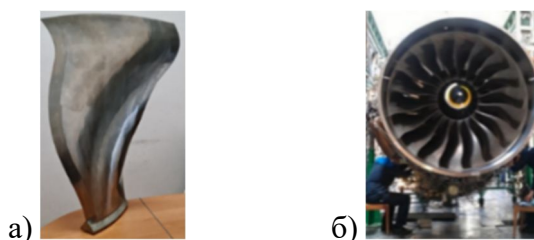


Рисунок 5 – Полая широкохордная рабочая лопатка вентилятора (а) и сборка двигателя-демонстратора ПД-14 в ПАО «Авиадвигатель».

В настоящее время двигатель ПД-14 успешно прошел государственную сертификацию и проходит стендовые и летные испытания на новом самолете МС-21.

Заключение. Благодаря многолетнему опыту исследований и технологических разработок, а также подготовленным квалифицированным кадрам ИПСМ РАН обладает большим потенциалом для успешного развития производства многослойных полых конструкций в тесной кооперации с заинтересованными предприятиями для нужд авиакосмического комплекса России. Работа выполнена в рамках госзадания ИПСМ РАН № НИОКТР 122011900474-5.

#### Список использованных источников.

1. Е.Н. Петров, В.В. Родионов, Э.Н. Кузьмин, Р.Я. Лутфуллин, Р.В. Сафиуллин // Ячеистые конструкции. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008, 176 с.
2. Stephen D. Designing for Superplastic Alloys // AGARD Lecture Series № 154. 7. p. 1 – 37.
3. Ершов А.Н., Егоров О.В., Цепин М.А., Соболев Я.А., Африкантов А. М., Заболуев Т.И., Семенов Д. А. Совмещенный процесс сверхпластической формовки и диффузионной сварки. Обзор. 1989.
4. Смирнов О.М. Сверхпластичность материалов: от реологии к технологии. Кузнечно-штамповочное производство. 1998. №2 с. 18-23.
5. Смирнов О.М. Сверхпластичность материалов: от реологии к технологии. Кузнечно-штамповочное производство. 1998. №2 с. 18-23.
6. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций Часть I Международный опыт, Письма о материалах. 2012. Т. 2. № 1 (5). с. 32-35.
7. Pat. 3927817 USA, В 23 К 31/02. Method of making metallic sandwich structures.
8. Safiullin R.V. SPF/DB of Multilayer Hollow Structures// Proceedings of European Conference on Superplastic Forming EuroSPF-2004; July 7-9, 2004, p. 167-174.
9. О. А. Кайбышев, Р. В. Сафиуллин, Р. Я. Лутфуллин, С. Н. Фаткуллин Исследование и разработка технологии сверхпластической формовки многослойных ячеистых конструкций // Кузнечно-штамповое производство. –1994. – № 4 с. 10–12.
10. Roland B. SPF/DB Applications for Military Aircraft / Superplasticity and Superplastic Forming. Edited by Hamilton C.H. and Paton N.E. The Minerals, Metals and Materials society. 1988. p.601-612.
11. Р.В. Сафиуллин А.А. Круглов, О.А. Руденко, С.А. Харин, А.Н. Сайранов, М.А. Морозов, В.Б. Тимохов, В.А. Кропотов Разработка конструкции и технологии изготовления облегченной широкохордной лопатки вентилятора авиадвигателя из титанового сплава. Титан №4(26) 2009, с.34-39.
12. Патент № 2412017 РФ Способ изготовления полой вентиляторной лопатки.
13. Патент № 2477191 РФ Способ изготовления полой вентиляторной лопатки.
14. Патент № 2548834 РФ Способ изготовления полого изделия типа вентиляторной лопатки.
15. Патент № 2555274 РФ Способ изготовления полой вентиляторной лопатки.
16. Патент № 2555274 РФ на полезную модель Установка для голографического.

УДК 621.791.4

**СПОСОБ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА ZN-22% AL В УСЛОВИЯХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ**

Мухаметрахимов М.Х.

Институт проблем сверхпластичности металлов, г. Уфа

**Аннотация.** Предложен новый подход сварки давлением в твердом состоянии алюминиево-цинкового сплава Zn-22% Al в вакууме при температуре 250 °С в условиях низкотемпературной сверхпластичности. Ультрамелкозернистую равноосную структуру со средним размером обеих фаз около 0,65 мкм получали путем отжига в печи при температуре 350°С с последующей закалкой в воде. В результате нагрева и осадки происходит совместная сверхпластическая деформация и основная деформация локализуется в области формирования твердофазного соединения. Твердофазное соединение образуется вследствие возникновения металлических связей между ювенильными контактирующими поверхностями свариваемых заготовок. Исследованы микроструктура и механические свойства сварного соединения. Механические испытания на растяжения показали, что прочность сварных соединений составила 90-95% от предела прочности основного материала.

**Введение.**

В настоящее время алюминий и его сплавы используются практически во всех областях современной техники благодаря их низкой плотностью и высокой удельной прочности. Важнейшие потребители алюминия и его сплавов: - авиационная и автомобильная отрасли промышленности, электротехническая промышленность и приборостроение, машиностроение и производство предметов народного потребления [1,2]. Для алюминия и его сплавов применяются практически все промышленные способы сварки плавлением: аргонодуговая сварка, лазерная сварка, плазменная сварка и другие виды сварки [3]. Однако технология сварки алюминия и его сплавов очень сложная; необходимо учесть много разных факторов и особенностей материала, чтобы выполнить сварочные работы на высоком уровне.

Основным недостатком сварки плавлением является неравномерное введение тепла в соединяемые детали. Это приводит к литой структуре расплава и затвердевшего металла сварного шва. Переход через границу расплава к основному металлу сопровождается изменениями механических свойств. Наряду со структурными различиями, вопросы сварки также включают остаточные напряжения, деформации сварки и пористость сварного шва [4]. В значительной степени эти проблемы встречаются при сварке алюминиевых конструкций. Из-за высокой теплоемкости и теплопроводности требуется увеличить введение тепла по сравнению со сваркой стали, так как используется до 5% более высокий сварочный ток. Сильный перегрев зоны стыка и высокий коэффициент расширения алюминия вызывают значительную усадку металла сварного шва при его затвердевании, что приводит к высоким остаточным деформациям [5]. Высокая растворимость газов в расплавленном алюминиевом материале увеличивает вероятность образования газовых пор во время кристаллизации. Усадка алюминия также может привести к образованию пор в виде неправильных микропор, подобных микротрещинам [6]. Алюминий подвержен окислению как в твердом, так и в жидком состоянии. Оксидная пленка, образованная на твердом материале и  $Al_2O_3$ , образованном при сварке, имеет температуру плавления выше температуры плавления алюминия и нерастворима в жидком алюминии, предотвращает сплавление металла сварного шва с основным металлом и образует неметаллические включения в сварной шов [7].

При получении различных конструкций сваркой плавлением возникает сложность в разнице температур, необходимых для расплавления оксидной верхней пленки и сварки

самого металла. У верхнего слоя температура плавления 2050 °С, а у алюминия и его сплавов – 660 °С. Тем не менее популярность различных технологий сварки алюминия и его сплавов не снижается. В связи с этим, исследования, направленные на изучение алюминиевых сплавов и на совершенствование режимов их обработки, следует считать актуальными.

Одним из направлений исследования является варьирование состава сплавов алюминия. Использование различных сплавов алюминия позволяет создавать очень прочные и надежные конструкции. Двойные сплавы системы алюминий-цинк Al-Zn отличаются рядом свойств, благодаря которым их целесообразно применять в свариваемых конструкциях [8]. Цинк является одним из основных легирующих элементов алюминиевых сплавов (как медь, магний). С введением цинка в алюминий повышается вязкость расплава. Совместное введение в алюминий цинка, меди, магния позволило создать группу высокопрочных конструкционных сплавов, нашедших широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Сплавы на основе Zn-Al относятся к группе термически упрочняемых и обладают тонкой структурой непосредственно в результате фазового превращения. Характерным примером таких сплавов может служить эвтектоидный сплав Zn-22% Al: закалка из однофазной области (с температур выше 250 °С) дает равноосную двухфазную структуру с величиной зерна приблизительно 0,5 мкм. В 1945 г. А.А. Бочвар и З.А. Свидерская открыли явление сверх пластичности сплава Zn-22% Al, что дало возможность разработать ряд сверх пластичных сплавов Zn-Al и это явление А.А. Бочвар предложил назвать сверхпластичностью (СП), что стало общепринятым термином в мировой литературе и эвтектоидный сплав Zn-22% Al признан высокопластическим материалом при обычных испытаниях [9].

В настоящей работе изучены микроструктура и механические свойства твердофазного соединения эвтектоидного классического двухфазного алюминиево-цинкового сплава Zn-22% Al в условиях низкотемпературной сверхпластичности.

Материал и методика исследования.

В качестве модельного материала был выбран классический алюминиево-цинковый сплав Zn-22% Al в виде прутка диаметром 45 мм и высотой 50 мм.

Ультрамелкозернистую равноосную структуру со средним размером обеих фаз получали путем отжига в воздушной печи при температуре 350 °С в течение 3 часа с последующей закалкой в воде. В результате такой обработки образуются стабильные ультрамелкие зерна размерами около 0,65 мкм с однородным распределением зерен Zn и Al.

Сварку цилиндрических заготовок в твердом состоянии осуществляли в специальных бойках в вакуумной камере при температуре 250 °С при оптимальных температурно-скоростных условиях деформации. Глубина вакуума в процессе эксперимента была не меньше  $P=2,0 \times 10^{-3}$  Па.

Из полученных заготовок вырезали образцы для металлографических исследований и образцы на отрыв. Для выявления  $\alpha$  и  $\beta$  -зерен фаз полированную поверхность образцов электрически подтравливали в 10%-ном спиртовом растворе хлорной кислоты при температуре  $T=200\text{K}$  и при напряжении  $V=60$  В.

Металлографические и фрактографические исследования проводили с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа (РЭМ) «TESCAN MIRA3 LMU» по относительной объемной доле (протяженности) пор в поперечном сечении зоны соединения.

Угольные прицельные реплики получали путем термического испарения спектрально-чистого углерода на подготовленную поверхность в условиях высокого вакуума на установке ВУП-4 при остаточном давлении около  $1,33 \times 10^{-3}$  Па [10]. Полученные

прицельные реплики исследовали на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) JEM - 2000 EX при ускоряющем напряжении 160 кв.

Механические испытания проводили по схеме “растяжение” при комнатной температуре и скорости деформирования 1 мм/мин на универсальном динамометре «INSTRON-1185». Механические свойства при растяжении измеряли на образцах диаметром 5 мм и длиной рабочей части 20 мм. Поверхность соединения ориентировали перпендикулярно оси растяжения в центральной части образца.

Результаты и их обсуждение.

Известно, что при сварке давлением цилиндрических заготовок большой высоты на боковой поверхности свариваемых материалов появляется бочкообразность и зона локализации деформации распространяется на весь объем свариваемых заготовок [11]. При этом наличие оксидного слоя на поверхности свариваемых заготовок препятствует образованию физического контакта. При малых степенях деформации толстый оксидный слой не разрушаются и заготовки не свариваются.

Для получения качественного твердофазного соединения поверхности свариваемых поверхности заготовок необходимо очистить от оксидных пленок и торцы их плотно пригнать друг к другу. Для удаления оксидного слоя из зоны свариваемых поверхностей требуются большие степени деформации.

Для локализации деформации в зоне сварного соединения цилиндрических заготовок в твердом состоянии использовали специальные бойки.

Подбирая формы и размеры бойков (или оснастки) смогли создать возможность влиять на развитие локального течения и обеспечивать наиболее выгодные условия деформирования путем оптимизации затрат энергии на деформацию, при этом большая часть заготовок слабо деформируется (рисунке 1).

На рисунке 1 представлены основные стадии процесса моделирования свариваемых заготовок.

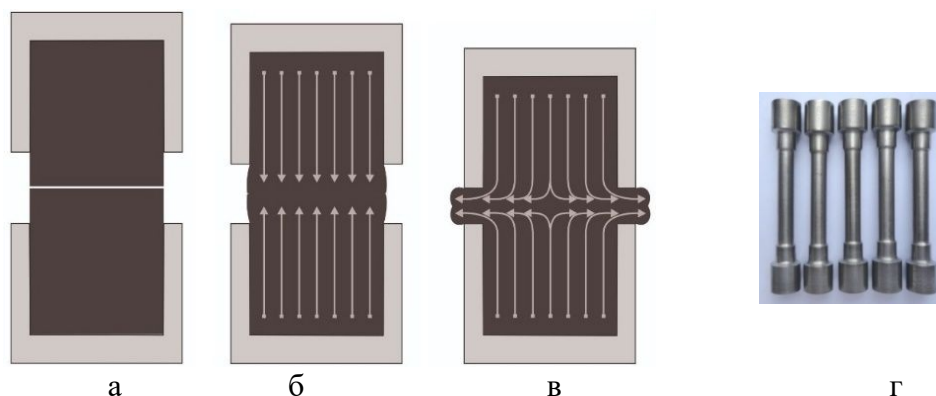


Рисунок 1 – Основные стадии процесса моделирования свариваемых заготовок: форма заготовки после 1-ой (а), 2-ой (б) и 3-ой (в) стадии и образцы, вырезанные из сваренных заготовок (г)

В результате нагрева и осадки происходит совместная сверхпластическая деформация и основная деформация локализуется в области формирования твердофазного соединения. При этом появляется новый слой без оксидной плёнки на поверхности свариваемых заготовок, и твердофазное соединение образуется вследствие возникновения металлических связей между ювенильными контактирующими поверхностями свариваемых заготовок и это гарантирует достижение эффективной диффузионной связи. В этом случае зона сварного шва имеет мелкозернистую структуру и средний размер зерна не превышает до 1 мкм.

На рисунке 2 представлена микроструктура твердофазного соединения сплава Zn-22% Al и фрактограмма поверхности разрушения после механического испытания.

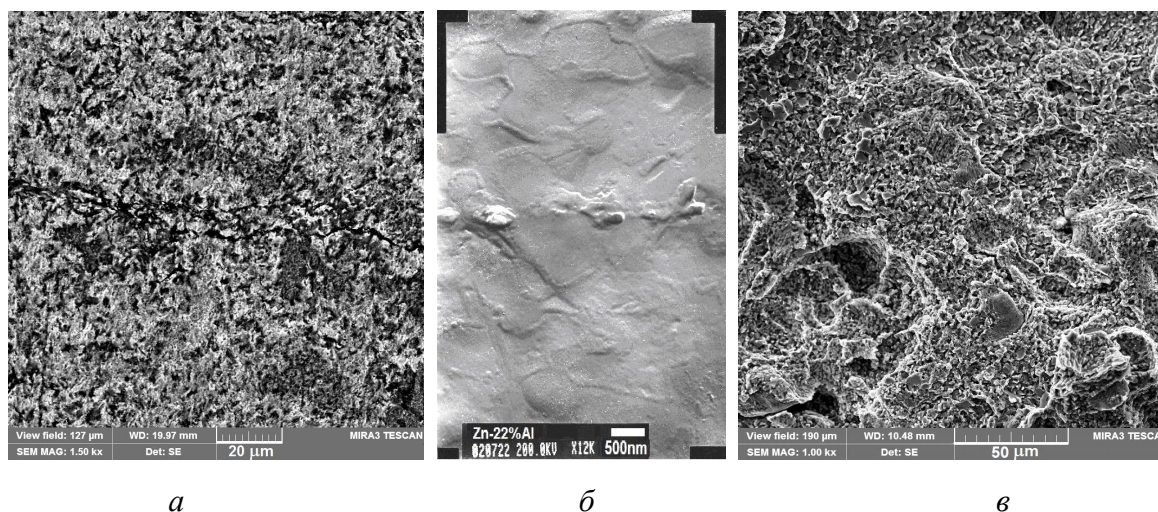


Рисунок 2 – Микроструктура твердофазного соединения (а), угольная прицельная реплика (б) и фрактограмма поверхности разрушения после механического испытания сплава Zn-22% Al (в). (а и в - РЭМ, б - ПЭМ)

Микроструктурный анализ сварных соединений показал, что в зоне сварного соединения отсутствуют характерные дефекты, и граница раздела практически не выявляется (рис. 2, а). Видны радиальные линии локализации пластической деформации в зоне сварного соединения и в центре заготовки из-за доминирующего эффекта сильного пластического потока отсутствует оксидная пленка. Только при больших увеличениях (рис. 2, б) по периметру сваренных заготовок видны следы разрушения и разбитые на фрагменты различной формы оксидная пленка размером 0,5-1,0 мкм. Суммарная протяженность пор относительно протяженности границы раздела не превышает от 5 до 10 %.

Механические испытания на растяжения показали, что сварные образцы разрушаются по границе раздела. Остатки частиц оксидов на границе раздела образцов, наряду с пористостью, является одним из факторов, приводящим к снижению прочности твердофазного соединения и разрушению по границе раздела. Образцы, вырезанные из различных участков, имеют разный характер разрушения. При этом образцы, вырезанные из центральной части заготовок, характеризуется более высокими значениями прочности и достигает до уровня 85,2 МПа. Показательно, что при испытаниях на растяжения образцы, вырезанные из краевой части заготовок, показали меньшую прочность и составила 81,3 МПа.

У всех испытанных сварных образцов формирование шейки практически не наблюдалось, что подтверждается малым значением относительного сужения. Анализ изломов, сваренных образцов показал, что структурные составляющие более мелкодисперсные и разрушение хрупкое без видимых следов пластической деформации и в некоторых участках видны остатки оксидных пленок (рисунке 2 в). Прочность сварных соединений в целом составила 90-95% от предела прочности основного материала. Учитывая все эти факты необходимо еще раз провести дополнительные эксперименты.

Экспериментально показана возможность получения сварного соединения эвтектоидного алюминиево-цинкового сплава Zn-22% Al в твердом состоянии цилиндрических заготовок при оптимальных температурно-скоростных условиях деформации (при температуре 250 °С со скоростью деформации  $1.0 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ).



**Список использованных источников.**

1. И.Ф. Колобнев. Термическая обработка алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1966. — 394 с.
2. М.Х. Рабинович Термомеханическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1973. - 273 с.
3. Toshihiko Fukuda. Weldability of 7000 series aluminium alloy materials // Welding International, 2012, Vol. 26, No. 4, p. 256–269.
4. S.K. Sundukov, R.I. Nigmatzyanov, D. S. Fatyukhin. Russian Metallurgy (Metally). 13, 29 (2021). Crossref
5. H.K.D.H. Bhadeshia. Science and Technology of Welding and Joining. 20 (6), 451 (2015). Crossref
6. D.M. Ryabkin, A.V. Lozovskaya, I.E. Sklabinskaya. Monografiya: metallovedenie svarki alyuminiya i ego splavov. Kiev (1990) 160 p.
7. R. Xiao, X. Zhang. Journal of Manufacturing Processes. 16 (2), 166 (2014). Crossref
8. I.J. Polmear. Light Alloys - From Traditional Alloys to Nanocrystals. Fourth Edition. - Australia, Melbourne: Monash University. 2006. – 421 p.
9. А.В. Смирнова, Г.А. Кокорин, С.М. Полонская и др. Электронная микроскопия. Справочник. – М.: Металлургия. 1985. 195 с
10. А.А. Пресняков Локализация пластической деформации. М.: Машиностроение, 1983, 56 с.

УДК 621.791.011

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ  
ИЗ ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВЫХ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**Закиров Р.Р.<sup>1</sup>, Мансуров И.Р.<sup>2</sup><sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет г. Уфа<sup>2</sup>ООО «Башнефть-Строй», г. Уфа.

**Аннотация.** Целью настоящей работы является изучение различных способов выполнения сварки трубопроводов из железоникелевых и никелевых сплавов. В данной работе было выполнено сравнение сварки без применения охлаждения и с принудительным охлаждением и предложены технологические рекомендации по сварке с принудительным охлаждением.

Основной сложностью выполнения сварных соединений из железоникелевых и никелевых сплавов является их высокая склонность к образованию горячих трещин в металле сварного шва [1,2].

Кроме того, при сварке труб из железоникелевых и никелевых сплавов требуется обеспечить коррозионную стойкость сварного шва в условиях эксплуатации трубопровода.

Также при сварке железоникелевых и никелевых сплавов требуется ограничивать рост зерна и не допускать выпадение интерметаллидов в металле шва и околошовной зоне.

Для выполнения этих требований рекомендуется применять следующие методы [1], [2]:

- Уменьшить нагрев за счет уменьшения погонной энергии сварки.
- Уменьшить нагрев за счет применения теплоотводящих устройств.
- Уменьшить нагрев за счет охлаждения сварного стыка перед наложением последующего валика.

Нормативная документация [1], [2] требует, чтобы последними выполнялись валики шва, которые контактируют с агрессивной средой. С этой целью при сварке сосудов и аппаратов, работающих под давлением, после заполнения всего сечения сварного шва, рекомендуется выполнять разделку корня с последующей подваркой аргонодуговой сваркой. Если невозможно выполнять подварку корня шва (например, при сварке трубопроводов), то должна применяться термообработка или производиться сварка с принудительным охлаждением сварного шва после выполнения первого прохода шва (выполнения корня шва).

В данной работе рассматриваются разные варианты выполнения сварки трубопроводов из железоникелевых и никелевых сплавов

Предлагается, в частности, обеспечивать снижением погонной энергии и охлаждать сварное соединение до температуры не выше 100°C для железоникелевых сплавов и до температуры окружающей среды для никелевых сплавов. Это обеспечивает минимизацию времени пребывания металла шва и околошовной зоны при повышенных температурах, когда в металле могут происходить структурные изменения: рост зерна и выпадение интерметаллидов.

Если применять снижение погонной энергии при сварке за счет наложения узких валиков и промежуточное охлаждение до заданной температуры, то время сварки значительно увеличивается за счет времени, необходимого для зачистки каждого валика и времени необходимого на охлаждение перед наложением каждого последующего валика.

Максимальное снижение времени пребывания металла при высокой температуре можно достичь применением принудительного охлаждения.

Были проведены сварки пробных стыков по двум вариантам:

1 вариант: Сварка стыка Ду80 из сплава UNS N08825 (Incoloy 825) с ограничением погонной энергии и промежуточным охлаждением до заданной температуры. Корень шва выполнялся РАД (TIG), заполнение РД (ММА).

2 вариант: Сварка стыка Ду80 и Ду200 из сплава UNS N08825 (Incoloy 825) с принудительным охлаждением. После выполнения корня шва РАД внутрь трубы обеспечивалась подача воды на охлаждение. Заполнение шва РД выполнялось с непрерывным охлаждением обратной стороны (корня) шва.

Сварка РАД выполнялась с применением присадочных прутков ОК Tigrod NiCrMo3, а заполнение выполнялось ручной дуговой сваркой покрытыми электродами (РД) с применением электродов ОК 92.45 (ОК NiCrMo3).

При сварке корня шва возникла проблема образования утяжин и трещин при резком обрыве дуги, см. рисунки 1 и 2. Образование трещин и утяжин при резком обрыве дуги связано с резким охлаждением ванны и нехваткой жидкого металла при резком охлаждении.

Для снижения вероятности образования утяжин, рыхлот и трещин в сварочной ванне при резком охлаждении рекомендуется обеспечить плавное гашение дуги. При отработке режимов сварки корня шва установлено, что гашение дуги в течении 5-10 сек. практически исключает появление этих дефектов при обрыве дуги.

В любом случае для полного исключения образования этих дефектов рекомендуется выполнять вышлифовку мест обрыва дуги при выполнении корня шва, а прихватки рекомендуется вырезать при выполнении сварки корневого шва.



Рисунок 1 – трещина в конце прихватки при резком обрыве дуги.

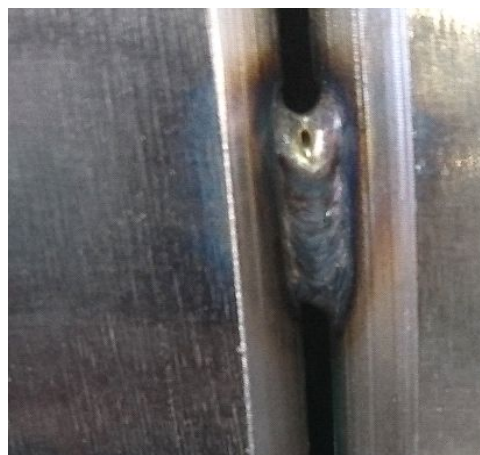


Рисунок 2 – Утяжина в конце прихватки при резком обрыве дуги.

При сварке с ограничением погонной энергии и промежуточным охлаждением перед наложением каждого последующего слоя значительное время занимает послойное охлаждение до заданной температуры. В результате время сварки значительно возрастает.

На рисунке 3 и 4 представлен внешний вид сварных соединений Ду 80, выполненных полностью РАД



Рисунок 3 – Внешний вид сварного соединения , выполненного РАД (положение В1)



Рисунок 4 – Внешний вид сварного соединения , выполненного РАД (положение П1)

При сварке с принудительным охлаждением, по нашему мнению, нет необходимости ограничивать ширину шва, т.к. время пребывания ванны в жидком состоянии резко уменьшается и практически не происходит стекание металла в вертикальном и потолочных положениях шва. Вид сварных швов, полученных с принудительным охлаждением корня шва приведены на рис 5 и 6.



Рисунок 5 – Выполнение РД облицовочного шва Ду 200 (положение В1)

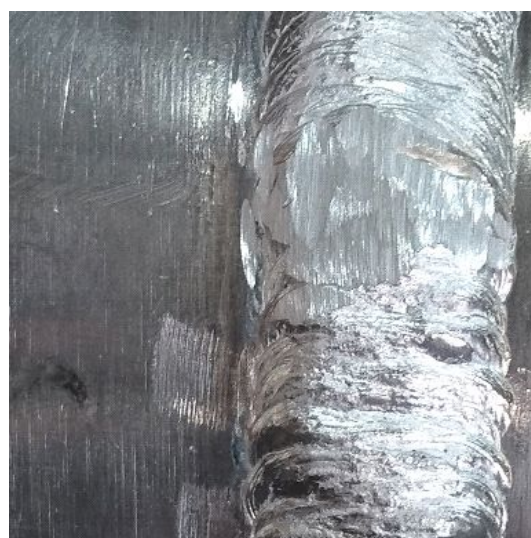


Рисунок 6 – Внешний вид облицовочного шва Ду 200, выполненного РД

На рисунках 5 и 6 видно, что время пребывания металла в жидком состоянии ограничено и формируется очень мелкая чешуя на поверхности сварного шва, ширина чешуек не превышает 0,5...0,8 мм. Это объясняется резким охлаждением сварочной ванны за счет применения принудительного охлаждения со стороны корня шва (изнутри трубы).

Заключение:

1. Отработана технология сварки технологических трубопроводов из сплава UNS N08825 (Incoloy 825) с принудительным охлаждением путем подачи охлаждающей воды внутрь трубы. Выполнены пробные сварные стыки Ду 80 и Ду 200.

2. Произведено сравнение варианта сварки с принудительным охлаждением и без применения охлаждения.

3. По результатам сварки пробных стыков предложено при выполнении сварки с принудительным охлаждением путем подачи охлаждающей воды внутрь трубы не ограничивать ширину накладываемого валика. При этом будет значительно сокращено время сварки без снижения качества выполненного шва.

4. Проведен ВИК и РГК полученных соединений. Результаты положительные.

5. В настоящее время готовятся сравнительные мех. испытания и контроль МКК.

#### **Список использованных источников.**

1. Особенности формирования микроструктуры околошовной зоны при роботизированной сварке гетерогенного сплава на основе никеля. Медведев А.Ю., Никифоров Р.В., Галимов В.Р., Муругова О.В., Савичев М.П., Большаков Б.О. *Materials. Technologies. Design.* 2021. Т. 3. № 1 (3). С. 40-47.

2. Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава эп742 методом линейной сварки трением. Бычков В.М., Селиванов А.С., Медведев А.Ю., Супов А.В., Большаков Б.О., Гринь Р.Р., Мусин Ф.Ф. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета.* 2012. Т. 16. № 7 (52). С. 112-116.

УДК 621.791.927.5

**ПОВЫШЕНИЕ ХЛАДОСТОЙКОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПУТЕМ  
МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ СВАРНОГО ШВА ЧЕРЕЗ ЭЛЕКТРОДНОЕ ПОКРЫТИЕ  
ОСНОВНОГО ТИПА**

Литвинова Т. Р., Антонов А. А

АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», г. Волгоград

**Аннотация.** Показана возможность комплексного микролегирования металла сварного шва (в масс. %: азотом 0,012...0,02; титаном 0,02...0,03; алюминием 0,01...0,025) при РДС стали 10ХСНД для формирования в переохлажденной области сварочной ванны нитридов титана кубовидной формы с размерами 200-300 нм, на поверхности которых кристаллизуются химические соединения, состоящие из окисульфидов и алюмосиликатов. Такие выделения в металлическом расплаве служат центрами кристаллизации дисперсного игольчатого феррита. Разработан состав покрытого электрода основного типа для ручной дуговой сварки (РДС) обеспечивает формирование в сварном шве преимущественно структуры дисперсного игольчатого феррита, дает возможность повысить хладостойкость сварных конструкций нефтехимического и специального назначений.

Решение проблемы хладостойкости сварных конструкций, а также разработки качественных, отечественных покрытых электродов, обеспечивающих конкурентоспособность с мировыми аналогами, является актуальной задачей. Эта проблема широко известна [1]. Уже при климатических температурах минус 40 °С и ниже - резко уменьшается ударная вязкость и другие механические характеристики металла сварного соединения по причине формирования крупноигольчатой ферритной фазы, по типу видманштетта. Современные сварочные материалы обеспечивают получение достаточно высоких значений пластичности и прочности металла при эксплуатации сварных соединений диапазоне от минус 20 до минус 60 °С, путем снижения содержания в металле швов диффузионного водорода, серы, и других вредных примесей [2], а также его легирования никелем и редкоземельными металлами [3]. С понижением температуры до минус 70 °С влияние перечисленных приемов воздействия на структуру литого металла уменьшается. Вместе с тем, достоверно установлено [4], что микролегирование сталей азотом, углеродом, титаном и алюминием способствует интенсификации процессов диспергирования его структуры, что дает возможность повысить хладостойкость сварного соединения с обеспечением преимущественного содержания в их структуре дисперсного игольчатого феррита. Это дает возможность существенно повысить механические свойства сварных соединений.

Активному диспергированию кристаллизующегося металла способствуют физико-химические процессы, протекающие при его экзогенном модифицировании наночастицами тугоплавких химических соединений [5].

Целью настоящего исследования являлось повышение хладостойкости сварных соединений из стали 10ХСНД при температурах до минус 70 °С путем микролегирования сварного шва ультрадисперсными частицами алмаза, нитридообразующими элементами титаном и алюминием, азотом и диоксидом церия, введенными в электродное покрытие основного типа.

Материалы, методы исследований, эксперимент

В экспериментах использовали образцы из стали 10ХСНД ГОСТ 19281-2014. Электроды изготавливали согласно требованиям ГОСТ 9466-77 диаметром 3 мм с основным типом покрытия, в которое вводили модификатор из микроразмерных (20...70 мкм) металлических порошков титана, алюминия, хрома азотированного, оксида церия и порошка алмаза, полученного детонационным синтезом (ДНА).

Металлографические исследования производили с использованием оптической (цифровой микроскоп Axiovert 40MAT Carl Zeiss) и электронной (микроскоп FEI Versa 3D) микроскопии. Шлифы изготавливали в сечениях, расположенных перпендикулярно оси шва. Работу удара при температурах сварных образцов 20 и минус 70 °С оценивали согласно требованиям ГОСТ 6996-66. Использовали маятниковый копер ИО 5003-0.3-11, стандартные образцы сварных соединений охлаждали в криокамере ККМ-1М. Массу материалов измеряли на электронных аналитических весах VIBRA HT124 RSE (точность до 0,1 мг). Сварку образцов для металлографических исследований производили в условиях монтажа на открытом воздухе, в нижнем пространственном положении, на постоянном токе (+ на электроде) в один проход.

При анализе структуры и свойств металла сварных соединений оказалось, что повышенные значения ударной вязкости металла получены при его содержании в диапазоне от 3,5 до 5,0 % от массы покрытия. Как с увеличением, так и с уменьшением содержания модификатора в покрытии значение ударной вязкости снижается в связи с уменьшением количества мелкозернистого игольчатого феррита и преобладанием доли полигонального феррита.

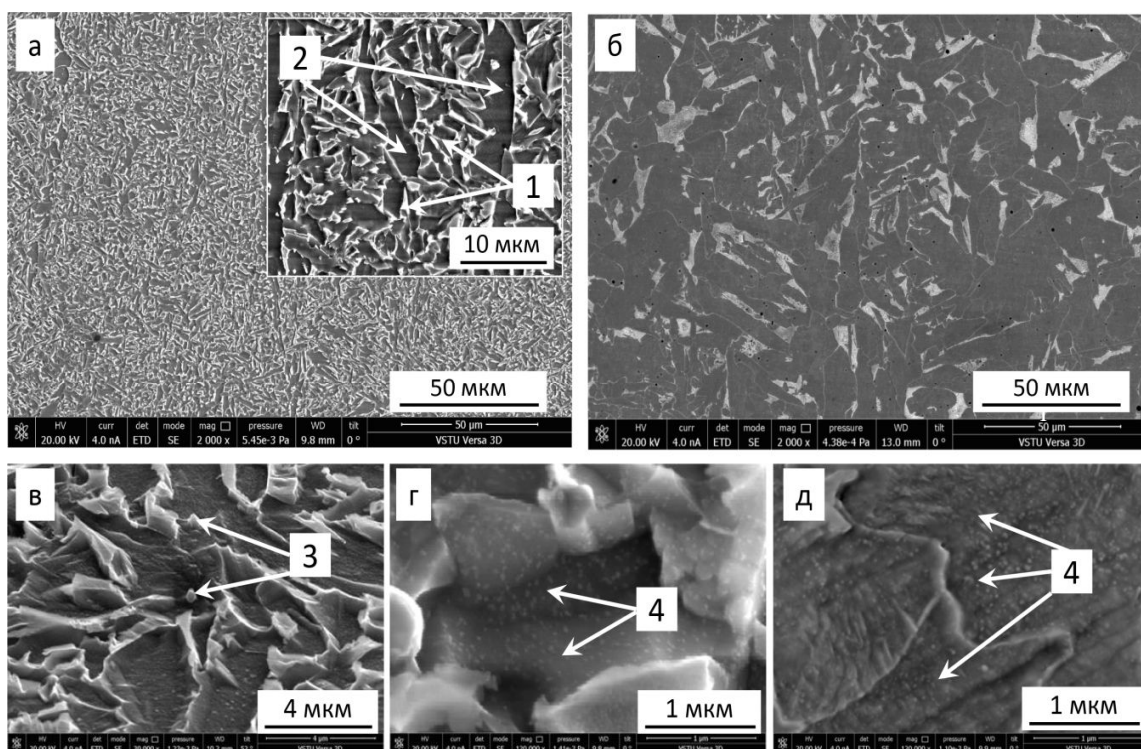


Рисунок 1 – Микроструктура сварного шва, выполненного электродами ЭЛ-3,75 (а, г, д), и электродами, не содержащими модификатор (б): 1 – феррит игольчатый (внутризеренный), 2 – феррит полиэдрический (по границам зерен), 3 – неметаллические включения в игольчатом феррите, 4 – наночастицы

Структура металла сварного шва, выполненного электродами, содержащими 3,75% модификатора, мелкозернистая (рисунок 1), по сравнению со структурой шва, полученного с использованием электрода, без модификатора в покрытии (рисунок 1б). Дендриты состоят преимущественно из игольчатого феррита. При более высоком разрешении в матрице игольчатого феррита можно наблюдать многочисленные выделения фаз с размерами в диапазоне 20...50 нм. Анализ фона при рентгеноспектральном исследовании показывает наличие спектров углерода, азота, титана и алюминия. Можно предположить, что на сохранившихся в металлическом расплаве сварочной ванны частицах ДНА сформировались нитриды (или карбонитриды) титана и алюминия. Выявлено, что в осевых

объемах дендритов расположены неметаллические включения сферической формы с размерами 0,4...0,6 мкм (рис 1в) которые служат центрами кристаллизации игольчатого феррита. В их сечениях, полученных ионным лучом, расположены нитриды титана эндогенного происхождения кубовидной формы с размерами 0,2...0,3 мкм. В результате такого микролегирования структура металла шва обеспечивает превышение значений ударной вязкости сварного соединения при пониженных температурах в сравнении с известными мировыми аналогами (рисунок 2).

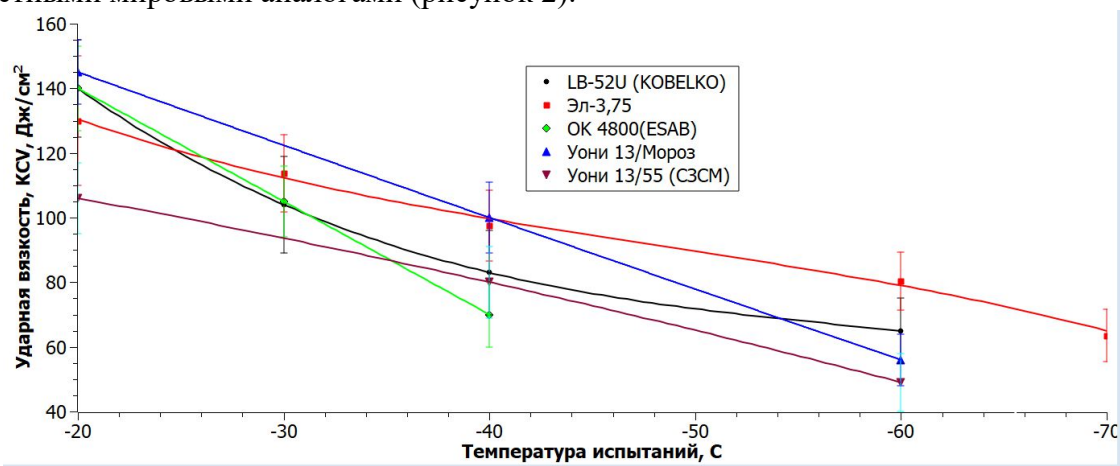


Рисунок 2 – Влияние температуры испытаний на величину ударной вязкости металла швов, сваренных с использованием промышленных марок электродов и разработанного электрода Эл-3,75

Для получения достоверных результатов сравнительной оценки механических свойств сварных соединений и сварочно-технологических характеристик электродов при сварке в различных пространственных положениях в одинаковых условиях испытывали промышленные марки электродов отечественного и зарубежного производств. Испытывали электроды концерна ESAB, фирмы японской фирмы KOBELCO, а также – предприятий РФ - Судиславского завода сварочных материалов и фирмы РОТЕКС. Сварку образцов для механических испытаний производили в нижнем пространственном положении, на постоянном токе (+ на электроде) в 4 прохода. В таблице 1 представлены средние значения сварных соединений на стали 10ХСНД, выполненных различными сварочными электродами.

Таблица 1 - Механические свойства металла (средние значения) сварных соединений на стали 10ХСНД, выполненных различными сварочными электродами.

Марка и диаметр электрода	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	Содержание диффузионного водорода, мл/100 г
LB-52U Ø2.6	460	550	31	200 KCV20 65 KCV-60	1,6
Уони13/Мороз Ø3.0	510	660	22	210 KCV20 55 KCV-60	3,0
Уони 13/55 (СЗСМ) Ø3.0	460	530	20	140 KCV20 50 KCV-60	6,0
ЭЛ-3,75 Ø3.0	460	580	21,5	160 KCV20 80 KCV-40 65 KCV-70	2,9



**Выводы.**

Комплексное микролегирование металла сварного шва (в масс. %: азотом 0,012...0,02; титаном 0,02...0,03; алюминием 0,01...0,025) при РДС стали 10ХСНД создает условия для формирования в переохлажденной области сварочной ванны нитридов титана кубовидной формы с размерами 200-300 нм, на поверхности которых кристаллизуются химические соединения, состоящие из оксисульфидов и алюмосиликатов. Такие выделения в металлическом расплаве служат центрами кристаллизации дисперсного игольчатого феррита.

Разработанный состав покрытого электрода основного типа для РДС обеспечивает формирование в сварном шве преимущественно структуры дисперсного игольчатого феррита, а также дает возможность повысить хладостойкость сварных конструкций нефтехимического и специального назначений.

**Список использованных источников.**

1. Сидлин З. А. О конкурентоспособности российских сварочных электродов // Сварочное производство. - 2016. - № 8. - С. 32-38.
2. Е.А. Кривоносова, Т.В. Лодягина Способы влияния на характеристики оксидов и сульфидов в сварных соединениях низколегированной стали // Вестник ПНИПУ. - 2014. - Т. 16, № 3. - С. - 16-20.
3. Влияние нанодисперсных карбидов WC и никеля на структуру и свойства наплавленного металла / Соколов Г.Н., Трошков А.С., Лысак В.И., Самохин А.В., Благовещенский Ю.В., Алексеев Н.В., Цветков Ю.В. // Сварка и Диагностика. - 2011. - № 3. - С. 36 - 38.
4. Рабинович А. В., Трегубенко Г. Н. Бубликов Ю. А. Разработка и производство конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением на основе комплексного микролегирования N-Ti-Al // Металлофизика. Новейшие технологии. - 2012. - Т. 34, № 10. - С. 1385-1395.
5. Соколов Г. Н., Лысак В. И., Зорин И. В., Артемьев А. А., Дубцов Ю. Н., Харламов В.О., Антонов А. А. Феноменологическая модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов // Вопросы материаловедения. - 2015. - № 4 (84) - С. 159-168.

УДК 669.295

**УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА  
ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20**

Саркеева А.А.

Институт проблем сверхпластичности металлов, г. Уфа

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования слоистого материала, полученного диффузионной сваркой листов титанового сплава VT20. Установлено, что полученный материал характеризуется изотропными свойствами. Проведена количественная оценка характеристик ударного разрушения.

**Введение**

Титан и его сплавы широко применяются в различных отраслях техники благодаря комплексу полезных свойств [1]. При этом изготовление их в виде слоистой композиции представляет значительный интерес, поскольку в них можно реализовать существенное повышение механических свойств, особенно ударной вязкости [2].

Под ударной вязкостью понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора напряжения. Ударная вязкость является интегральной характеристикой, содержащей работу зарождения трещины и работу распространения вязкой трещины [3]. Склонность к разрушению трещины в первую очередь определяется работой распространения трещины. Чем больше работа распространения вязкой трещины, тем меньше возможность внезапного хрупкого разрушения. Использование копра с записью диаграммы деформирования существенно облегчает оценку энергоемкости разрушения и позволяет выделить пороговые нагрузки, связанные с изменением стадий разрушения и соответствующих механизмов развития трещины [3-8].

Существует множество технологических способов изготовления слоистых материалов, среди которых диффузионная сварка (ДС), представляет наибольший интерес для соединения титановых заготовок, поскольку ДС совмещённая со сверхпластическим деформированием позволяет изготовить многослойные конструкции сложного профиля, которые определяют перспективу дальнейшего развития авиационной и космической техники [9].

Механическое поведение слоистого материала зависит от множества факторов. На примере слоистого материала на основе двухфазного титанового сплава VT6 подробно изучено влияние расположения поверхностей твердофазного соединения относительно направления распространения трещины, а также дефектов в зоне соединения [10].

Целью данной работы являлось определение характеристик ударного разрушения слоистого материала, полученного диффузионной сваркой листовых заготовок титанового сплава VT20.

**Материал и методы исследования**

Для исследований был изготовлен слоистый материал из листовых заготовок промышленного титанового псевдо  $\alpha$ -сплава VT20 толщиной  $\sim 0,85$  мм методом диффузионной сварки. Слоистый материал состоял из 13 листовых заготовок размерами  $220 \times 105$  мм. Заготовки при сборке в пакет, укладывались относительно друг друга так, чтобы угол между направлением прокатки составлял  $90^\circ$ . Далее собранный пакет размещали между силовыми плитами штамповой оснастки. Плиты, крепежные элементы оснастки, а также пуансон были выполнены из жаропрочного никелевого сплава ЖС-6, остальные детали из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Между пакетом и верхней силовой плитой устанавливали гибкую мембрану. Сборку фиксировали клиновым прижимом и помещали в нагревательную камеру печи ОКБ-8086. Диффузионная сварка

проводилась при 970 °С. Нагрев, выдержку под давлением и охлаждение осуществляли в вакууме  $2 \times 10^{-3}$  Па.

Для проведения механических испытаний на ударный изгиб изготавливали стандартные U-образные образцы с размерами  $10 \times 10 \times 55$  мм<sup>3</sup>, вырезанные из слоистого материала в двух взаимно перпендикулярных направлениях. На рисунке 1 представлено схематическое изображение образца с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения - линия надреза располагалась перпендикулярно этим поверхностям.

Испытания на ударный изгиб проводили при комнатной температуре на вертикальном копре Instron CEAST 9350 с записью диаграмм ударного нагружения в координатных осях «усилие – перемещение». Среднее значение характеристик ударного разрушения определяли по результатам испытаний трех образцов.

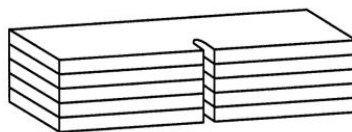


Рисунок 1 – Образец для испытаний на ударный изгиб с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения

#### Результаты и обсуждение

Согласно результатам механических испытаний, среднее значение ударной вязкости образцов слоистого материала с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения составила 1,59 МДж/м<sup>2</sup>, что существенно превышает ударную вязкость слоистого материала на основе титанового сплава ВТ6, полученного также диффузионной сваркой [10]. Диаграмма ударного нагружения представлена на рисунке 2. Количественная оценка характеристик ударного разрушения показала, что работа распространения трещины превышает работу ее зарождения. Среднее значение работы зарождения трещины составило 50 Дж, работы распространения 73 Дж.

Стоит отметить, что слоистый материал из титанового сплава ВТ20 характеризуется изотропными свойствами. Изотропность свойств была достигнута благодаря укладке листовых заготовок друг относительно друга так, что угол между направлениями прокатки в них составлял 90°. Впервые данный эффект был зафиксирован на 5-слойном титановом материале даже при изменении направления прокатки только в одном из заготовок [11]. Изотропность свойств исследуемого слоистого материала является его важным достоинством, поскольку при изготовлении ряда изделий анизотропия свойств является отрицательным фактором [1, 3, 11, 12].

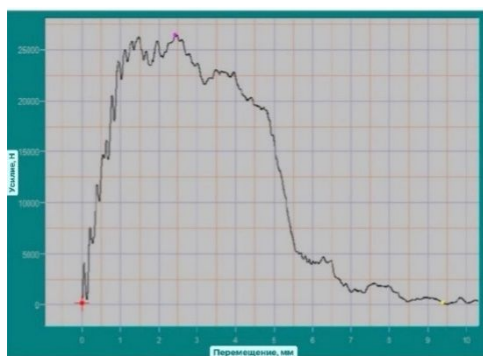


Рисунок 2 – Диаграмма ударного нагружения слоистого образца с «разветвляющим» трещину расположением поверхностей соединения

На поверхности разрушенных образцов обнаружены трещины расслоения (рисунок 3). Образование расслоений, как правило, происходит по ослабленным поверхностям соединений. В случае слоистых материалов, полученных диффузионной сваркой, к снижению прочности соединения приводят дефекты в зоне соединения. В работе [11] было показано, что способность образцов к появлению расслоений возрастает с увеличением относительной протяженности пор в зоне соединения.

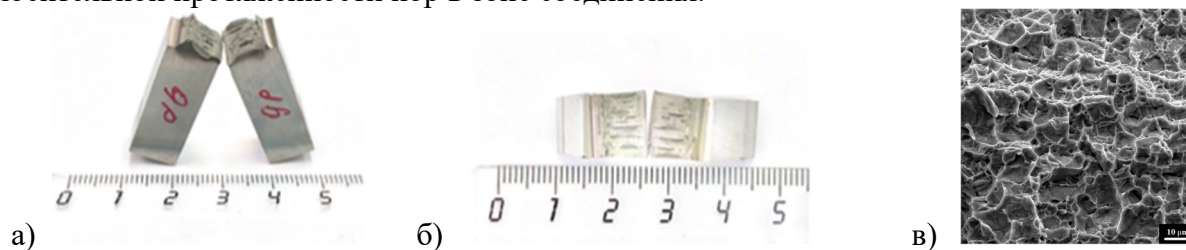


Рисунок 3 – внешний вид образцов после испытаний на ударный изгиб (а) и поверхность излома образца (б, в)

#### Заключение

Слоистый материал, полученный диффузионной сваркой листов титанового сплава ВТ20, характеризуется изотропными свойствами.

Ударная вязкость слоистого материала при «разветвляющемся» трещину расположении поверхностей соединения составила  $1,59 \text{ МДж/м}^2$ . При этом работа распространения трещины превышает работу ее зарождения в 1,5 раза.

Поверхность разрушенных образцов характеризуется наличием расслоений по поверхностям соединений.

#### Список использованных источников.

1. Титановые сплавы в машиностроении / Б. Б. Чечулин, [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
2. Херцберг, Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг; под ред. М. Л. Берштейна, С. П. Ефименко; пер. с англ. А. М. Берштейна. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
3. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
4. Bohme, W. W. Results of a DVM round robin on instrumented Charpy testing / W. W. Bohme // Proc. of Charpy centenary conf. – France. Poitiers, 2001. – P. 29–36.
5. Siewert, T. A. Impact test methods: procedure and analysis / T. A. Siewert // Proc. of Charpy centenary conf. – France. Poitiers, 2001. – P. 61–72.
6. Георгиев, М. Пукнатиноустойчивость на металите при ударно натоварване / М. Георгиев. – София: БУЛВЕСТ 2000, 2007. – 231 с.
7. Ботвина, Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / Л. Р. Ботвина. – М.: Наука, 2008. – 334 с.
8. Ботвина, Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л. Р. Ботвина. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
9. Ячеистые конструкции / Е. Н. Петров [и др.]. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. – 176 с.
10. Поведение при ударном нагружении слоистого материала из титанового сплава / А. А. Саркеева, А. А. Круглов, Е. М. Бородин, С. В. Гладковский, Р. Я. Лутфуллин // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15, № 5. – С. 51–57.
11. Ганеева (Саркеева), А. А. Ударная вязкость слоистых полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6 / А. А. Ганеева (Саркеева), А. А. Круглов, Р. Я. Лутфуллин // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 12. – С. 36–40.
12. С. В. Скворцова, А. А. Ильин, С.Я. Бецофен и др. Анизотропия механических свойств и текстура листовых полуфабрикатов из титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2006. № 1–2. с. 81–87

УДК 621.791.14

**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПОЗИТА  $Al+Fe_2O_3$   
ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

Сугояко И.С.<sup>1</sup>, Кабирова Д.Б.<sup>2</sup>, Хайретдинов Н.Ф.<sup>2</sup>,  
Фазлыяхметов Р. Ф.<sup>2</sup>, Имаев М.Ф.<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

<sup>2</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов, г. Уфа

**Аннотация**

Сварные соединения часто имеют низкие механические свойства. Одним из способов их упрочнения является создание композита в зоне соединения. Эффективным методом создания композитов является сварка/обработка трением с перемешиванием. Данная технология позволяет создать сварное соединение с высокими механическими свойствами без недостатков, характерных для сварки плавлением, таких как ультрафиолетовое излучение, образование пористости и горячих трещин. В работе провели сварку трением с перемешиванием внахлест листов из алюминиевого сплава 6063, совмещенную с внедрением армирующих частиц  $Fe_2O_3$  в зону соединения. Установлено, что увеличение числа проходов сварки выше четырех приводит к проникновению армирующих частиц в зону соединения и увеличению микротвердости по сравнению с неармированным соединением.

В настоящее время для изготовления различных сварных конструкций из алюминиевых сплавов все больше применяют сварку трением с перемешиванием (СТП, Friction stir welding). СТП получила широкое распространение в авиационной и ракетно-космической промышленности, транспорте, строительстве, судостроении. СТП представляет собой процесс получения сварного соединения посредством нагрева металла до пластического состояния в результате трения между вращающимся инструментом и материалом заготовки [1]. Инструмент для СТП состоит из заплечика и наконечника, погружаемого в стык заготовок (рисунок 1). Вращающийся с высокой скоростью инструмент благодаря приложенному усилию внедряется в стык соединяемых заготовок, разогревает его и перемещается вдоль линии сварного соединения. При своем движении по заданной траектории инструмент перемешивает размягченный металл по всей толщине свариваемых кромок, что приводит к соединению заготовок [1].

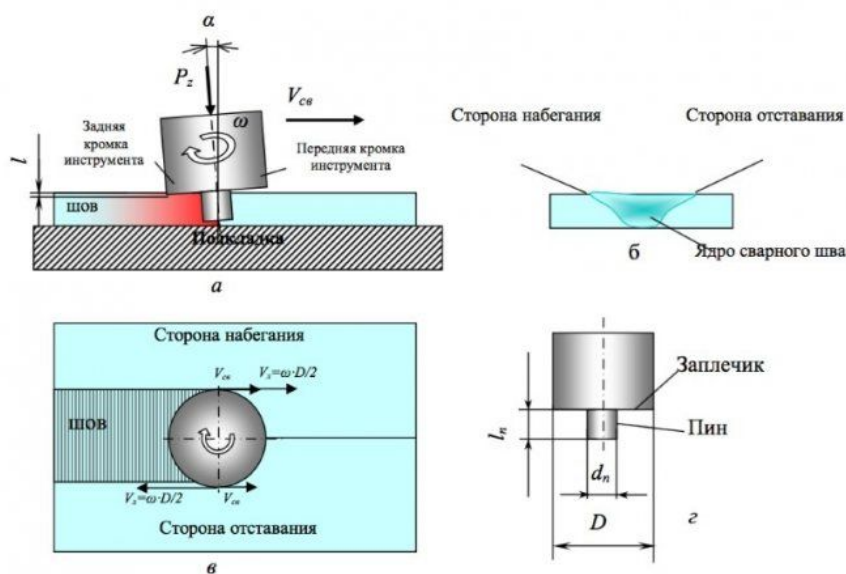


Рисунок 1 – Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Различают сторону набегания, где направление вращения и продольного перемещения инструмента совпадают, и сторону отхода, где они направлены противоположно.

Параметрами, определяющими процесс СТП, являются скорость продольного перемещения, скорость вращения инструмента и сила прижима инструмента к заготовке. Повышение скорости вращения и уменьшение скорости продольного перемещения приводят к выделению большего количества тепла, за счет чего металл сильнее нагревается и становится более пластичным. Необходимо соблюдать оптимальный режим СТП, т.к. перегрев металла может привести к прожогу заготовки. С другой стороны, недостаточный нагрев металла может повлечь за собой образование пустот в области шва, а в некоторых случаях даже вызвать поломку инструмента [2].

СТП по сравнению со сваркой плавлением обладает следующими преимуществами: низкое потребление энергии, автоматизация процесса, низкие требования к подготовке кромок под сварку, отсутствие ультрафиолетового излучения и токсичных паров, отсутствие пористости, горячих трещин, разбрызгивания металла. СТП позволяет получить швы большой глубины и длины с низким уровнем остаточных напряжений. СТП для многих материалов можно проводить без применения защитных газов и присадочных материалов. Главным недостатком СТП является необходимость закрепления заготовки к специальному опорному столу, что затрудняет применение данной технологии в сварке определенных крупногабаритных конструкций.

На рисунке 2 представлены зоны сварного шва, формирующиеся при СТП. Зона основного металла находится на значительном расстоянии от области сварки, поэтому не претерпевает ни теплового воздействия, ни пластической деформации. Металл в зоне термического воздействия испытывает только тепловое воздействие, отражающееся на его микроструктуре и механических свойствах. Зона термомеханического воздействия подвергается нагреву и пластической деформации, но в этой зоне не развивается динамическая рекристаллизация. Зона перемешивания подвержена более сильному нагреву пластической деформации, и в ней развивается динамическая рекристаллизация [3].

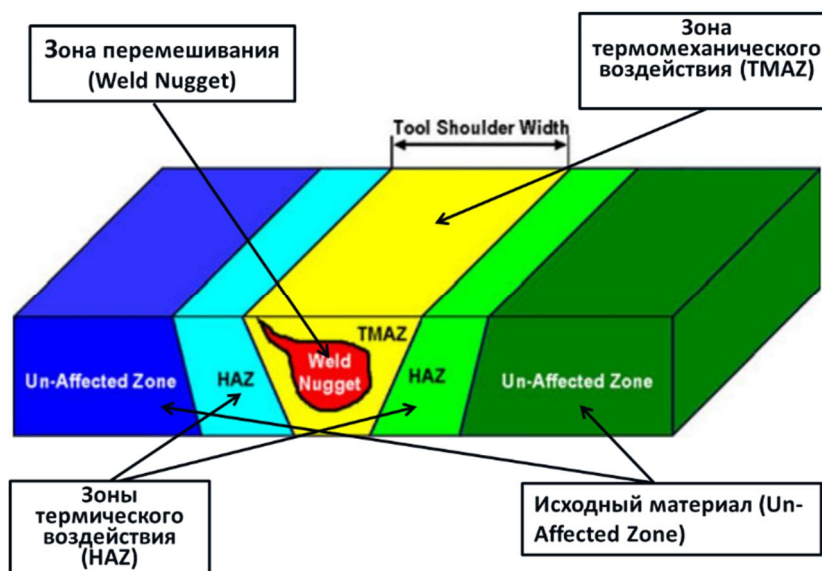


Рисунок 2 – Схематичное изображение микроструктурных зон соединения после СТП

Одним из основных способов улучшения свойств материалов является создание композитов. Композиты представляют собой материалы, состоящие из мягких металлических матриц с внедренными в них армирующими элементами в виде частиц, нитей, волокон или хлопьев более прочного материала [4]. За счет добавления

армирующего элемента можно получить композиционный материал с увеличенной прочностью, износостойкостью, жаропрочностью, магнитными свойствами и др.

СТП можно использовать не только для соединения заготовок, но и для создания упрочненного соединения. В этом случае в место контакта свариваемых заготовок вводят армирующие частицы. В качестве армирующих частиц при СТП алюминиевых сплавов могут выступать порошки оксидов металлов Ti, Fe, Cu, Zr, Cr [5].

Целью данной работы было исследовать влияние количества проходов инструмента на формирование композита Al+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при СТП внахлест листов алюминиевого сплава.

Использовали два листа алюминиевого сплава 6063 толщиной 3 мм и мелкодисперсный порошок Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В верхнем листе на фрезерном станке вырезали 6 канавок шириной 1 мм, глубиной 1,5 мм и длиной 90 мм. Расстояние между канавками составляло 1,5 мм. Далее в эти канавки насыпали и плотно утрамбовывали порошок Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Под лист с порошком подкладывали такой же лист без канавок. Для того чтобы закрыть канавки с порошком применяли предварительную СТП с помощью заплечика без наконечника. Далее проводили основную СТП с выдвинутым на 2 мм наконечником. Количество проходов составляло 2, 4, 10 и 20.

Макроструктуру и микротвердость исследовали на шлифах, вырезанных на электроискровом станке поперек плоскости шва. Измерения микротвердости по Виккерсу проводили на микротвердомере МВТ-71У4.2 с нагрузкой в 50 г и временем выдержки 10 с. Микротвердость измеряли вдоль линии, расположенной на расстоянии около 1 мм от поверхности контакта с инструментом.

Макроструктуры сварных соединений приведены на рисунке 3. Видно, что после 2 проходов частицы распределены только в верхнем листе. После 4 проходов армирующие частицы проникли в нижний лист металла. С увеличением числа проходов до 10 и 20 наблюдается увеличение глубины проникновения частиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в нижний лист.



Рисунок 3 – Соединения, полученные СТП после: (а) – 2 проходов, (б) – 4 проходов, (в) – 10 проходов, (г) – 20 проходов

На рисунке 4 представлены распределения микротвердости в зоне соединения в зависимости от количества проходов инструмента.

Как видно из рисунка, в композитах Al+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> микротвердость сварного шва в области перемешивания выше примерно на 15 HV по сравнению со швом, полученным без добавления армирующих частиц. Наиболее равномерное распределение твердости удалось получить после 4 проходов сварки. Проведенный эксперимент показал, что армирующие частицы в области сварного шва повышают микротвердость соединения. Изменяя продольную скорость перемещения, число оборотов и длину наконечника инструмента,

можно уменьшить количество проходов, необходимых для улучшения качества композитного сварного соединения алюминиевого сплава.

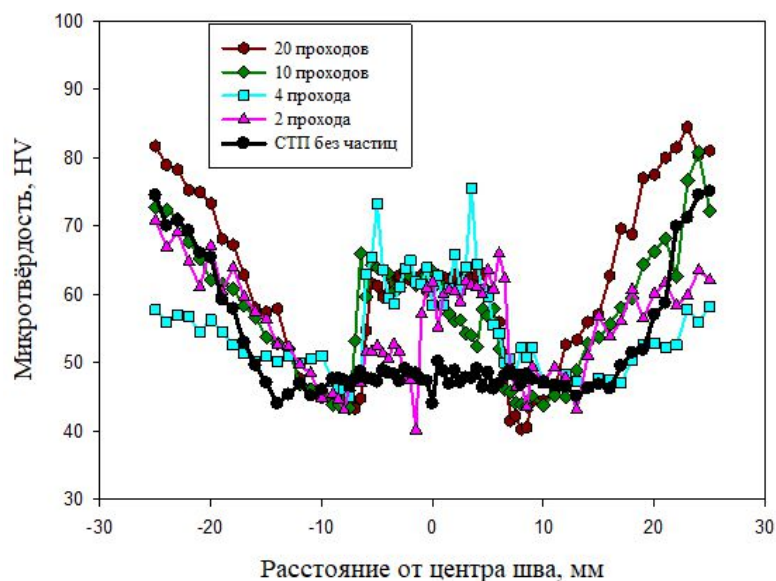


Рисунок 4 – Распределение микротвердости в зоне соединения после СТП

Выбранный нами сплав 6063 является стареющим, поэтому после сварки требуется провести упрочняющую термообработку на старение. Старение необходимо для увеличения микротвердости сварного шва в зоне перемешивания до уровня микротвердости основного металла. На следующем этапе работы предполагается исследовать закономерности старения швов, полученных методом СТП.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в соответствии с Государственным заданием ИПСМ РАН (№ АААА-А19-119021390106-1). Работа выполнена на базе Центра коллективного обслуживания «Структурные и физико-механические исследования материалов» Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

#### Список использованных источников.

1. Ахунова А.Х., Валеева А.Х., Имаев М.Ф. Сварка трением с перемешиванием листовых заготовок из сплава Д16 // Эволюция дефектных структур в конденсированных средах: Сборник тезисов XVI Международной школы-семинара, Барнаул, 07–12 сентября 2020 года / Под редакцией М.Д. Старостенкова. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2020. – С. 150.
2. Влияние длины наконечника инструмента на упрочнение алюминиевого сплава Д16 при обработке трением с перемешиванием / А.Х. Валеева, А.Х. Ахунова, Д.Б. Кабирова [и др.] // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11. – № 2(42). – С. 119-124.
3. Mcnelley T. R., Swaminathan S., Su J.Q. Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys // Scripta Materialia. – 2008. – Vol. 58. – No 5. – P. 349-354.
4. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Thermodynamic Stability of Intermetallic Compounds in Technical Aluminum // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2014. – Vol. 7. – No 2. – P. 132-137.
5. Valeeva A.Kh., Imayev M.F. Evaluation of the thermodynamic possibility of in-situ composites fabrication in aluminum-metal and aluminum-metal oxide systems through friction stir processing // Письма о материалах. – 2021. – Vol. 11. – No 4(44). – P. 544-547.



УДК 621.791.052

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СТАЛИ 20 НА СТОЙКОСТЬ К КОРРОЗИИ

Вафина А.В., Тюсенков А.С

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Данная работа была направлена на выявление лучших механических свойств сварных соединений. Для этого проводились исследования изменений электродного потенциала металла сварных соединений при использовании ручной дуговой и полуавтоматической сварки. По результатам проведенных измерений было выявлено, что лучшие механические свойства сварных соединений обеспечивает полуавтоматическая сварка проволокой ЕМК 6D и E71T1.

Понятие «коррозионная стойкость стали» означает способность металла противостоять появлению ржавчины.

Коррозионная стойкость стали зависит от ее химического состава, структуры, состояния поверхности, механических напряжений, концентрации и температуры агрессивной среды, а также от скорости ее движения. Все эти факторы существенно влияют и на особенности коррозии металла сварных соединений.

Сварное соединение представляет собой многоэлектродную короткозамкнутую электрохимическую систему, макроэлектродами которой являются сварной шов.

Макронеоднородность металла сварного соединения можно оценить по величине средних значений электродных потенциалов каждой зоны, а микронеоднородность – по величине локальных электродных потенциалов в пределах рассматриваемой зоны. Показателем макроэлектрохимической неоднородности сварного соединения является при этом разность начальных электродных потенциалов тех или иных зон.

Методика исследований заключалась в регистрации и анализе изменения электродного потенциала металла различных участков поверхности сварных соединений. Эксперименты проводили на плоских образцах из стали 20. С помощью вольтметра измеряли значения электродных потенциалов поверхности образцов.

По результатам проведенных измерений построили графики распределения значений электродного потенциала по сечению сварных соединений.

На рисунке 1 представлен график распределения значений электродного потенциала в соединениях, сваренных ручной дуговой сваркой электродами ОЗЛ-6, ЛБ-52 и МР-3.

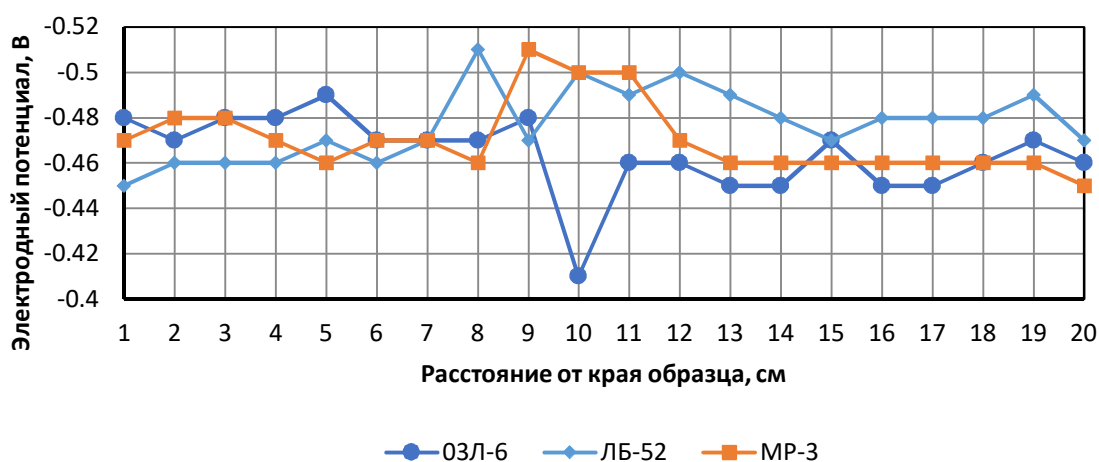


Рисунок 1 – Значения электродного потенциала по сечению образцов, сваренных ручной дуговой сваркой (сварной шов – точка 10)

Из рисунка 1 следует, что соединения, сваренные электродами всех марок, не являются электрохимически однородными. В электропроводящей среде это может привести к развитию контактной коррозии.

На рисунке 2 представлено распределение значений электродного потенциала в соединениях, сваренных полуавтоматической сваркой проволокой EMK 6D и E71T1.

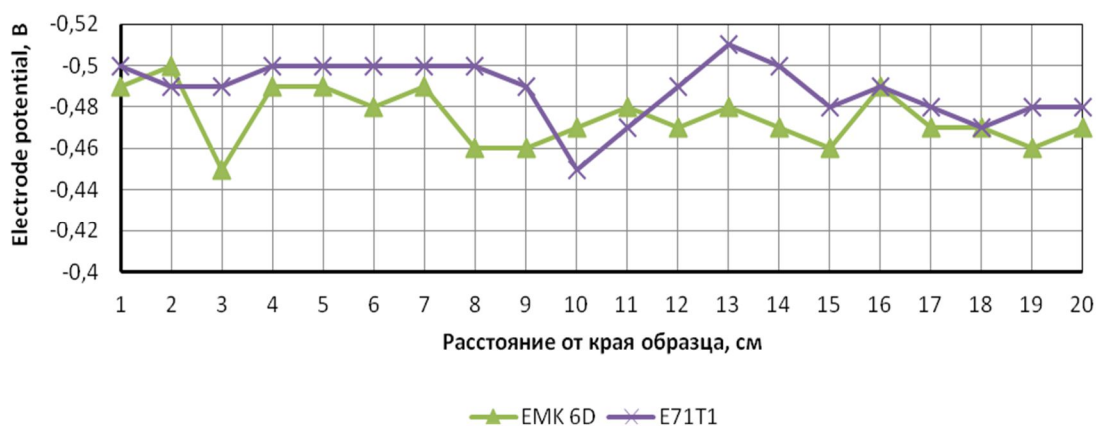


Рисунок 2 – Распределение значений электродного потенциала по сечению образцов, сваренных полуавтоматической сваркой (сварной шов – точка 10)

Соединения, сваренные полуавтоматической сваркой проволокой EMK 6D и E71T1, являются более электрохимически однородными по сравнению с образцами, сваренными ручной дуговой сваркой.

Далее измерение электродного потенциала металла сварных соединений проводили по аналогичной методике в модельной среде, имитирующей по составу пластовую воду одного из нефтяных месторождений. По результатам измерений получили зависимость электродного потенциала от локации на поверхности сварных соединений.

На рисунке 3 представлено распределение значений электродного потенциала в модельной среде на соединениях, сваренных ручной дуговой сваркой электродами ОЗЛ-6, ЛБ-52 и МР-3.

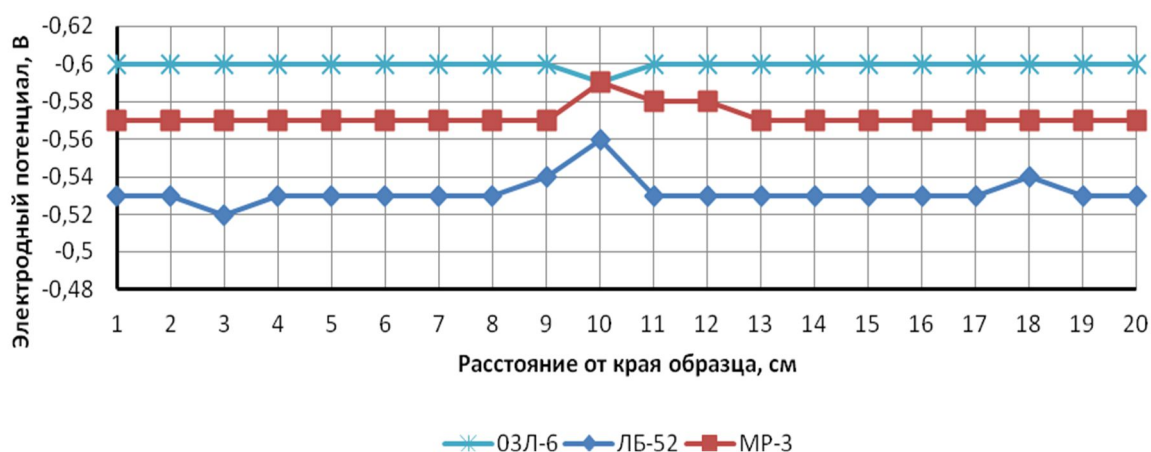


Рисунок 3 – Распределение значений электродного потенциала в модельной среде для образцов, сваренных ручной дуговой сваркой (сварной шов – точка 10)

Электроды ЛБ-52 и МР-3 не обеспечивают электрохимическую однородность металла соединений: сварной шов в обоих случаях является анодом и будет растворяться в коррозионной среде.

На рисунке 4 представлено распределение значений электродного потенциала в модельной среде в соединениях, сваренных полуавтоматической сваркой проволокой ЕМК 6D и E71T1.

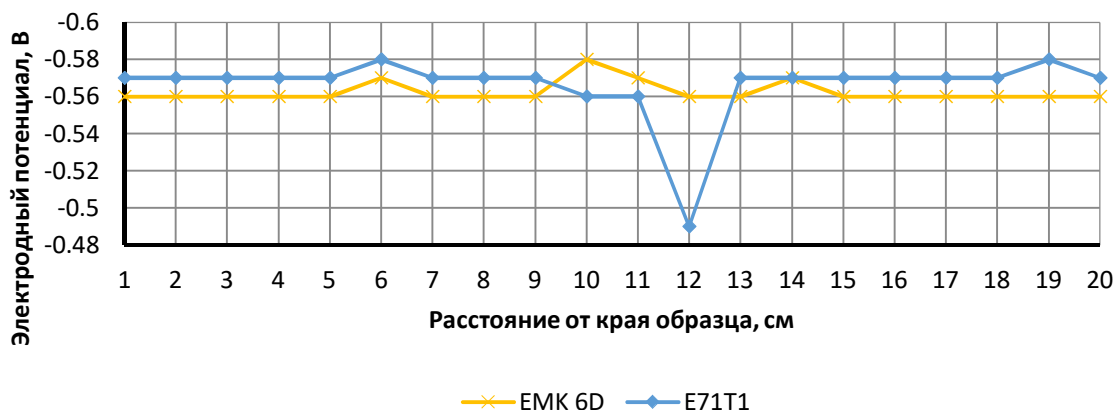


Рисунок 4 – Распределение значений электродного потенциала в модельной среде для образцов, сваренных полуавтоматической сваркой (сварной шов – точка 10)

Соединения, сваренные полуавтоматической сваркой проволокой ЕМК 6D и E71T1, являются более электрохимически однородными по сравнению с образцами, сваренными ручной дуговой сваркой.

На образце, сваренном ручной дуговой сваркой электродом ЛБ-52, наблюдалась максимальная разность потенциалов между сварным швом и основным металлом. Он был помещен на неделю в модельную среду для визуальной оценки скорости коррозии.

Показано, что полуавтоматическая сварка проволокой ЕМК 6D и E71T1 обеспечивает лучшие механические свойства сварных соединений, по сравнению с ручной дуговой сваркой электродами МР-3, ОЗЛ-6 и ЛБ-52.

#### Список использованных источников.

1. Чиркова, А.Г. Предельное состояние трубы змеевика реакционной печи / А.Г. Чиркова, Е.А. Наумкин, А.В. Рубцов, У.П. Гайдукевич // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2007. № 5. - С. 100-105.
2. Махутов, Н.А. Оценка прочности материала трубы змеевика реакционной печи от действия внутреннего давления / Н.А. Махутов, А.Г. Чиркова, А.В. Рубцов, Е.А. Наумкин, У.П. Гайдукевич // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 1. - С. 58-62.
3. Рубцов, А.В. Измерение магнитных характеристик дефектных фрагментов труб змеевика реакционной печи с различным сроком наработки / А.В. Рубцов, Е.А. Наумкин, Н.М. Фахрутдинов // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. Сборник материалов научно-практической конференции. 2015.- С. 100-102.
4. Рубцов, А.В. Разработка метода оценки технического состояния труб змеевиков реакционных печей: дис. канд. техн. наук: 05.02.13 / Рубцов Алексей Вячеславович. – Уфа: УГНТУ, 2007. – 174 с.
5. Ахияров Р.Ж., Бугай Д.Е., Лаптев А.Б. Проблемы подготовки оборотных и сточных вод предприятий нефтедобычи // Нефтепромысловое дело. 2008. № 9. С. 61-65.

УДК 621.791

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА В ПРИСУТСТВИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ТУГОПЛАВКИХ ИНОКУЛЯТОРОВ**Шекшеев М.А., Михайлицын С.В., Сычков А.Б., Кайгородов Г.А.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена исследованию влияния ультрадисперсных тугоплавких частиц TiC на параметры структуры наплавленного металла. Результаты теоретических исследований показали, чтобы частица порошка-инокулятора гарантированно стала центром кристаллизации в широком диапазоне степеней переохлаждения расплава, применительно к низкоуглеродистым и низколегированным сталям, ее размер должен составлять не менее 600 – 700 нм (0,6 – 0,7 мкм). Из анализа экспериментальных данных следует, что с увеличением содержания ультрадисперсного порошка TiC в покрытии электродов (от 0 до 10%) наблюдается уменьшение размеров кристаллитов в наплавленном металле в 8-9 раз и приобретению ими более равновесного состояния (фактор формы увеличился в 2 раза).

Особенностью сварных соединений является неоднородность структуры металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), что приводит к ухудшению механических свойств в локальных участках соединений [1,2]. Под влиянием сварочных напряжений, действующих внутри конструкции, а также влиянием различных внешних факторов может произойти разрушение металла сварных соединений (рисунок 1).

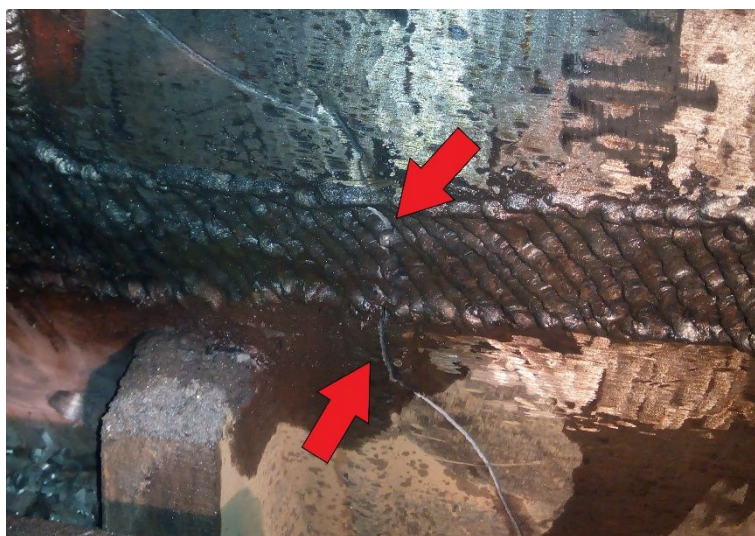


Рисунок 1 – Трещина в сварном соединении стального корпуса конвертера

Перспективным способом улучшения структуры металла шва во время процесса сварки является инокулирование металла сварочной ванны ультрадисперсными частицами тугоплавких материалов [3,4]. Тугоплавкие частицы, попадая в расплав сварочной ванны, играют роль искусственных центров кристаллизации, в результате чего происходит измельчение первичной структуры металла шва [5].

Целью настоящей работы является исследование влияния ультрадисперсных тугоплавких частиц на структурообразование наплавленного металла низкоуглеродистой стали.

В качестве материала-инокулятора был выбран монокарбид титана TiC, так как обладает высокой температурой плавления, а также кристаллической решеткой изоморфной кристаллизующемуся металлу сварочной ванны низкоуглеродистой стали.

Помимо физико-химических свойств материала-инокулятора важным параметром является размер частиц порошка. Для эффективного процесса инокулирования желательно, чтобы размеры частиц обладали размером не менее  $r_k$ . Под  $r_k$  понимается критический размер зародыша кристаллизующегося металла. Если фактический размер частицы превышает  $r_k$ , то рост кристалла термодинамически возможен [6].

Чтобы количественно оценить параметр  $r_k$  воспользовались формулой известной из литературы [6]:

$$r_k = \frac{2 \cdot (0,01 \cdot \sigma) \cdot T_{пл} \cdot M}{\Delta H_{пл} \cdot \Delta T \cdot \rho}, \quad (1)$$

где

$r_k$  – критический радиус зародыша, м;

$\sigma$  – поверхностное натяжение расплава на границе с газом, мДж/м<sup>2</sup>;

$T_{пл}$  – температура плавления, °С;

$M$  – молярная масса сплава, г/моль;

$\Delta H_{пл}$  – скрытая теплота плавления, Дж/моль;

$\Delta T$  – степень переохлаждения, °С;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

В качестве параметра размера зародыша (частицы) был принят его критический диаметр  $d_{кр} = r_k \times 2$ . Результаты расчета  $d_{кр}$ , в зависимости от степени переохлаждения расплава, для нескольких марок сталей приведены на диаграмме (рисунок 2).

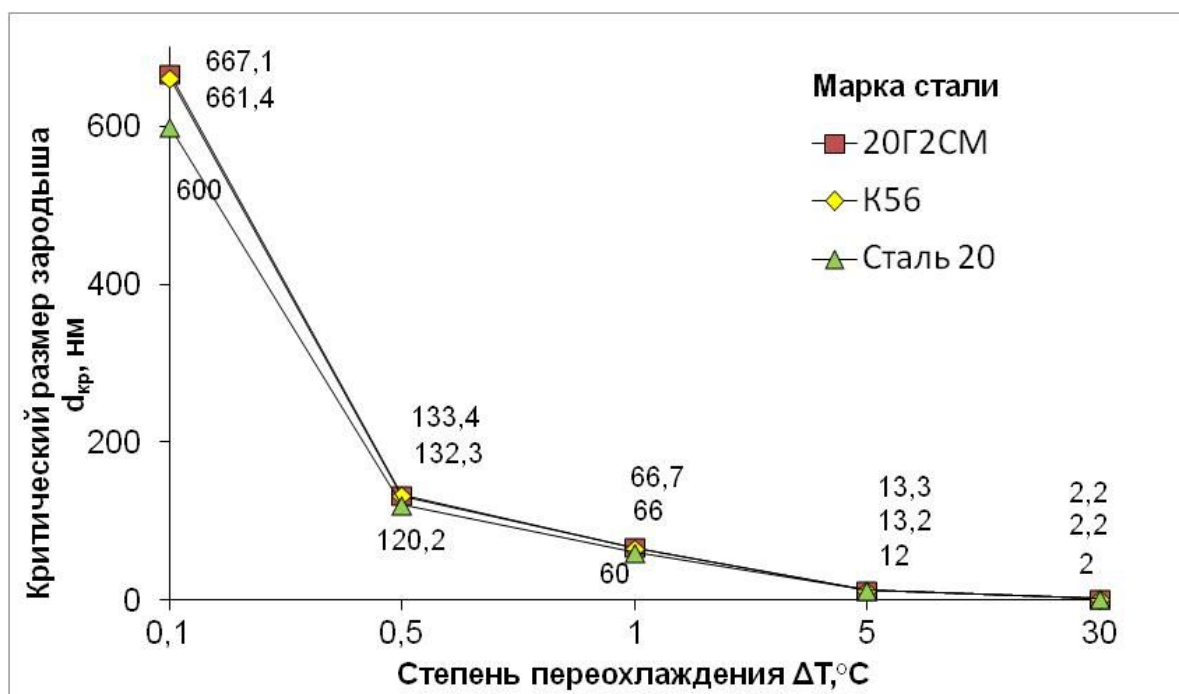


Рисунок 2 – Размеры критического зародыша в зависимости от степени переохлаждения для различных марок стали

Из анализа данных следует, чтобы частица порошка-инокулятора гарантированно стала центром кристаллизации в широком диапазоне степеней переохлаждения расплава,

применительно к низкоуглеродистым и низколегированным сталям, ее размер должен составлять не менее 600 – 700 нм (0,6 – 0,7 мкм).

Для экспериментальных исследований использовали порошок TiC с размером частиц 0,5 – 8 мкм (рисунок 3). Порошок вводили в расплав сварочной ванны через электродное покрытие основного типа в количестве 1, 5, 10% от массы сухой шихты покрытия, при этом один из составов покрытия порошка TiC не содержал. Наплавку производили на пластины из стали 20 на токе 100 А обратной полярности.

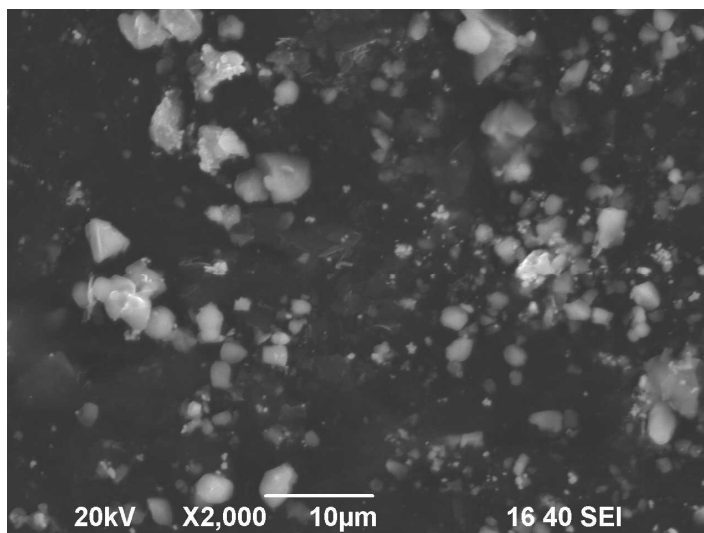
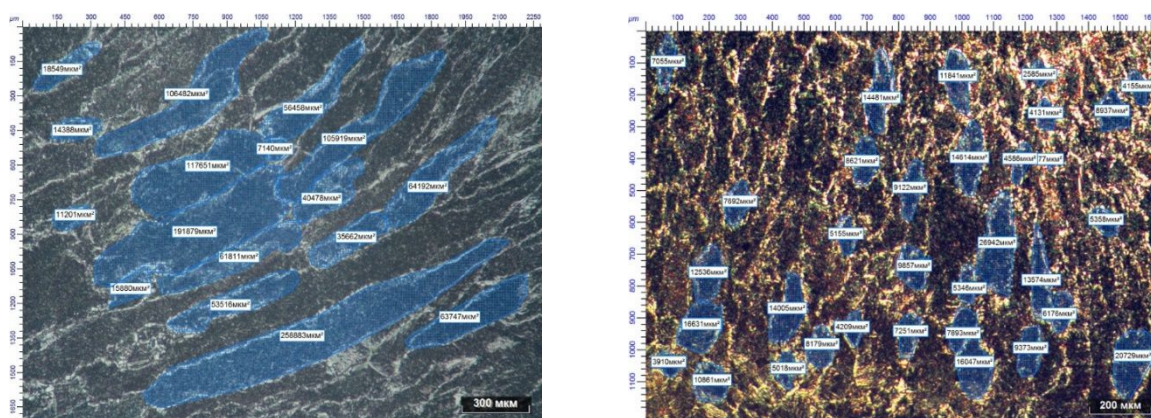


Рисунок 3 – Порошок монокарбида титана TiC

Металлографические исследования показали, что в наплавленном образце, не содержащем частиц TiC, наблюдаются крупные столбчатые кристаллы, окруженные сеткой периферийного феррита (рисунок 4а). В образцах, содержащих инокулирующий порошок TiC, наблюдается измельчение первичной структуры металла, при этом кристаллиты приобрели более равновесное состояние (рис. 4б).



а

б

а – образец, не содержащий инокулятор,  
 б – образец, наплавленный электродами, содержащими 10% инокулирующей добавки (от массы сухой шихты)

Рисунок 4 – Структура наплавленного металла

Инокулирующий эффект оценивали по площади сечения кристаллов, измеренной по границам ферритной сетки, а также по параметру фактора формы, который определяли с помощью системы анализа изображений Thixomet Pro. Результаты количественного

анализа структуры наплавленного металла обобщены в виде диаграммы и представлены на рисунке 5.

Из анализа данных следует, что с увеличением содержания ультрадисперсного порошка TiC в покрытии электродов (от 0 до 10%) наблюдается уменьшение размеров кристаллитов в наплавленном металле в 8-9 раз и приобретению ими более равновесного состояния (фактор формы увеличился в 2 раза).

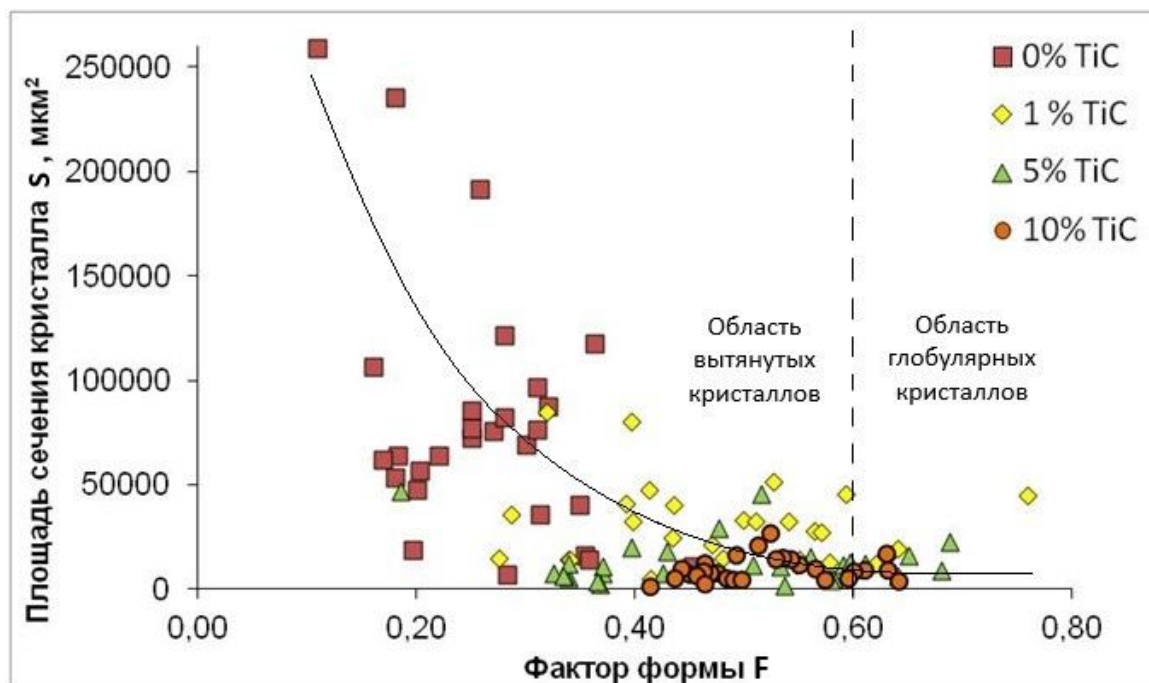


Рисунок 5 – Соотношение площади сечения кристаллов и фактора формы при различном содержании TiC в покрытии электрода

#### Список использованных источников.

1. Особенности структуры и свойства сварных швов трубной стали, выполненных электродами различных марок /Зверева И.Н., Картунов А.Д. и др. // Сварочное производство. 2017. № 11. С. 37-40.
2. Особенности изменения структуры и твердости металла зоны термического влияния при сварке малоуглеродистых высокопрочных сталей для труб с повышенной деформационной способностью / Ефименко Л.А., Капустин О.Е. и др. // Metallurg. 2022. № 7. С. 58-63.
3. Sokolov G.N., Zorin I.V., Artem'ev A.A., Elsukov S.K., Dubtsov Y.N., Lysak V.I. Thermal- and wear-resistant alloy arc welding depositions using composite and flux-cored wires with TiN, TiCN, and WC nanoparticles // Journal of Materials Processing Technology. 2019. V. 272. P. 100-110.
4. Феноменологическая модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак и др. // Вопросы материаловедения. - 2015. - № 4. - С. 159-168.
5. Исследование влияния шлаковой системы покрытых электродов на эффективность инокулирования металла сварочной ванны низкоуглеродистой стали / Шекшеев М.А., Михайлицын С.В. и др. // Черные металлы. 2022. № 5. С. 68-73.
6. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 542 с.

## РОБОТИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.791.01

### ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕХНОЛОГИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ СПЛАВА ЭП718

Медведев А.Ю.<sup>1</sup>, Никифоров Р.В.<sup>1</sup>, Галимов В.Р.<sup>2</sup>, Муругова О.В.<sup>2</sup>, Бадертдинов Д.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, г.Уфа

**Аннотация.** Статья посвящена отработке технологии роботизированной сварки плавящимся электродом стыковых соединений из жаропрочного сплава ЭП718 с поперечными колебаниями электрода и анализу микроструктуры сварных соединений. Обосновано снижение количества сварочных проходов для конструкций узлов авиационных двигателей со сложной пространственной геометрией и большим количеством сварных швов для уменьшения уровня остаточных сварочных напряжений. Проведены испытания сварных образцов на растяжении при комнатной и повышенной (650<sup>0</sup>С) температурах. Рассмотрена и проанализирована возможность получения мелкозернистой структуры околошовной зоны сварных соединений для повышения стойкости против образования горячих трещин.

**Введение.** В настоящее время жаропрочные сплавы на основе никеля являются основой для изготовления деталей и узлов «горячей части» газотурбинных двигателей (ГТД). Для изготовления высоконагруженных элементов силовых конструкций (детали летательных аппаратов, сварные кольцевые детали, силовые детали корпуса турбины, детали компрессора), работающих во широких климатических условиях при температурах до 700<sup>0</sup>С (кратковременно до 800<sup>0</sup>С), используют жаропрочный никелевый сплав ХН45МВТЮБР (далее ЭП718). Химический состав сплава ЭП718 представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплав ЭП718

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Nb	Ti	Al	W	Fe	S	P
≤0,1	≤0,3	≤0,6	14- 16	4- 5,2	43- 47	0,8- 1,5	1,9- 2,4	0,9- 1,4	2,5- 3,5	Остаток	≤0,01	≤0,012

Основными видами сварки, применяемыми в настоящее время для изготовления корпусных деталей и узлов газотурбинных двигателей (далее ГТД) в авиа и двигателестроении, традиционно является ручная аргодуговая сварка неплавящимся электродом с присадочной проволокой (далее АрДС) и электронно-лучевая сварка (далее ЭЛС). Мелкозернистое строение шва имеет место при сварке высококонцентрированными источниками тепла, такой как ЭЛС. Однако, высокая трудоемкость подготовки кромок для ЭЛС изделий ответственного назначения, которыми и являются рассматриваемые узлы авиационного двигателя.

Ручная АрДС металла толщиной 4-5 мм осуществляется на малых скоростях, разделка заполняется за 3 и более прохода, что способствует росту размера зерна в ОШЗ за счет многократного нагрева и повышает вероятность образованию горячих трещин. Снизить склонность к образованию трещин в ОШЗ при АрДС можно за счет применения в качестве присадочных материалов сварочных проволок и электродов, обеспечивающих получение металла шва с меньшим содержанием упрочняющей фазы, и более высокой деформационной способностью, чем у основного металла. Это существенно снижает механические характеристики сварных соединений при рабочих температурах [3].



Вследствие этого, для снижения склонности металла вышеуказанных толщин к трещинообразованию для крупногабаритного узла ГТД, необходимо:

- 1) снизить количество проходов или уменьшить вводимую за проход погонную энергию при сварке;
- 2) обеспечить процесс сборки изделия с сохранением постоянства сварочного зазора по стыку.

Вышеперечисленные мероприятиями позволят снизить скорость роста зерна, сузить интервал падения пластичности в температурных интервалах хрупкости и минимального уровня остаточных напряжений в ОШЗ. Таким образом получаемая структура металла способна обеспечить повышение стойкости сварных соединений против образования трещин при высоких температурах [5]. По сравнению с ручной АрДС такими преимуществами процесса обладает автоматическая сварка плавящимся электродом с поперечными колебаниями.

В качестве исследуемого сплава в работе был выбран железоникелевый сплав ЭП718 с зерном 3-5 баллов в состоянии поставки, но являющимся ограниченно свариваемым и склонным к образованию как горячих, так и трещин при термообработке [4].

Целью данной работы является разработка технологии роботизированной сварки плавящимся электродом с поперечными колебаниями узла авиационного двигателя со сложной пространственной геометрией с множеством сварных швов, предусматривающей снижение количества проходов сварного шва с 3-х до 2-х и, как следствие, приводящей к уменьшению уровня остаточных сварочных напряжений по сравнению с базовой технологией.

Методика проведения исследования. Сварка плавящимся электродом осуществлялась на роботизированном комплексе, в состав которого входили: робот ABB IRB 1600 с блоком управления IRC 5, источник питания EVOMIG 350 с синергетическим управлением, приспособление для сварки листовых заготовок с подачей аргона с обратной стороны шва. В качестве листовых заготовок использовали сплав ЭП718 толщиной 5 мм в состоянии поставки. Присадочная проволока – ЭП533 Ø 1,2 мм в состоянии поставки. Сварка проводилась с поперечными колебаниями горелки относительно траектории шва в 2 прохода. Параметры режима сварки показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры режима сварки

Ручная АрДС (ЭП718, 5мм)	Роботизированная СПЭ (ЭП718, 5мм)	
	1 проход	2 проход
2-3 прохода	1 проход	2 проход
Непрерывной дугой	Импульсный режим	Импульсный режим
$I = 60 \dots 80 \text{ А}$	$I = 90 \text{ А}$	$I = 90 \text{ А}$
$U = 10 \dots 12 \text{ В}$	$U = 16 \text{ В}$	$U = 16 \text{ В}$
-	$V_{\text{св}} = 20,5 \text{ м/ч}$	$V_{\text{св}} = 12 \text{ м/ч}$
-	$V_{\text{пп}} = 120 \text{ м/ч}$	$V_{\text{пп}} = 120 \text{ м/ч}$
$Q_{\text{к}} = 10 \text{ л/мин}$	$Q_{\text{к}} = 5 \text{ л/мин}$	$Q_{\text{к}} = 5 \text{ л/мин}$
$Q_{\text{Г}} = 20 \dots 22 \text{ л/мин}$	$Q_{\text{Г}} = 20 \dots 22 \text{ л/мин}$	$Q_{\text{Г}} = 20 \dots 22 \text{ л/мин}$
$q_{\text{п}} = 360 \text{ кДж/м}$	$q_{\text{п}} = 250 \text{ кДж/м}$	$q_{\text{п}} = 430 \text{ кДж/м}$

Номинальный зазор между свариваемыми пластинами составлял 1,0 мм. Подготовка свариваемых кромок осуществлялась на фрезерном станке. Перед сваркой использовалась прихватка по торцам пластин с последующим выборкой до высоты 1 мм [7].

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 1 показаны макрошлиф 2-х проходного сварного шва, выполненного присадочной проволокой ЭП533 (а), и внешний вид лицевой стороны шва после 1-го (б) и 2-го проходов (в).

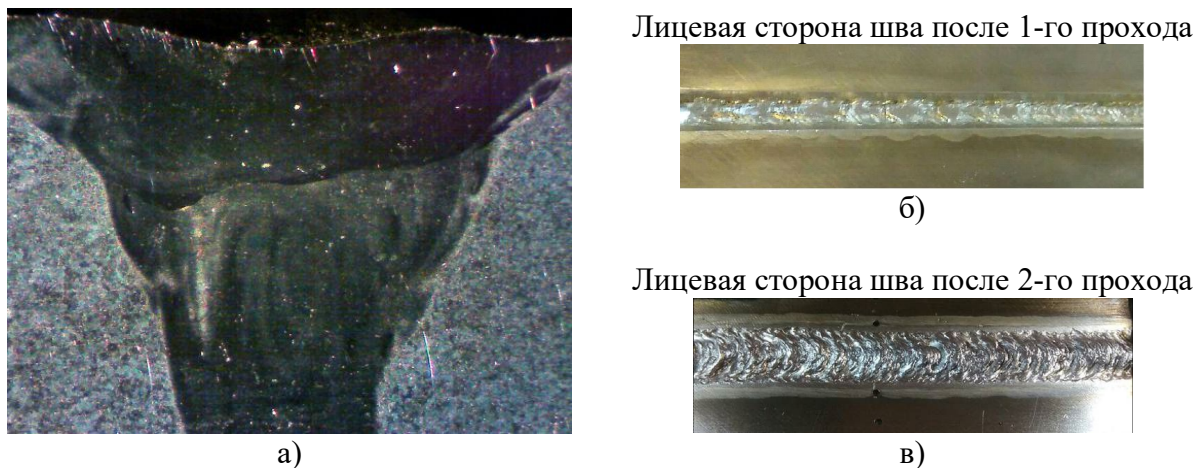


Рисунок 1 – Макрошлиф 2-х проходного сварного шва, выполненного присадочной проволокой ЭП533 (а), и внешний вид лицевой стороны шва после 1-го (б) и 2-го проходов (в)

По макрошлифу образца на рисунке 1а четко видна линия сплавления. Благодаря использованию поперечных колебаний горелки удалось добиться минимальной высоты облицовочного валика шва, как это видно на Рисунке 1, в. При этом рентгенографический контроль сварных соединений показал отсутствие дефектов в сварном шве и ЗТВ. Дефекты также не были выявлены по результатам изучения микроструктуры сварных соединений с увеличением  $\times 50$ .

На рисунке 2а показана микроструктура ОШЗ после 1-го прохода. Микроструктура ОШЗ представляет собой частично переплавленный нагартованный в результате фрезерования слой, размер зерен которого меньше размера зерна основного металла в 5-7 раз и составляет 5-10 мкм. При этом протяженность ОШЗ не превышает 50-100 мкм.

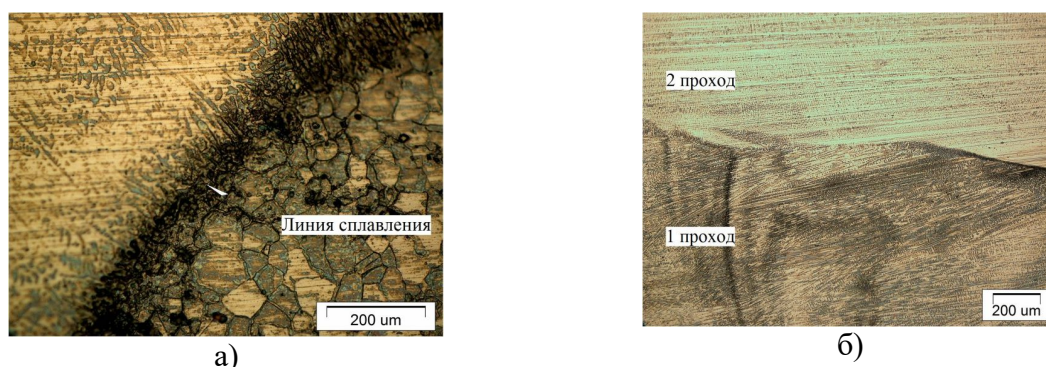


Рисунок 2 – Микроструктура ОШЗ после 1-го прохода (а) и сварного шва (б)

Как видно из рисунка 2б в 1-м проходе сварного шва была получена в основном дезориентированная измельченная структура, что, скорее всего, вызвано постоянным перемешиванием расплавленного металла сварочной ванны в результате поперечных колебаний и термомеханической вибрации расплава, осуществляемой при импульсно-дуговой сварке. Во 2-м проходе структура более равноосная, что вероятнее всего вызвано

повышением жесткости сварного соединения после 1-го прохода и в результате перехода от объемной схемы кристаллизации к плоской [1, 4].

Таким образом, внедрение роботизированной сварки плавящимся электродом с поперечными колебаниями при сварке сплава ЭП718 толщиной 5 мм взамен ручной АрДС позволяет снизить количество проходов с 3 до 2-х при уменьшении вводимой погонной энергии на 31%.

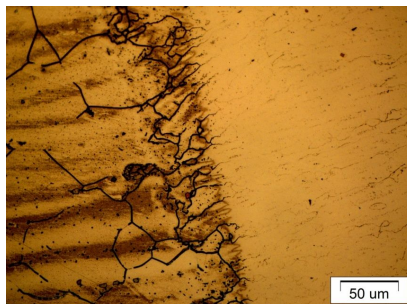
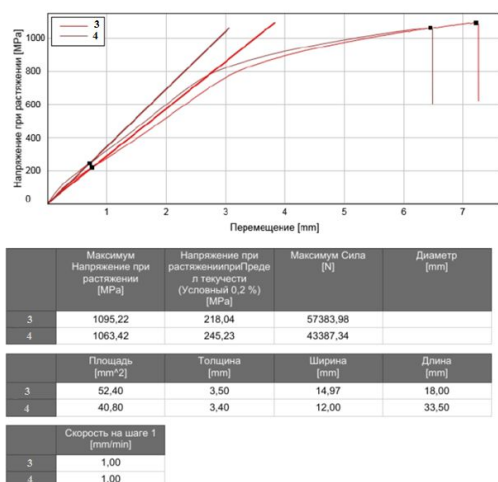


Рисунок 3– Микроструктура ОШЗ после термообработки по рекомендованному ВИАМ режиму

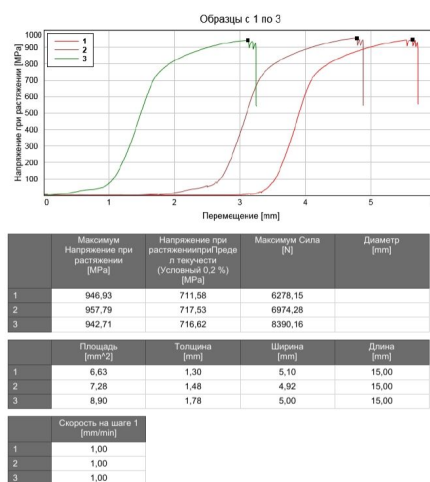
На рисунке 3 показана микроструктура ОШЗ после термообработки. Термообработку проводили в Центре коллективного пользования УГАТУ по рекомендованному ВИАМ режиму для сплава ЭП718 – закалка при температуре 1050°C + двойное старение (780°C/5ч.+650°C/16ч.) [2].

Анализ микрошлифов после термообработки также показал отсутствие дефектов как в сварном шве, так и в ОШЗ. Изучение металлографии ОШЗ после термообработки по указанному режима показало увеличение размера зерна в 2-3 раза, чем после сварки, размер зерна при этом составил порядка 10-30 мкм.

Испытания на растяжение при комнатной и повышенной температурах. Испытания проводились на образцах типа XII по ГОСТ 6996-66 в состаренном состоянии на электромеханической измерительной системе для проведения статических испытаний Instron 5982. На рисунке 4 показаны результаты механических испытаний образцов после испытаний при комнатной и повышенной (650°C) температурах.



а)



б)

Рисунок 4 – Образцы после испытаний при комнатной температуре (а,б) результаты механических испытаний сварных образцов ЭП718 при комнатной температуре на измерительной системе Instron 5982 (в)

Среднее арифметическое значение предела прочности при нормальной температуре составило 1056 МПа. Среднее арифметическое значение предела прочности при 650°C составило 949 МПа.

**Выводы:**

1. Внедрение роботизированной сварки плавящимся электродом с поперечными колебаниями при сварке сплава ЭП718 толщиной 5 мм взамен ручной АрДС позволяет снизить количество проходов с 3 до 2-х при уменьшении вводимой погонной энергии на 31%.
2. В 1-м проходе сварного шва была получена в основном дезориентированная измельченная структура, во 2-м - более равноосная. Рентгенографический контроль сварных соединений показал отсутствие дефектов. Дефекты также не были выявлены по результатам изучения микроструктуры сварных соединений при оптическом увеличении  $\times 50$ .
3. Микроструктура ОШЗ представляла собой частично переплавленный нагартованный в результате фрезерования слой, размер зерен которого меньше размера зерна основного металла в 5-7 раз и составлял 5-10 мкм. При этом протяженность ОШЗ не превышала 50-100 мкм.
4. Анализ снимков рентгенографического контроля сварных швов и микрошлифов после термообработки также показал отсутствие дефектов как в сварном шве, так и в ОШЗ. Получение подобной мелкозернистой структуры при сварке в ОШЗ должно повысить стойкость сварных соединений против образования трещин при 650-800°C.
5. Результаты испытаний на растяжение свидетельствуют о том, что сварные соединения обеспечивают прочность при нормальной температуре на уровне 1050°C, так и при повышенной температуре (650°C) – 950 МПа.

#### **Список использованных источников.**

1. Сорокин Л.И. Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч1. // Сварочное производство. 2003. №4.
2. Сорокин Л.И. Оценка сопротивляемости образованию трещин при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч1. // Сварочное производство. 2003. №7.
3. Сорокин Л.И. Оценка сопротивляемости образованию трещин при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч1. // Сварочное производство. 2003. №12.
4. Сорокин Л.И. Образование горячих трещин в околошовной зоне при сварке жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Ч1. // Сварочное производство. 2005. №8.
5. Якушин Б. Ф. Разработка научных основ и способов обеспечения технол. прочности сварных соединений крупногабаритных конструкций из сталей и сплавов ограниченной свариваемости: 05. 03. 06: дис... на соискании доктора технических наук / Якушин Б. Ф.; МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М., 2000. - 414 л. - Библиогр.: л. 414 с.
6. Теория свариваемости сталей и сплавов: [монография] / Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф.; ред. Макаров Э. Л. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. - 487 с.: ил. - Библиогр. в конце гл. ISBN 978-5-7038-3938-6.
7. Оценка влияния оснащенности роботизированной сварочной ячейки на допустимый диапазон изменения сборочных параметров /А. Ю. Медведев, В. Р. Галимов, В. М. Прилипко [и др.]. - Текст: электронный //Нефтегазовое дело: электрон. науч. журнал. - 2022. - № 3. - С. 62-76. - DOI 10.17122/ogbus-2022-3-62-76.

УДК 621.791.01

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ СВАРЩИКОВ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3DLD**

Панков В.В., Панков С.В., Богородский И.Г.

ООО «ДИЦ «МОСТ», г. Волгоград

**Аннотация.** Предложена методика оценки практических навыков сварщика в основу, которой положен принцип сравнения формы поверхности сварного шва, выполненного сварщиком, с расчетным (виртуальным) эталоном. Виртуальный эталон рассчитывается по формуле- объективно и однозначно определяет бездефектную форму поверхности сварного шва при сварке плавлением в любом пространственном положении с заданными значениями его ширины, площади и физической константы — капиллярной постоянной. Виртуальный эталон не подвержен влиянию субъективных факторов и времени, как его материальный аналог, а его расчет не зависит от места проведения оценки. Цифровая реплика формы поверхности сварного шва получается посредством сканирования лазерным сканером поверхности реального сварного соединения, а результат сканирования сохраняется в электронном виде.

В основу метода оценки практических навыков сварщика по технологии 3DLD положен принцип сравнения формы поверхности сварного шва, выполненного сварщиком, с расчетным (виртуальным) эталоном. Преимущества от «виртуализации» эталона очевидны: он не подвержен влиянию субъективных факторов и времени, как его материальный аналог, а его расчет не зависит от места проведения оценки.

Авторами в 2012г. была выдвинута гипотеза о существовании бездефектной, эталонной формы поверхности сварного шва. Эталон формы сварного шва формализован интегро-дифференциальным уравнением. Рассчитанный по формуле эталон объективно и однозначно определяет бездефектную форму поверхности сварного шва при сварке плавлением в любом пространственном положении с заданными значениями его ширины, площади и физической константы — капиллярной постоянной.

Термины и определения.

В настоящей методике используются следующие термины и определения:

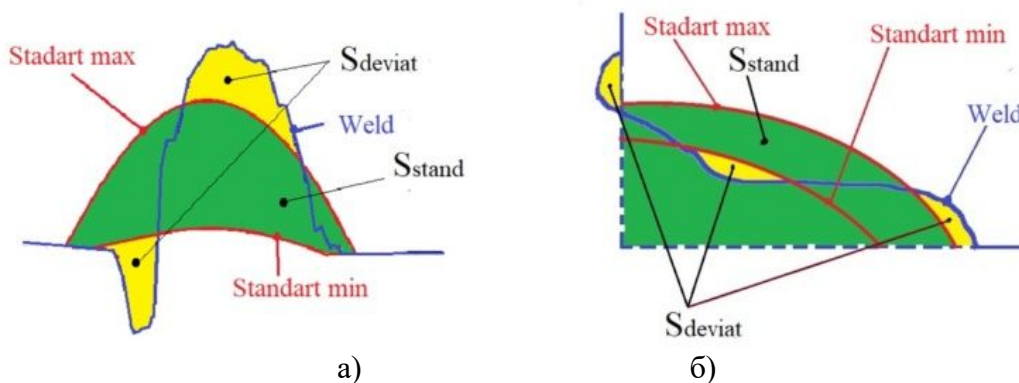
ИКС (WQI) – индекс квалификации сварщика, определяемый по технологии 3DLD. Цифровые значения ИКС (WQI) могут быть от 0 до 100.

КСС – контрольное сварное соединение, выполненное сварщиком.

Практические навыки сварщика - способность сварщика формировать лицевую и корневую поверхность сварного шва, заданных: размеров, сварочных материалах, пространственном положении при сварке, характеризующиеся цифровым индексом WQI;

Технология 3DLD – процедура оценки практических навыков сварщика по форме лицевой и корневой поверхности сварного шва, основанная на сравнении цифровых реплик формы поверхности сварного шва, полученных лазерным сканированием с эталонами, рассчитанными по физико-математической модели (рисунок 1).

Цифровая реплика формы поверхности - координаты точек поверхности сварного шва, измеренные с использованием лазерного сканирования и записанные в электронном виде.



а) для стыкового шва, б) для углового шва.

Рисунок 1 – Схема сравнения цифровой реплики формы сварного шва с эталоном

#### Цель методики

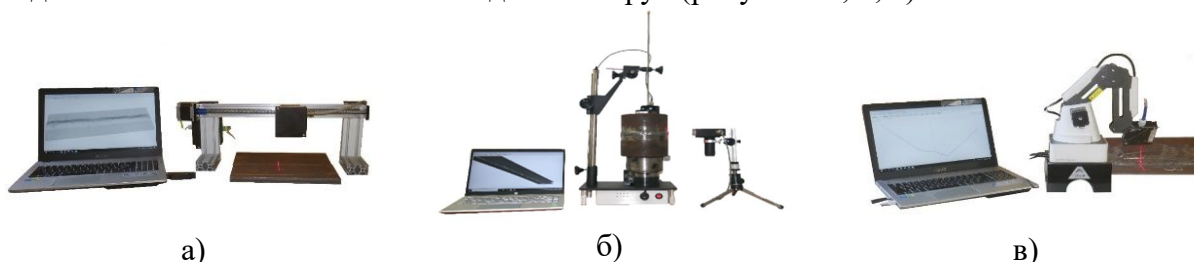
Настоящая методика разработана в целях:

- объективной и достоверной оценки практических навыков сварщиков, характеризуемой цифровым индексом квалификации сварщика ИКС (WQI);
- обеспечения прослеживаемости уровня практических навыков сварщиков в процессе их трудовой деятельности или обучения;
- определение победителей и рейтинга конкурсантов при проведении соревнований (конкурсов) сварщиков различного статуса.

Порядок оценки практических навыков.

После выполнения сварщиком практического задания (сварка КСС) в соответствии с требованиями, прописанными в технологической карте или Technical file, WPS, КСС подлежат сканированию лазерным сканером /2/.

Перед сканированием в программу необходимо ввести исходные данные, необходимые для определения ИКС (WQI) сварщика, после этого автоматически выполняется сканирование лицевой и корневой (при наличии) поверхности сварного шва КСС, с применением оборудования для лазерного сканирования стыкового или углового соединения пластин и стыкового соединения труб (рисунок 2а, б, в).



а) – лицевой и корневой поверхности стыкового сварного шва пластин;  
 б- лицевой и корневой поверхности стыкового сварного шва труб;  
 в- лицевой поверхности углового шва пластин.

Рисунок 2 – Оборудование для лазерного сканирования КСС

После окончания сканирования программа автоматически визуализирует на мониторе компьютера цифровую реплику лицевой и корневой (при наличии) поверхности сварного шва КСС, выполненного сварщиком (рисунок 3а, б, в). Данные сканирования сохраняются в электронном виде для каждого сварщика.

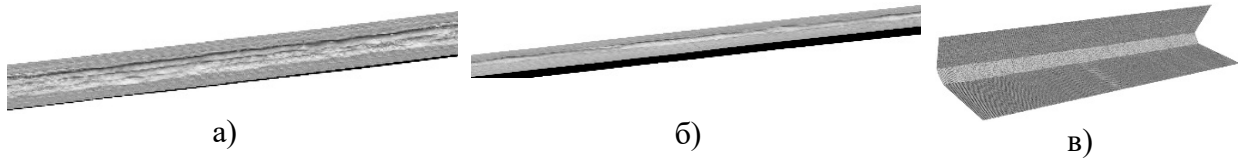


Рисунок 3 – Визуализация цифровой реплики лицевой (а), корневой (б) поверхности стыкового сварного шва и лицевой (в) поверхности углового сварного шва КСС.

Определение ИКС (WQI) выполняется программой автоматически по формуле:

$$WQI = \frac{100}{N} \sum_{j=1}^N \left( 1 - \frac{S_j^{DEVIAT}}{S^{STAND}} \right)$$

где

WQI – индекс квалификации сварщика;

$N = Lw/dLw + 1$  – количество измеренных сечений сварного шва с шагом измерения;

$dLw \geq 1$  мм;

Lw – длина сварного шва;

j – номер текущего значения, измеренного поперечного сечения сварного шва;

$S^{STAND}$  – площадь эталона.

$S_j^{DEVIAT}$  – абсолютное отклонение площади j - го сечения поверхности сварного шва от площади эталона, которое определяется по формуле:

$$S_j^{DEVIAT} = \int_0^B Z_j^{DAVIAT}(x) dx ,$$

где

$Z_j^{DEVIAT}(x)$  – абсолютная величина отклонения формы поверхности сварного шва в j-ом сечении от внешней и внутренней формы эталона, которая определяется по формуле:

$$Z_j^{DEVIAT}(x) = \begin{cases} Z^{STANDmin}(x) - Z_j^F(x) & \text{при } Z_j^F(x) < Z^{STANDmin}(x) \\ Z_j^F(x) - Z^{STANDmax}(x) & \text{при } Z_j^F(x) > Z^{STANDmax}(x) \\ 0 & \text{при } Z^{STANDmin}(x) \leq Z_j^F(x) \leq Z^{STANDmax}(x) \end{cases}$$

B – ширина сканирования в интервале от 2 до 70мм;

$Z_j^F(x)$  – измеренные значения координат поверхности j – го поперечного сечения сварного шва с шагом  $dx = 0,1 \dots 0,5$ мм;

Z, x – координаты в системе координат ZOX;

$Z^{STANDmax}(x)$  – кривая, определяющая внешнюю форму эталона сварного шва;

$Z^{STANDmin}(x)$  – кривая, определяющая внутреннюю форму эталона сварного шва.

Внешнюю  $Z^{STANDmax}(x)$  и внутреннюю  $Z^{STANDmin}(x)$  формы эталонных кривых сварного шва в любом пространственном положении вычисляют в соответствии с установленными в WPS допустимыми значениями ширины (e) и высоты (g) сварного шва с учетом физико-механических свойств расплавленного металла решением интегро-дифференциального уравнения:

$$\frac{d\tau}{dl} = -k_0 + \frac{\cos \delta}{a_k^2} \int_0^l \sin \tau d\lambda$$

где

l – расстояние от начальной точки эталонной кривой до точки расчета измеренное вдоль кривой, значение l изменяются от 0 до L;

L – длина эталонной кривой сварного шва;

dl – шаг дифференцирования вдоль эталонной кривой;

dλ – шаг интегрирования вдоль эталонной кривой;

$\tau(l)$  – угол наклона касательной эталонной кривой к горизонту, в расчетной точке;

$k_0$  – кривизна эталонной кривой сварного шва в начальной точке, определяемая в ходе решения уравнения;

$a_K$  – физико-механическое свойство расплавленного материала сварного шва - капиллярная постоянная.

$\delta$  – угол продольного наклона сварного шва;

$\varphi$  – угол поперечного наклона сварного шва.

$Z(x)$  – уравнение, описывающее эталонные кривые сварного шва, записывается в параметрической форме  $\{Z(l), x(l)\}$  и имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} x &= \int_0^l (\cos \varphi \cos \tau + \sin \varphi \sin \tau) d\lambda \\ Z &= \int_0^l (-\sin \varphi \cos \tau + \cos \varphi \sin \tau) d\lambda \end{aligned} \right\} 0 \leq l \leq L$$

Площадь эталона рассчитывают по формуле:

$$S^{STAND} = \int_0^{\epsilon_{max}} [Z^{STANDmax}(x) - Z^{STANDmin}(x)] dx$$

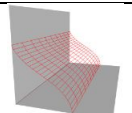
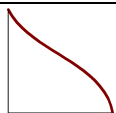
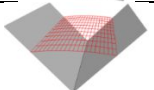
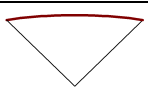
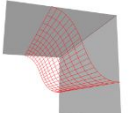

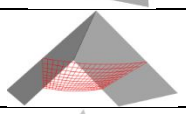
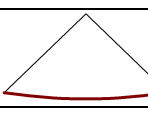
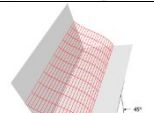
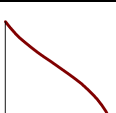
Примеры расчетных эталонных форм стыковых сварных швов приведены в таблице 1, угловых швов в таблице 2.

Таблица 1 – Расчетные эталонные формы стыкового шва

N п/п	Положение стыкового сварного шва	$\delta$	$\varphi$	Расчетная выпуклость g, вогнутость (g <sub>3</sub> ) эталона, мм	Расчетная форма эталона ( $a_K = 5,8$ мм)	
					3D	2D
1	Нижнее (РА)	0	0	2,00		
2	Горизонтальный на вертикальной плоскости (РС)	0	90	2,75(-0,13)		
3	Потолочное (РЕ)	0	180	2,15		
4	Нижнее	45	0	2,02		
5	Горизонтальный на плоскости под углом 45° к горизонту	45	90	2,44		

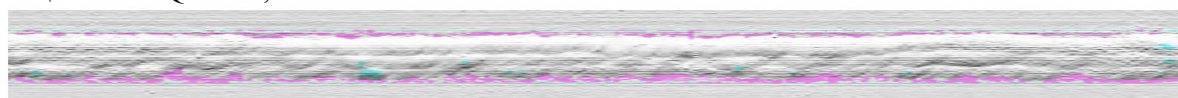


Таблица 2. Расчетные эталонные формы углового шва

№ п/п	Положение углового сварного шва	$\delta$	$\varphi$	Расчетная выпуклость g, вогнутость (g <sub>3</sub> ) эталона, мм	Расчетная форма эталона (a <sub>K</sub> = 4,5мм)	
					3D	2D
1	Нижнее (PB)	0	0	+1,08(-0,38)		
2	Нижнее в «лодочку» (PA)	0	45	+0,51		
3	Потолочное (PD)	0	180	+1,47(-0,76)		
4	Потолочное в «лодочку»	0	225	+0,56		
5	Нижнее	45	0	+0,90(-0,20)		

Программа автоматически определяет WQI и визуализирует отклонения формы поверхности сварного шва от эталона, окрашивая их разными цветами (рисунок 4).

Идентификатор сварщика A212 ● выше эталона ● ниже эталона  
лицо WQI = 96,05



корень WQI = 93,86



Рисунок 4 – Визуализированные отклонения формы поверхностей сварного шва от эталона.

Сертификат оценки практических навыков конкурсанта формирует, распечатывает и подписывает 3DLD эксперт.

**Список использованных источников.**

1. Сайт 3DLD.RU [Электронный ресурс] URL: <https://3dld.ru/?p=1107> (дата обращения 14.10.2022)
2. Панков В.В. Виртуальный эталон формы сварного шва при сварке в различных пространственных положениях для целей оценки квалификации сварщиков. / В.В. Панков, С.В. Панков, И.Г. Богородский, В.М. Букин, // Журнал нефтегазового строительства. – 2014 №4 – с.38-43.
3. Панков В.В. Мера формы сварного шва как основа разработки цифровых технологий оценки качества сварных швов. / В.В. Панков, С.В. Панков, И.Г. Богородский, В.М. Букин, // Журнал нефтегазового строительства. – 2015 №2 – с.20- 26.
4. Патент РФ №2550673 Приоритет RU2013113394/02А, 2013.03.25.

УДК 621.7-5

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ОЦЕНКИ НАВЫКОВ СПЕЦИАЛИСТОВ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Сайгин Д.И., Сибирякова С.О., Хабибуллин Э.С.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Машинное обучение, нейронные сети и искусственный интеллект – технологии, которые находят актуальное применение практически во всех отраслях промышленности. Даже сварочная отрасль, максимально практико-ориентированная, также не обходится без цифровизации. При выполнении сварных соединений требуется вести электрод по определенной траектории, которая должна быть аккуратной и стабильной в своем рисунке. Это во многом зависит от кистемоторных навыков сварщиков. В данной работе предлагается проводить тренировку и тестирование претендентов в специалисты сварочного производства оценивая графический след, выполненный по заданной траектории инструментом, максимально похожим на рабочий инструмент сварщика (электрододержатель или сварочная горелка).

В настоящее время вследствие повсеместного развития вычислительных мощностей и элементной базы, широкое распространение получили так называемые технологии машинного обучения (ML-machine learning). Эти технологии представлены программными продуктами, базирующимися на математических моделях, созданных на основе искусственных нейронных сетей, и выполняющими самые различные функции – от технологии распознавания предметов и лиц на изображениях, до выявления поведенческих моделей пользователей и соответствующих экстремумов в сфере банковских операций. Главной особенностью этих моделей является их «обучаемость» – способность увеличения точности результатов в зависимости от количества представленных заведомо известных пар аргументов и значений исследуемой зависимости, либо подтверждения или опровержения адекватности получаемых значений этой зависимости в ходе «обучения».

В аспекте сварочного производства может представлять интерес такая область применения нейронных сетей, как распознавание рукописного текста. Вследствие схожести зависимости результатов письма и процесса сварки от кистемоторных навыков сварщика, соответствующий анализ графической информации, зафиксированный в виде следа движения электрода, может быть реализован на идентичных алгоритмах. Таким образом, в рамках предложенной концепции предполагается создание математической модели на базе искусственной нейронной сети для анализа графического изображения следа конца электрода с выводом коэффициента качества, определяемого эмпирическим путем в ходе обратной связи в процессе обучения нейронной сети, либо коэффициента корреляции с известным параметрическим уравнением кривой.

Как и большинство ручных производственных процессов в цифровую эпоху, сварка в последнее время усовершенствуется и трансформируется благодаря таким технологическим концепциям, как автоматизация производства. При этом для описания технологического процесса требуется математическая модель, которая состоит из большого количества констант и переменных.

Так при электродуговой сварке сварщик совершает электродом сложные движения в трех основных направлениях: поступательном – вдоль оси электрода; прямолинейном – вдоль оси шва; колебательном – поперек оси шва для прогрева кромок. К выполнению вертикальных, горизонтальных, потолочных швов предъявляются разные требования к положению электрода и его движению, скорости сварки, параметрам тока, постоянству длины дуги, качеству формирования шва.

Существуют различные виды колебательных (поперечных) движений конца электрода, траектории которых должны быть стабильными. Это точность выполнения этих движений

зависит от хорошей кистевой моторики специалиста [1]. Основные линии движения конца электрода показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Виды колебательных (поперечных) движений конца электрода

Траектории по ломаной зигзагообразной линии применяют при выполнении наплавки на поверхность. Линии полумесяцем применяют для стыковых швов со скосом кромок или угловых швов в любом пространственном положении. Линии треугольников, а также линии с петлеобразными задержками позволяют лучше проплавливать те места, в которых электрод задерживается – либо корень шва, либо кромки.

В данной работе выдвигается гипотеза о возможности оценки способностей специалистов сварочного производства в том числе по стабильности выполняемой линии, имитирующей движение электрода. Практическое применение этой концепции довольно многогранно – от систем обучения сварочному мастерству с обратной связью, но без воздействия вредных факторов производства, до систем контроля общего физического состояния и кистевой моторики действующих рабочих с соответствующим допуском на место производства работ [2].

В данном случае возникает ряд задач, которые требуется решить:

- разработка механизма выполнения траектории для оценки кистемоторных навыков;
- экспертная оценка качества выполняемой траектории;
- анализ корреляции кистемоторных навыков и квалификации специалиста.

В качестве механизма выполнения траектории предлагается создавать графический след инструментом максимально приближенным к сварочным головкам, например, графическим инструментом, зажатым в электрододержателе [3].

Актуальным на сегодняшний день является разработка экспертной оценки выполненного графического следа и присвоение ему некоторого цифрового индекса. Для этого требуется анализ соответствия копии рисунка, выполненного кандидатом в сварщики, с контрольным типовым рисунком и оценка склонности человека к выполнению сварочных операций. В связи с этим поставлена задача оптического распознавания графического образа и присвоение ему определенных характеристик. Система присвоения графическому объекту определенного индекса связана в первую очередь с параметрическим описанием этого объекта и оценкой корреляционной сходимости с эталонным объектом.

При распознавании образов используют метод перебора, анализ характеристик образа. При методе перебора выполняется сравнение исходных данных с базой данных, где для каждого вида объектов приведены разные модификации образа. Например, для оптического распознавания образов применим метод перебора вида объекта под различными углами,

масштабами, смещениями, деформациями и т. д. Для букв нужно перебирать шрифт, свойства шрифта и т. д.

При анализе изображения возможно использовать метод поточечного процентного сравнения с эталоном. Предварительно создается исходная база эталонов изображений, далее выполняется сравнение рассматриваемого изображения с заготовленной базой эталонов изображений – если совпадение больше отметки, принятой за критерий, то полагают образ распознанным. При оптическом распознавании анализ характеристик образа выполняется определением различных геометрических характеристик. Звуковой образец подвергается частотному, амплитудному анализу и т. д. Один из методов – это инвариантные (постоянные) числа. Из геометрии образов выделяются некоторые числа, постоянные относительно размера и поворота образов, далее составляется таблица соответствия этих чисел конкретному образу. Примеры инвариантных чисел – число Эйлера, эксцентриситет, ориентация (в смысле расположения главной оси инерции относительно чего-нибудь тоже инвариантного).

Таким образом, оцифровка графических следов, выполненных обучающимися или уже опытными специалистами в условиях, приближенных к реальным, позволит проводить квалификационную оценку его кистемоторных навыков. Использование нейросетей для распознавания и определения индекса соответствия добавит экспертности оценке и позволит избежать субъективности.

#### **Список использованных источников.**

1. Гизитдинов, Р. М. Разработка цифровой платформы и организационно-технических мероприятий для проведения открытых конкурсов профессионального мастерства в области сварки / Р.М. Гизитдинов, А.М. Файрушин // 71-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ : Материалы 71-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ. В 2-х томах, Уфа, 26 апреля – 06.05.2020 года. Том 1. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2020. – С. 330. – EDN UDYQNJ.

2. Марьина, И. С. Разработка организационно-управленческих решений по мотивации персонала сварочного производства / И. С. Марьина, А. М. Файрушин // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ., Уфа, 28–30 апреля 2022 года. Том 1. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 430. – EDN CRABGJ.

3. Файрушин, А. М. Повышение эффективности входного контроля сварщиков при строительстве опасных производственных объектов / А. М. Файрушин, И. А. Марченко, В. С. Хазиев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2020. – № 6. – С. 58-72. – DOI 10.17122/ogbus-2020-6-58-72. – EDN DYQHMO.

УДК 621.791.03

**О ВОЗМОЖНОСТИ РОБОТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРИВАРКИ ТРУБ  
В ТРУБНЫЕ РЕШЕТКИ КОЖУХОТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

Мансуров Д.И., Туманова Е.Ю., Медведев А.Ю.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Одной из трудоемких операций изготовления кожухотрубчатых теплообменных аппаратов является приварка труб в трубную решетку. Данный узел обладает рядом особенностей, позволивших сделать гипотезу о повышении производительности данного процесса при его роботизации. Подробно рассмотрены требования к последовательности выполнения сварных соединений «труба-трубная решетка», установленные в действующей нормативной документации, как основа численного моделирования и разработки технологии роботизированной сварки этого узла.

Кожухотрубчатые теплообменные аппараты широко применяются в нефтеперерабатывающей промышленности. Конструкции данных теплообменников обладают рядом преимуществ для реализации тепловых процессов нефтяных фракций. Важным требованием к надежности данных аппаратов является эффективная работоспособность узла «труба-трубная решетка». Данный узел должен обеспечивать прочное и герметичное соединение. Под прочностью соединения «труба-трубная решетка» понимается способность соединения выдерживать осевые усилия, возникающие в процессе работы аппарата, без относительного осевого смещения трубы и трубной решетки. Под герметичностью соединения «труба-трубная решетка» понимается способность соединения выдерживать давление теплоносителя без протечек, для предотвращения смешения двух тепловых потоков в аппарате.

Узел «труба-трубная решетка» отличается рядом характерных особенностей [1,2]:

- один из элементов с тонкой толщиной стенки (труба);
- положение сварного шва вертикальное;
- траектория сварного шва короткая по замкнутой линии;
- большое количество подобных сварных швов в одном аппарате (от 100 до 2000 швов).

Кроме этого, к выполнению данного узла накладывается требование соблюдения определенной последовательности приварки труб к трубной решетке. Требование к последовательности приварки труб обозначено в ГОСТ Р 55601-2013 следующим выражением: «Для комбинированных соединений, во избежание коробления трубных решеток, сварку ведут «вразбивку», так чтобы уже приваренные трубы были равномерно распределены по всей поверхности решетки в течение всего процесса сварки. Очередную трубу приваривают на участке, где решетка уже остыла». Это требование накладывает дополнительную сложность на выполнение данного сварного соединения – сварщику требуется контролировать температуру узла и задумываться о последовательности выполнения сварных швов на трубной решетке [3].

Таким образом, выполнение узла приварки всех труб в трубную решетку достаточно трудоемкая операция для выполнения ее специалистом сварщиком, но достаточно простая с точки зрения роботизации. Для роботизированной сварки нет дополнительной сложности от положения сварного шва, его формы или необходимости соблюдения определенной последовательности выполнения. Поэтому выдвигается гипотеза, что роботизация выполнения узла приварки труб в трубную решетку позволит повысить его производительность и эффективность. Роботизация сократит время выполнения за счет проработанного и записанного в программный код робота алгоритма последовательности выполнения сварных швов. Роботизация повысит надежность данного узла за счет сохранения стабильного качества узла, даже при замкнутой короткой траектории и вертикальном положении соединения. Для выполнения сварных швов человеком

траектория и положение сварного соединения могут снижать надежность выполнения сварного соединения, поскольку выполнять шов по замкнутой короткой траектории сложнее, чем по прямолинейной траектории, а выполнять шов на вертикальной плоскости сложнее, чем в нижнем положении.

Требования к выполнению узла «труба-трубная решетка» также обозначены в нормативных документах отраслевого характера. В ОСТ 26-02-1015-85 установлены три типа сварных соединений для данного узла: С1, С2 и С3, отличающиеся формой разделки кромок и наличием разгрузочной канавки вокруг каждой трубы. В нормативном документе установлены размеры канавки и минимальной ширины перемычки трубной решетки в зависимости от размера труб. Также данный нормативный документ устанавливает то, что сварку следует производить неплавящимся или плавящимся электродом в среде защитных газов на вертикальной плоскости или в нижнем положении, причем вариант сварки в нижнем положении является предпочтительным. Но в силу значительной длины труб, чаще сварку данного узла проводят на вертикальной плоскости, размещая сам трубный пучок горизонтально. Также в нормативном документе определены требования к сварочным материалам и соединениям, которые должны соответствовать ОСТ 26-291.

Следующими нормативными документами, определяющими требования к соединению «труба-трубная решетка» являются СТО 00220368-014-2009, выпущенный ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры» и СТО 02066380-001-2019, выпущенный научно-производственным учебным техническим центром ФГБОУ ВО СПбГМТУ, оба из которых опираются на ОСТ 26-02-1015-85. В СТО 00220368-014-2009 большое внимание уделено вопросам развальцовки: требованиям к выполнению и контролю герметичности.

Требования к сварке и особенно к последовательности выполнения сварных соединений узла «труба-трубная решетка» более подробно раскрыты в СТО 02066380-001-2019. В данном документе уточняются виды сварных швов данного соединения, которые приведены на рисунке 1. А также уточняется, что могут применяться все виды промышленной сварки за исключением газовой. Для центровки труб в отверстиях решетки перед сваркой рекомендуется развальцевать концы труб конической вальцовкой, в нормативном документе установлен запрет на применение «прихваток» для закрепления трубы в решетке, поскольку в этом случае в процессе сварки будет невозможно замкнуть шов без образования поры и соединение окажется негерметичным [4].

Порядок изготовления комбинированных соединений (сварка с развальцовкой) в СТО 02066380-001-2019 предлагается следующий:

1) Для центровки труб развальцевать концы труб в трубной решетке в любой удобной последовательности;

2) С целью уменьшения вероятности деформации трубной решетки сварку труб следует проводить вразнобой, небольшими группами (по 10-30 соединений, в зависимости от диаметров труб и их количества в аппарате), последовательно переходя от одного участка трубной решетки к другому, не допуская местного перегрева решетки и не начиная сварочных работ на участке до тех пор, пока он не остынет до температуры, не превышающей  $+50^{\circ}\text{C}$ , или до температуры подогрева (если сварка производится с подогревом трубной решетки). Деление трубной решетки на участки, количество участков и последовательность перехода от одного участка к другому определяет специалист. Пример деления трубной решетки на участки и последовательность сварки показаны на рисунке 2.

Таким образом, опираясь на рекомендации нормативного документа 2019 года будет разработана последовательность выполнения сварных соединений узла «труба-трубная решетка», которая станет основой алгоритма для роботизированной ячейки и пилотного выполнения сварки узла и отладки технологии [5].

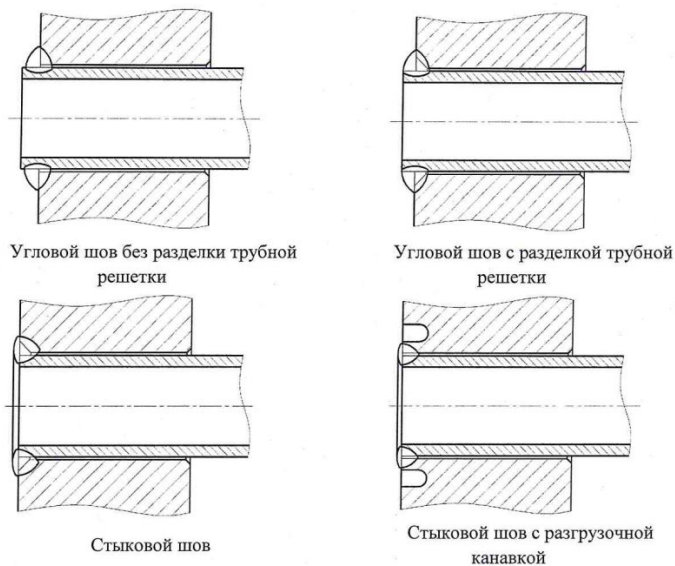


Рисунок 1 – Виды сварных швов

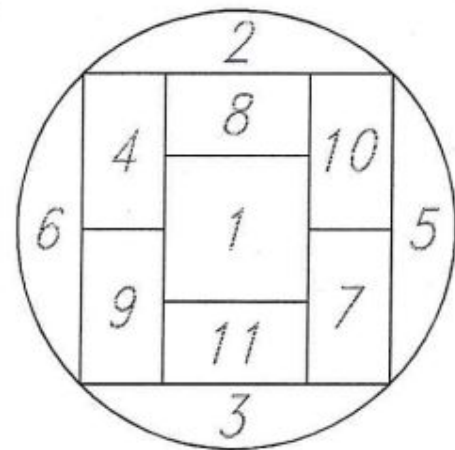


Рисунок 2 – Рекомендуемая схема деления трубной решетки на участки

Опираясь на вышеизложенные факты поставлены следующие задачи, необходимые для разработки технологии изготовления узла соединения труб с трубной решеткой в кожухотрубчатом теплообменнике:

- 1) Разработать технологическую карту сварного соединения, в которой установить технологию и режим сварки;
- 2) Разработать последовательность выполнения сварки соединений в узле, для заданного размера трубной решетки и размера труб;
- 3) Выполнить численное моделирование тепловых полей узла труб в трубной решетке для обоснования последовательности и определения степени остаточных напряжений и деформаций.
- 4) Выполнить технико-экономическое обоснование роботизации процесса изготовления узла соединения труб и трубной решетки.

**Список использованных источников.**

2. Эффективность использования альтернативных технологий при изготовлении комбинированных соединений труб с трубными решетками / А. В. Яхин, Д. В. Каретников, Р. Г. Ризванов, А. С. Токарев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2020. – № 7. – С. 36-39. – EDN HLGHNV.
3. Туманова, Е. Ю. Моделирование трубного пучка спиральновитого теплообменного аппарата / Е. Ю. Туманова, Р. Б. Зайнуллина, Р. А. Байгильдин // Нефтегазовое дело. – 2021. – Т. 19. – № 2. – С. 121-126. – DOI 10.17122/ngdelo-2021-2-121-126. – EDN ZEEEMW.
4. Об использовании терминов "трубная решётка" и "трубная доска" / А. М. Файрушин, Р. Г. Ризванов, Д. В. Каретников [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2019. – Т. 17. – № 1. – С. 78-84. – DOI 10.17122/ngdelo-2019-1-78-84. – EDN VWHYLO.
5. Сравнительный анализ сварных швов в узле "труба-трубная решетка" кожухотрубчатого теплообменного аппарата из жаропрочной стали 15X5М полученных различными способами сварки / Р. Ф. Тукаев, И. Г. Ибрагимов, А. М. Файрушин, А. В. Сисанбаев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2013. – № 5. – С. 363-375. – EDN RTQAVB.
6. Токарев, А. С. Применение альтернативных технологий при ремонте комбинированных соединений труб с трубными решетками / А. С. Токарев, Д. В. Каретников, А. М. Файрушин // Сварочное производство. – 2022. – № 3. – С. 31-36. – EDN MQWKNJ.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 621.791:378.014

### **ПЕРСПЕКТИВЫ БОЛОНСКОГО ПРОЦЕССА В РОССИЙСКОМ ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ**

Коробцов А.С.

Донской государственной технический университет, г. Ростов-на-Дону

**Аннотация.** Проанализирована результативность проведённых в стране образовательных реформ с позиции качества инженерного образования. Проведено сопоставление идеологических положений, положенных в основу Болонского процесса и ключевых положений международных стандартов ISO серии 9000. Отмечено, что российские дипломы признаться в других европейских странах не стали, а добиться гармонизации учебных программ не удалось даже в рамках страны. Сомнительна польза от академической мобильности и интернационализации деятельности вузов. Качество инженерной подготовки после введения двухуровневой система образования только снизилось. Перечислены основные проблемы инженерного образования. Отмечено, что в высшей школе различных процедур и механизмов, направленных на обеспечение качества, много, однако они не отражают содержания и результативности базовых процессов деятельности вузов: образовательного и воспитательного.

Общемировой тенденцией развития рыночной экономики и общества в последние десятилетия было стремление установить единые правила к обязательным требованиям, предъявляемым как к продукции и процессам ее производства и реализации, так и к оказываемым услугам. Этой тенденцией было обусловлено появление в европейском высшем образовании Болонского процесса, в рамках которого планировалось признание в европейском пространстве дипломов всех стран, перейти на одинаковые уровни подготовки (бакалавриат, магистратура) и критерии оценки подготовленности выпускников (компетенции), гармонизировать образовательные программы одинаковых специальностей, повысить мобильность и интернационализацию учебной деятельности европейских вузов. Вступление в Болонский процесс (кстати, как и сертификация систем качества организаций в соответствии с ISO 9001) является добровольным, но если страна вступала, то обязана изменить свои образовательные стандарты в соответствии с общеевропейскими требованиями.

Стоит отметить, что в момент вступления РФ в Болонский процесс значительная часть академической общественности страны не поддерживала это решение. Весьма спорным является и результативность проведённого на государственном уровне реформирования системы инженерного образования.

В данный исторический момент в нашей стране на всех уровнях происходит переосмысление целесообразности того решения и намечается тенденция к созданию национальной системы высшего образования, учитывающей лучшие традиции и наработки советской системы образования. Поэтому особую актуальность приобрёл сейчас классический вопрос: «Что делать?».

Для получения обоснованного ответа на данный вопрос представляется целесообразным проанализировать сначала идеологию, которая была заложена в основу Болонского процесса. Такой анализ становится возможным, если сопоставить ключевые положения общеевропейского процесса с базовыми требованиями и принципами международных стандартов ISO серии 9000 (таблица 1).



Таблица 1 – Сопоставление ключевых положений международных стандартов ISO серии 9000 и Болонского процесса.

№	Основные требования и принципы международных стандартов ISO серии 9000	Ключевые задачи и положения Болонского процесса
1	Результатом обучения должна являться не квалификация, а сформированные компетенции.	Совершенствование качества образовательных программ на основе компетентностного подхода.
2	Ориентация на потребителя и другие заинтересованные стороны, на удовлетворение их ожиданий и потребностей.	Обучение, ориентированное на студента. Формирование в процессе обучения компетенций, необходимых в условиях меняющегося рынка труда.
3	Лидерство руководителя, разработка им целей и направлений текущей деятельности организации.	Высшее руководство должно играть ключевую роль. Разработка им стратегии и программ международного сотрудничества, интернационализации деятельности вуза, мобильности.
4	Системный подход к менеджменту, управление взаимосвязанными процессами, содействующими результативности и эффективности организации при достижении ее цели.	Совершенствование качества обучения на основе интеграции науки и образования (учебных и научно-исследовательских процессов).
5	Постоянное улучшение деятельности организации.	Постоянное улучшение качества программ обучения.
6	Вовлечение работников.	Активное участие студентов и преподавателей в процессе.
7	Применение единых правил установления базовых требований к продукции.	Введение европейских стандартов и рекомендаций на гарантии качества.
8	Принятие решений, основанных на фактах и процессах измерения.	Результат обучения должен основываться на измерении уровня сформированных компетенций.

Сопоставление основных положений данных документов позволяет сделать однозначный вывод, что ключевые положения Болонского процесса – это подписанная министрами образования европейских стран конкретизация базовых требований международных стандартов ISO серии 9000 по управлению качеством продукции к управлению качеством образовательных услуг, предоставляемых высшей школой. И изначально они выглядели, как декларация о намерениях по повышению качества образования, а не конкретный план реальных действий.

Следует также напомнить, что при создании системы академической мобильности в рамках Болонского процесса стареющие европейские страны преследовали свои интересы отобрать и переманить наиболее талантливую молодёжь из восточноевропейских стран.

Очевидно, при анализе целесообразности осуществлённых в стране образовательных реформ необходимо учесть ответы на следующие вопросы. Стали ли наши дипломы признаваться в других европейских странах и добилась ли наша страна гармонизации учебных программ? Какую пользу (или вред) для страны принесла академическая мобильность и интернационализация деятельности вузов? И что принципиально: как повлияла на качество инженерного образования введённая многоуровневая система образования? (Стоит напомнить (табл. 1), что в основе идеологии Болонского процесса было заложено стремление повысить качество высшего образования).

Поэтому сейчас актуальной задачей является необходимость широкого обсуждения вопроса выхода страны из Болонской системы и возможных последствиях такого шага. Именно об этом шла речь на июньском пленарном заседании Государственной Думы РФ, на котором свою позицию высказали министр, ректоры вузов, руководители фракций ведущих партий.

В. Фальков (министр науки и высшего образования) отметил, что академическая мобильность не соответствует интересам нашей страны и зачастую приводила к тому, что мы становились интеллектуальными донорами других стран. Присоединение РФ к Болонской системе не привело и к автоматическому признанию российских дипломов, на

признание которых существеннее влияет наличие двусторонних соглашений между конкретными странами.

В. Садовничий (президент Российского Союза ректоров, ректор МГУ имени М.В. Ломоносова) отметил, что во многих областях знаний получение квалификации магистра за два года без соответствующей базы привело к ухудшению качества образования. Он считает, что приоритетной траекторией развития высшего образования в России является подготовка специалистов для высокотехнологичных отраслей за пять–шесть лет. Эта модель прошла проверку временем. А модель бакалавриата в четыре года преимущественно нужна для обучения иностранных граждан.

Ректор СПбГУ Н. Кропачев обратил внимание на то, что мобильности и единообразия не удалось до сих пор добиться даже в системе высшего образования России.

Г. Зюганов (руководитель фракции КПРФ) отметил, что введение в 2007 году решением с верха в нашей стране системы «бакалавр–магистр» было грубой ошибкой и принималось это решение по идеологическим мотивам правящей элитой.

По словам Л. Слуцкого (руководителя фракции ЛДПР) российское высшее образование стало терять фундаментальность и сейчас у России появился реальный шанс вернуться к лучшей системе образования, которая существовала в нашей стране.

П. Толстой (заместитель Председателя ГД от фракции «Единая Россия») призвал перестать оценивать научные достижения российских учёных по наличию зарубежных публикаций и снижать существующую в настоящее время зависимость от мнения западного научного сообщества.

На слушаниях в Государственной Думе было также отмечено, что сейчас в России возникла совершенно новая реальность для инженерного образования. Из-за введённых санкций наша страна столкнулась с необходимостью восстановить проектирование, производство и обслуживание целого ряда сложных технологических кластеров, продукцию которых мы могли ранее импортировать. Этот вызов требует более продолжительного срока профессиональной подготовки инженерных кадров.

Следует акцентировать внимание, что одной из наиболее актуальных и обсуждаемых на всех уровнях проблем (в том числе на заседании Государственной думы) является качество высшего образования. Его повышение является также одной из главных задач действующей государственной программы развития образования. К повышению качества инженерного образования призывают работодатели и руководители всех уровней. Вузы провозглашают повышение качества ключевой задачей стратегического развития. В последние годы увеличилось финансирование вузов, однако качество не повысилось и, более того, продолжает снижаться. Эксперты Ассоциации инженерного образования России состояние инженерного дела в стране оценивают, как неудовлетворительное [1], а ее председатель Ю.П. Похолков выделяет следующие основные проблемы [2], требующие своего решения:

- качество инженерного образования не отвечает требованиям передовых современных производств, и ситуация ухудшается;
- инженерное образование, к сожалению, перестало играть решающую роль в развитии инженерного дела;
- инженерное образование слабо связано с реальным сектором экономики;
- «суэта и бестолковщина» в организации инженерного образования;
- невысокая престижность в обществе инженерных профессий, менее 25% школьников при сдаче ЕГЭ выбирают физику;
- снижение требований к студентам из-за «подушевого» государственного финансирования вузов.

В этой ситуации возникает резонный вопрос об эффективности функционирования в российской высшей школе существующих механизмов и процедур обеспечения качества образования.

Качество подготовки инженерных кадров зависит от многих групп факторов: содержания основных образовательных программ, человеческого и технического потенциала вуза для достижения цели образования, процесса формирования компетенций выпускников, менеджмента в вузе и ряда других. Их реальное состояние подробно рассмотрено в работе.

Требуемый уровень факторов качества инженерного образования должны гарантировать, очевидно, определённые процедуры и механизмы, к которым следует отнести аккредитацию, аттестацию, лицензирование, стандартизацию, самообследование вузов, создание систем менеджмента качества, комплексное оценивание на основе рейтингов.

Стандартизации в проблеме качества высшего образования уделяется большое внимание во всех странах. Интернациональной тенденцией является создание единой системы обеспечения качества высшего образования и проведение по этой проблеме ежегодных форумов (правда возникают сомнения в их эффективности).

Так, в рамках общеевропейского образовательного пространства назначены органы, ответственные за обеспечение качества высшего образования стран, присоединившихся к Болонскому процессу:

- ENQA (European Network for Quality Assurance in Higher Education) - Европейская ассоциация по обеспечению качества в высшем образовании,
- EUA (European University Association) - Ассоциация европейских университетов,
- EURASHE (European Association for Institutions in Higher Education) - Европейская ассоциация институтов высшего образования,
- ESU (European Student Union) – Европейский совет студентов.

Право на разработку системы стандартов и руководств по обеспечению качества образования было доверено ENQA. Данная ассоциация в рамках программы SOCRATES разработала соответствующие стандарты и руководства (Standards and Guidelines for Quality Assurance in the European Higher Education Area), которые в дальнейшем были рассмотрены и приняты решением Европарламента в виде документа «European Parliament and Council Recommendation on Further European Cooperation in Quality Assurance in Higher Education». Данные стандарты и руководства распространяются на все высшие учебные заведения в вопросах оценки качества и аккредитации вузов. В соответствии с ними образовательные учреждения должны разработать собственную стратегию и процедуры обеспечения качества.

По-видимому, заметного практического вклада в повышение качества российского образования от данных руководств не наблюдается, и выглядят они также как декларации о намерениях.

Для оценки качества инженерного образования в рамках проекта European Accredited Engineer - EUR-ACE (Европейский Аккредитованный Инженер - EUR-ACE) разработаны специализированные стандарты для аккредитации инженерных программ (EUR-ACE Framework Standards for the Accreditation of Engineering Programmers). Данные стандарты согласованы со стандартами, разработанными ENQA, и предназначены для оценки качества образовательных программ подготовки бакалавров и магистров в области техники и технологий.

Аккредитация в вузах проводится государственная и общественно-профессиональная. Государственная аккредитация проводится официальным органом управления образованием в порядке надзора за деятельностью вузов для подтверждения их статуса и наделения определёнными полномочиями и ответственностью. При этом основное внимание уделяется оценке ресурсов и показателей деятельности высших учебных заведений. Критериальные показатели государственной аккредитации представляют собой нижнюю планку требований, преодолев которую учебное заведение имеет право в течение пяти лет выдавать государственные дипломы.

Основное внимание общественно-профессиональной аккредитации, являющейся по сути специализированной, направлено на результаты реализации образовательных программ с позиции качества подготовки выпускников и их конкурентоспособности.

Созданные в вузах системы менеджмента качества, направленной на описание и документирование процессов и результатов деятельности в соответствии с положениями международного стандарта ИСО 9001, улучшили документооборот в организациях, повысили квалификацию сотрудников в области менеджмента качества. Однако, к сожалению, они не стимулируют повышения качества базовых процессов, а в случаях, когда бюрократическая составляющая системы менеджмента качества доминирует, она вызывает отторжение у сотрудников.

Большинство рейтингов вузов базируются в основном на косвенных по отношению к качеству высшего образования параметрах. Весьма весомы в них результаты научной деятельности сотрудников (число публикаций, количество аспирантов и докторантов, число защит диссертаций, индекс цитируемости учёных и др.). Оценивается в них ресурсная обеспеченность вузов, однако содержания и реального положения образовательного и воспитательного процессов, и, следовательно, качества высшего образования рейтинги полноценно не отражают. Более того, для достижения научных показателей требуется от преподавателей максимально возможное отвлечение от учебного процесса, что сказывается на его качестве.

В последние годы много говорится о том, что претворение в жизнь процедуры «сертификация квалификаций» будет способствовать повышению качества инженерного образования. Имеются определённые сомнения в этом. Предлагаемый путь по увеличению посредников между вузами и работодателями – мера малоэффективная и качество образовательного процесса в высшей школе не повысит, а повысит только формализм и благосостояние посредников за счёт выпускников и предприятий.

В итоге получается, что различных процедур и механизмов, направленных на обеспечение качества, много, а качество инженерного образования продолжает снижаться и не удовлетворяет ожиданий потребителей.

Представляется, чтобы добиться реальных результатов в рассматриваемой проблеме, требуются не многочисленные призывы на различных уровнях к повышению качества инженерного образования, а конкретизация на основе анализа целесообразности дальнейшего использования Болонской системы образования обоснованных комплексных мер, направленных на достижение цели. Меры должны основываться на системном и процессном подходах с учётом понимания сущности и значимости базовых факторов, определяющих качество инженерного образования. Комплексная система мер должна быть многоуровневой и реализовываться одновременно на уровне государства, на уровне Федеральных учебно-методических объединений, на уровне вузов и на уровне кафедр.

Выводы. Реформирование российской системы высшего образования в рамках Болонского процесса привело к снижению качества подготовки в стране инженерных кадров.

Существующие процедуры и механизмы обеспечения качества инженерного образования не отражают содержания и результативности образовательного и воспитательного процессов, как базовых процессов, определяющих качество высшего образования и формирующих человеческий капитал нации.

#### **Список использованных источников.**

1. Похолков, Ю.П. Качество подготовки инженерных кадров глазами академического сообщества/ Ю.П. Похолков // Инженерное образование. -2014.- №15. - С.18-25.
2. Похолков, Ю.П. Инженерное образование России: проблемы и решения, концепция развития инженерного образования в современных условиях/ Ю.П. Похолков // Инженерное образование. -2021.- №30. - С.96-102.

УДК 621.791:331.108

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ МОТИВАЦИИ ПЕРСОНАЛА  
СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА**Марьина И.С.<sup>1</sup>, Файрушин А.М.<sup>1</sup>, Мардаганиев М.Р.<sup>2</sup><sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ), г. Уфа,<sup>2</sup>ООО «Башнефть-Строй», п. Курасково, Уфимский район, Республика Башкортостан

**Аннотация.** В настоящее время практически все предприятия строительной отрасли, в том числе в нефтегазовом секторе, сталкиваются с проблемой привлечения и удержания квалифицированного персонала сварочного производства. В рамках всестороннего изучения и анализа проблемных вопросов, связанных с трудовыми ресурсами сварочного производства на предприятии - высокая текучесть, увеличение среднего возраста, трудность подбора, можно с уверенностью утверждать, что предлагаемый уровень заработной платы является главным, но не единственно существенным условием привлекательности того или иного работодателя. В связи с чем, при разработке и принятии управленческих решений, на примере конкретного нефтесервисного <sup>2</sup>Общества, предлагается сместить фокус на реализацию системы мотивации на основе современных научных методик оценки квалификации сварщика.

Эффективная система мотивации призвана мотивировать к достижению поставленных целей, преодолению сложностей, «повышению планок». Диагностика текущих методов стимулирования трудовых ресурсов на предприятии позволила сделать выбор в пользу реализации наиболее значимых мероприятий: во-первых - нематериальной мотивации, направленной на повышение вовлеченности персонала через продвижение корпоративных ценностей, обучения, поддержание соревновательного духа, а во-вторых - это возможность дополнительного поощрения сварочного персонала на основе рейтинговой системы оценки квалификации.

Изучение проблемных вопросов предлагается начать с выборочного анкетирования сварочного персонала. Анкетирование, являясь научным коммуникативным методом исследования проводится в случаях, когда необходимо выяснить мнения людей по каким-то вопросам и охватить большое число людей за короткий срок. Анкета помогает получить обратную связь от работника и скорректировать те или иные решения.

В разработанных анкетах работникам предлагалось ответить на несколько вопросов: указать свой возраст; квалификационный разряд; стаж работы по профессии; дату прохождения последнего повышения квалификации; выразить свое мнение о том, что их не устраивает в работе (на рабочем месте); что они хотели бы изменить; назвать свои профессиональные достижения; ответить участвовали ли они в смотрах-конкурсах профессионального мастерства, если да, то что положительного или отрицательного они видят в конкурсах (периодичность, призовой фонд, организация конкурса), а если не участвовали, то почему; а также предложено дать ответ на вопрос, понимают ли они на основе чего выстраивается существующая на предприятии система рейтинга сварщиков?

Исследования, проведенные среди 100 сварщиков, показали, что основная возрастная категория – это работники от 36 до 45 лет, имеющие 5 и 6 квалификационный разряды согласно штатного расписания, дата прохождения последнего повышения квалификации у работников с шестым разрядом – от года до двух лет, у работников с пятым разрядом – более 7 лет. Работники более молодой категории (до 35 лет) выразили желание чаще проходить повышение квалификации, участвовать в конкурсном движении, треть уже участвовали в различных конкурсах профессионального мастерства и хотели бы дальше продолжать участвовать. Работники более старшего возраста (36 лет и старше), также выразили желание проходить повышение квалификации, так как сварочные технологии не стоят на месте и требуют все более высоких компетенций, сами работы становятся сложнее (например,

сварка труб большой толщины на капитальных ремонтах объектов нефтепереработки на ЕНПЗ (ремонт установки «Гидрокрекинг»); некоторые отметили желание быть наставником для молодых, больше половины участвовали в различных конкурсах профессионального мастерства, однако отметили сложность попасть на конкурс ввиду занятости на работе и непонимания со стороны непосредственного руководителя (отсутствие сварщика, как правило, влияет на снижение общей выработки бригады/цеха/управления). Встретились пожелания от более старших работников – возродить школу сварщиков на предприятии. Большинство работников не понимают суть существующей на предприятии системы рейтинга сварщиков, так как ее внедрение было в 2019 году и с тех пор сварочный персонал уже обновился на 60%, опрошенные работники считают, что они должны просто варить больше стыков.

Конкурсы профессионального мастерства, повышение квалификации, рейтинг сварщиков – сами по себе не являются чем-то новым при построении и реализации кадровой стратегии предприятий. Особенность, можно сказать уникальность, предлагаемых решений заключается в реализации поставленных задач при тесном взаимодействии с ВУЗом-партнером – Уфимским государственным нефтяным техническим университетом (далее – УГНТУ).

Сегодня в Обществе уделяется большое внимание профессиональному росту сварщиков. В 2020 году на базе ООО «Башнефть-Строй» открыта базовая кафедра «Сварка нефтегазовых сооружений» кафедры «Оборудование и технология сварки и контроля» (ОТСК) УГНТУ, имеющая прочную научную базу для подготовки квалифицированных кадров, внедрения новейших сварочных технологий на производстве.

Учитывая огромный потенциал взаимовыгодного партнерства с УГНТУ, на основе результатов опроса сварщиков был разработан ряд организационно-управленческих решений по мотивации персонала сварочного производства, с привлечением к их реализации Центра компетенций и сварочных технологий (ЦКСТ) «УГНТУ-Башнефть» и Корпоративного обучающего центра.

1) во-первых, возродить и популяризировать конкурсное движение, на базе инновационно-оснащенного сварочного полигона ЦКСТ;

2) во-вторых, предложено возродить программу повышения квалификации сварщика, как аналога обучающей системы на производстве «Школа сварщика».

Как показывает современная практика и исследования, и конкурсное движение, и возможность обучения, являются мощными мотивационными факторами. Это основано на иерархической модели потребностей человека - Пирамиде потребностей, которая отражает одну из самых популярных и известных теорий мотивации - теорию иерархии потребностей американского психолога Абрахама Маслоу. Потребности Маслоу распределил по мере убывания важности, объяснив такое построение тем, что человек не может испытывать потребности высокого уровня, пока нуждается в более примитивных вещах.

До 2021 года смотры – конкурсы профессионального мастерства проводились в Обществе не регулярно, отсутствовала специальная площадка для проведения смотр-конкурса, что требовало дополнительных ресурсов для установки импровизированных кабинок, соответствующих требованиям техники безопасности. За неимением оборудованного класса отсутствовала возможность проведения одновременного проведения теоретического тестирования участников. Работники не проявляли желания участвовать в таких конкурсах.

Однако с момента создания базовой кафедры, было принято совместное решение организовать Смотр-конкурс профессионального мастерства на сварочном полигоне ЦКСТ УГНТУ, который оборудован пятью сварочными постами, современным сварочным оборудованием, отличной системой вентиляции, а также просторными светлыми классами для проведения теоретических тестов. Награждение участников организовано в брендированном зале Компании ПАО АНК «Башнефть». Подобные преобразования позволили повысить статус конкурсов профессионального мастерства, в два раза увеличить

число участников, как за счет количества постов, так и за счет удобства и комфорта участников, а также чувства приверженности к ценностям крупной нефтяной Компании. Все работники получали ценные подарки и грамоты, что позволяло почувствовать престиж профессии сварщика.

Особый интерес при оценке мастерства сварщиков вызвало применение инновационной цифровой технологии 3DLD, позволяющей определять цифровой индекс квалификации сварщика (ИКС) автоматически без участия человека [1].

Следует отметить, что конкурсное движение вызывает положительные отзывы как у старшего поколения, так и у молодых сварщиков, оно направлено на признание достижений работника, выявляет сильные и слабые стороны участников, стимулирует повышение профессионального уровня, позволяет привлечь в профессию молодежь.

Из тех работников, кто участвовал в конкурсах (порядка 50 человек), практически все продолжают (более 80%) работать в настоящее время, то есть можно с уверенностью сказать о снижении текучести среди конкурсантов.

Можно отметить яркий случай конкурсного «триумфа» одного из работников Общества – участник, занявший первое место в локальном этапе Смотре-конкурса профессионального мастерства, принял решение уволиться по своей инициативе, однако, смог оценить перспективы своего роста и в последний момент передумал, начал готовиться к Финальному этапу конкурса на уровне Компании, заняв на нем 12 место. Желание взять реванш в 2022 году позволило сварщику существенно повысить свой квалификационный уровень, поучаствовать в мастер-классах для молодых ребят, стать участником популярной передачи на Башкирском телевидении о профессии сварщика, стать узнаваемым профессионалом. Соревновательный дух позволил работнику занять четвертое место в Финальном этапе с минимальным разрывом в 2 балла от призеров.

Также важно отметить, что трое из молодых сварщиков – практикантов из ССУЗов, участвовавших в конкурсе, изъявили желание работать в Обществе после прохождения службы в армии.

Продолжая тематику повышения квалификации на рабочем месте, учитывая результаты опроса работников и имеющуюся огромную научно-техническую базу, было принято решение совместно с УГНТУ и корпоративным обучающим центром разработать учебно-тематический план обучения по Программам повышения квалификации – 3 программы по 40 часов, по направлениям:

- Ручная дуговая сварка покрытым электродом (РД);
- Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитном газе (РАД);
- Частично механизированной сварки плавящимся электродом в защитном газе (МП МАДП).

По первой программе работники Общества уже начали успешное обучение.

Повышение квалификации позволяет добиться сразу нескольких важных результатов: повысить теоретический и практический уровень сварщиков в целях отнесения соответствующему разряду по штатному расписанию (в том числе, при наличии квалификационного уровня у молодых сварщиков); добиться качественной сварки допусковых стыковых соединений, снижения брака в работе перед выходом на опасные производственные объекты основных заказчиков Общества (ЕНПЗ, ООО «Башнефть-Добыча», ООО «Соровскнефть»), а также подготовиться к независимой оценке в Центре оценки компетенций (ЦОК) для аттестации по НАКС.

Возвращаясь к проблемам рейтинга сварщиков, предложено внедрить полноценную и понятную всем методику по мотивации специалистов сварочного производства, а также включить в состав оцениваемых показателей рейтинга, помимо диаметра трубы, количества стыков, показателя отсутствия брака, также и показатели, учитывающие обучение по разработанным программам повышения квалификации, участие в конкурсах профессионального мастерства, а также наличие Индекса квалификации сварщика (ИКС) полученный с применением технологии 3DLD.

Для более глубокого и всестороннего изучения и понимания стратегических проблем в HR-области, а также положительного влияния процессов обучения и повышения уровня квалификации сварщиков для решения стратегических задач Общества, в Обществе была создана так называемая «целевая профильная группа по программе магистратуры» на кафедре ОТСК из числа руководящего состава Общества (начальник управления по ремонту и общестроительным работам объектов нефтепереработки, начальник ремонтно-механического цеха, начальник лаборатории неразрушающего контроля, представители кадрового блока, службы главного механика, производственно-технического блока).

Профильное обучение менеджмента, является своеобразным «ноу-хау» -рациональным решением производственной проблемы кадрового обеспечения, важным звеном одной большой цепочки во взаимосвязи ССУЗ-ВУЗ-Предприятие, и позволяет заложить прочный фундамент для наращивания профессиональных компетенций как руководящего, так и рабочего сварочного персонала [3].

#### **Список использованных источников.**

1. Файрушин, А. М. Повышение эффективности входного контроля сварщиков при строительстве опасных производственных объектов / А. М. Файрушин, И. А. Марченко, В. С. Хазиев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2020. – № 6. – С. 58-72. – DOI 10.17122/ogbus-2020-6-58-72. – EDN DYQНМО.
2. Файрушин, А. М. Модель кривой освоения: специфика применения в производственной и непроизводственной сферах на примерах газосварочного цеха и бухгалтерии / А. М. Файрушин, И. С. Марьина, Е. С. Космодемьянова // Информационные технологии моделирования и управления. – 2022. – Т. 130. – № 4. – С. 251-259. – EDN LZGUZA.
3. Марьина, И. С. Разработка организационно-управленческих решений по мотивации персонала сварочного производства / И. С. Марьина, А. М. Файрушин // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ., Уфа, 28–30 апреля 2022 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 430. – EDN CRABGJ.



УДК 621.791:331.108

**ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ СВАРОЧНЫХ РАБОТ  
(В УСЛОВИЯХ ООО «БАШНЕФТЬ-СТРОЙ»)**

Муляшова Н.Б., Мардаганиев М.Р., Титов Д.Н.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа

**Аннотация.** В связи с ростом объемов потребления нефти, газа, возникает потребность в увеличении производительности строительства трубопроводов, которая непосредственно зависит как от организации сварочного процесса на объекте, так и от эффективности управленческих и организационных решений в строительных компаниях. В статье предлагается модель организационно-управленческих решений, направленная на эффективную организацию и оптимальное взаимодействие связанных структурных подразделений, взаимодействие подрядчика и заказчика в организациях, занимающихся сваркой трубопроводов, заинтересованных в повышении производительности производства.

В Российской Федерации одной из ведущих отраслей промышленности является нефтегазодобыча. Эффективность нефтедобычи неразрывно связана с качеством и скоростью строительства и ремонта систем трубопроводов. Так, например, потребность в строительстве и ремонте трубопроводов в ПАО АНК «Башнефть» на 2022 год составляет около 650 км, в ПАО «Транснефть» планируется к замене порядка 750 км нефтепроводов. В последующие года данные показатели не снизятся. В связи с высокими темпами строительства и ремонта систем трубопроводного транспорта возникает необходимость в более эффективных методах организации производства и даже пересмотре подходов к управлению производством в строительных компаниях, занимающихся строительством и ремонтом трубопроводов [1].

Как правило, только качество и скорость работы сварщиков непосредственно в полевых условиях не определяют эффективность работы организации в целом. Повышение производительности работ во многих организациях, где сварочное производство является основным видом деятельности, становится основополагающей задачей как на линейном, так и на управленческом уровнях. Именно принятие эффективных организационно-управленческих решений, направленных на повышение производительности производства, определяет производственные и финансовые показатели деятельности предприятия. Разработка модели организационно-управленческих решений, направленных на повышение производительности сварочных работ, позволит оптимизировать методы управления производством, структуру взаимодействия отдельных подразделений, взаимодействия подрядчика с заказчиком и управленческого персонала с рабочим, а также способствовать увеличению производительности [2].

Данный вопрос был рассмотрен на примере компании ООО «Башнефть-Строй», являющейся внутригрупповым Обществом ПАО НК «Роснефть», генеральным подрядчиком ПАО АНК «Башнефть» по строительству и ремонту трубопроводов. При общем необходимом объеме замены трубопроводов доля выполняемых работ силами ООО «Башнефть-Строй» составляет порядка 75% (из 644 км в 2021 году на ООО «БНС» пришлось 470 км строительства и замены трубопроводов).

Объем выполняемых работ зависит как от выработки или производительности труда, так и от эффективности принимаемых управленческих решений.

Во время работ по возведению магистральных нефтегазотранспортных сетей, а также их ремонту возникают неполадки, которые вызывают срыв сроков введения в эксплуатацию объектов, что негативно сказывается на финансовых и имиджевых характеристиках предприятий.

Анализ публикаций по направлению показывает высокую актуальность данной проблематики среди Российских предприятий, деятельность которых связана со сварочными работами.

В публикации Басова Е.Д. и Пузыревского И.С. «Поточность как главная форма организации строительства линейнопротяжённых объектов» рассмотрены различные организационные формы строительных процессов: последовательный, параллельный, поточный. Обосновывается целесообразность поточной организации производства работ при строительстве линейно-протяжённых объектов.

В учебном пособии «Монтаж, техническая диагностика и ремонт технологических трубопроводов» Поникарова С.И., Валеева С.И., Вилохина С.А., Рачковский С.В., изложены вопросы, касающиеся монтажа, оценки технического состояния и ремонта технологических трубопроводов. Материал базируется на нормативных документах по состоянию на январь 2019 года.

В работе Ходакова Н.Ю. «Применение опыта зарубежных проектов при ведении исполнительной документации по сварочно-монтажным работам» представлено обоснование необходимости разработки средств регулирования ведения исполнительной документации по сварочно-монтажным работам в электронном виде. Так же для увеличения качества строительной продукции и сведение финансовых и временных затрат Заказчика, на исправление дефектов строительной продукции к минимуму. Практическая значимость заключается в разработке электронного журнала производства сварочных работ.

Таким образом, проведя литературный обзор научных статей, можно сделать вывод, что тема повышения производительности сварочного производства актуальна и прорабатывается в различных подходах, как с точки зрения повышения качества сварных соединений, применяемого оборудования, так и организации всего процесса производства в целом, а также влияющих факторах на скорость сварочного процесса при сварке магистральных трубопроводов. Выполненный выборочный анализ публикаций позволит применить уже проработанные методики в производственной деятельности ООО «Башнефть-Строй» при разработке организационно-управленческих решений, направленных на повышение производительности.

Процесс организации производства с момента возникновения потребности заказчика в выполнении строительно-монтажных работ до момента сдачи выполненных работ включает в себя следующие этапы:

- Заключение договора;
- Подготовка документации для заключения о готовности;
- Получение заключения о строительной готовности;
- Выдача строительной площадки и разрешительной документации;
- Поставка трубной продукции Заказчиком на базы хранения Заказчика;
- Передача проекта от Заказчика к Генподрядчику;
- Разработка и согласование проекта производства работ (далее ППР) Подрядчиком;
- Подготовка комплектовочных ведомостей и потребности в расходах материально-товарных ценностей (далее МТР) поставки Подрядчика;
  - Закуп расходных МТР Подрядчиком;
  - Завоз МТР Подрядчика на объект;
  - Поставка трубной продукции Заказчиком на базы хранения Заказчика;
  - Поставка трубы на объект;
  - Поставка запорно-регулирующей арматуры (далее ЗРА) Заказчиком на базы хранения;
  - Завоз ЗРА на объект Подрядчиком;
  - Завоз собственной техники на объект;
  - Заключение контрактов на привлеченную технику;





Такие системные изменения потребовали и пересмотра структурных изменений внутри подрядной организации. К ним относятся, усиление службы производственно-технического отдела в части внедрения специалистов по комплектации МТР и закупочных процедур, переход на «быстрые» закупки, а именно с помощью интернет-магазинов, сроки по которым составляют около 7 дней.

Таким образом, рассмотренные и уже прошедшие практическое применение организационно-управленческие решения в условиях внутригруппового Общества ООО «Башнефть-Строй» показывают эффективность предлагаемых методов и возможны для применения в других компаниях.

#### **Список использованных источников.**

1. Файрушин, А. М. Модель кривой освоения: специфика применения в производственной и непроизводственной сферах на примерах газосварочного цеха и бухгалтерии / А. М. Файрушин, И. С. Марьина, Е. С. Космодемьянова // Информационные технологии моделирования и управления. – 2022. – Т. 130. – № 4. – С. 251-259. – EDN LZGUZA.

2. Файрушин, А. М. Повышение эффективности входного контроля сварщиков при строительстве опасных производственных объектов / А. М. Файрушин, И. А. Марченко, В. С. Хазиев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2020. – № 6. – С. 58-72. – DOI 10.17122/ogbus-2020-6-58-72. – EDN DYQHMO.

3. Метод вычисления целевых энергетических значений / Р. Г. Имаев, Е. А. Петрова, Е. Ю. Туманова, З. Р. Мазина // Актуальные проблемы науки и техники, Уфа, 15–19 марта 2021 года. Том 2. – Уфа, 2021. – С. 356-357. – EDN RHCKPP.

4. Марьина, И. С. Разработка организационно-управленческих решений по мотивации персонала сварочного производства / И. С. Марьина, А. М. Файрушин // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ., Уфа, 28–30 апреля 2022 года. Том 1. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 430. – EDN CRABGJ.

УДК 621.791:371.8.06

**САМООЦЕНКА НРАВСТВЕННОГО ВОСПИТАНИЯ МОЛОДЕЖИ ДГТУ**

Черногоров А.Л.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

**Аннотация.** По результатам анонимного опроса представлен анализ самооценки духовно-нравственного воспитания обучающихся кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета в г. Ростове-на-Дону. Показаны особенности самооценки воспитания в характерных типологических группах, тенденции изменения нравственной самооценки за последние 10 лет.

Проблема духовно-нравственного воспитания молодежи в наше время, когда в результате глубоких социальных, нравственных, экономических преобразований утрачены прежние духовные жизненные ориентиры, чрезвычайно актуально. При этом в ходе планирования воспитательных мероприятий большое значение имеет знание объективного состояния духовно-нравственного развития, моральных ориентиров и нравственных ценностей нашей молодежи. С этой целью на кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства» при ДГТУ была предложена и апробирована методика проведения подобной диагностики. Целью настоящего исследования являлся анализ духовно-нравственного самосознания обучающихся ДГТУ, понимание и осмысление ими категорий: толерантность, патриотизм, благотворительность, духовность, нравственность.

Среди обучающихся была распространена специальная анкета-опросник, представленная на рисунке 1, содержащая ключевые вопросы, затрагивающие отношение, личное восприятие и понимание обучающимися составляющих критериев духовно-нравственного воспитания. При составлении данной Анкеты соблюдались следующие требования:

Во-первых, данный опрос должен быть анонимным, чтобы заполняющий анкету был полностью раскрепощен и отвечал на все вопросы искренне. Исключение составляет возраст и пол заполняющего анкету.

Во-вторых, анкета должна содержать только ключевые вопросы, поставленные так, чтобы студент мог ответить однозначно «да» или «нет».

В-третьих, анкета не должна быть перегружена вопросами, чтобы на каждый из пунктов студент отвечал обдуманно и не торопясь.

Проведение опроса проходило в начале учебного 2022-2023 года среди обучающихся в трех типологических группах технических направлений, главным образом, связанных со сварочным производством:

**1 группа:** обучающиеся бакалавриата, очное отделение, первый курс, мужчины, средний возраст 17-18 лет. Фактически в эту группу попадали вчерашние школьники, только приступившие к учебе ДГТУ. Вероятно, для этой группы духовно-нравственное воспитание следует отнести в период учебы в средней общеобразовательной школе и других подобных заведениях.

**2 группа:** обучающиеся бакалавриата, очное отделение, четвертый (выпускной) курс, мужчины, средний возраст 20 -21 лет;

**3 группа:** обучающиеся бакалавриата заочного отделения, магистратуры, аспирантуры, мужчины, средний возраст от 25 лет до 40 лет. В эту группу были отнесены взрослые молодые люди имеющий опыт работы на промышленных предприятиях, умеющие самостоятельно учиться.

Такое деление на типологические группы, вероятно, позволяет проследить зависимость культурного и духовно-нравственного уровня не только в зависимости от возраста, но и от степени участия студентов в воспитательном процессе в стенах ДГТУ. По нашему мнению, первокурсники, пришедшие в ВУЗ с определенным уровнем воспитания и культуры, и

выпускники, проучившиеся на протяжении четырех лет в университете, студенты-заочники, бывающие в университете только во время сессии, могут иметь некоторые отличия в восприятии проблем духовно-нравственного воспитания.

### Анкета

Пол \_\_\_\_\_

Возраст \_\_\_\_\_

- 1) Легко ли вас вывести из себя?  
ДА Нет
- 2) Если у вас знакомые другой национальности (вероисповедания)?  
ДА Нет
- 3) Празднуете ли вы национальные праздники?  
ДА Нет
- 4) Считаете ли вы себя патриотом?  
ДА Нет
- 5) Считаете ли вы себя толерантным?  
ДА Нет
- 6) Увлекаетесь ли вы чем-либо вне учебного процесса?  
ДА Нет
- 7) Часто ли вы поступаете, руководствуясь моральными принципами?  
ДА Нет
- 8) Считаете ли вы духовные ценности важнее материальных?  
ДА Нет
- 9) Занимаетесь ли вы благотворительностью?  
ДА Нет
- 10) Считаете ли вы себя воспитанным человеком?  
ДА Нет
- 11) Считаете ли вы своих одногруппников воспитанными людьми?  
ДА Нет

Рисунок 1 – Анкета

Положительные ответы данные обучающимися на вопросы Анкеты представлены в таблице 1. На рисунках 2-10, 12,13 представлены наглядные диаграммы иллюстрирующие полученные данные.

Предлагаемый ниже анализ не претендует на всеобъемлющее социологическое исследование. Данную методику следует рассматривать ограниченно, приемлемую для определённого конкретного контингента обучающихся в рамках кафедры, факультета и других подобных структурных подразделений ВУЗов и других учебных заведений. Предлагаемая методика может быть востребована, например, кураторами учебных групп, деканатами и т.п.

Анализ, полученных результатов проведем, опираясь на аналогичные исследования, проведенные в 2011/2012 учебном году. Представленные выше типологические группы обучающихся в этот период несколько отличались по своему составу. Все три группы включали в себя обучающихся по программе специалитета, поэтому во 2-ую группу «выпускников» попали обучающиеся 5 курса в возрасте 21-22 года. В 1 и 2-ую группы

кроме обучающихся технической специальности инженеров-сварщиков были включены обучающиеся по специальности «Профессиональное обучение», с достаточно высокой долей гуманитарных дисциплин. Представительство юношей и девушек в 1 и 2-й группах составило примерно по 50%. Вероятно, эти отличительные признаки типологических групп в 2012 году не имеют принципиального значения.

Таблица 1 - Результаты анонимного опроса студентов ДГТУ

Содержание вопроса Анкеты	2012 год			2022 год		
	1 гр	2 гр	3 гр	1 гр	2 гр	3 гр
	«да», %			«да», %		
1) Легко ли вас вывести из себя?	73%	49%	52%	22%	10%	0%
2) Если у вас знакомые другой национальности (вероисповедания)?	40%	93%	67%	78%	80%	78%
3) Празднуете ли вы национальные праздники?	45%	51%	60%	78%	90%	78%
4) Считаете ли вы себя патриотом?	30%	63%	57%	89%	80%	89%
5) Считаете ли вы себя толерантным?	93%	84%	89%	78%	100%	78%
6) Увлекаетесь ли вы чем-либо вне учебного процесса?	97%	78%	67%	89%	90%	100%
7) Часто ли вы поступаете, руководствуясь моральными принципами?	68%	70%	73%	78%	100%	89%
8) Считаете ли вы духовные ценности важнее материальных?	82%	88%	53%	56%	40%	44%
9) Занимаетесь ли вы благотворительностью?	56%	72%	58%	33%	30%	33%
10) Считаете ли вы себя воспитанным человеком?	96%	100%	97%	89%	100%	100%
11) Считаете ли вы своих одногруппников воспитанными людьми?	47%	58%	71%	100%	90%	78%

В ходе анализа опроса обучающихся установлено следующее:

- степень собственной несдержанности (см. рисунок 1) у обучающихся к 2022 году существенно снизилась. Самыми несдержанными считают себя обучающиеся 1-й группы - первокурсники. В 2022 у «заочников» 3-я типологическая группа, он, вообще, исчезающе мал (около 0%). Вероятно, эта категория учащихся имеет достаточный опыт общения и построения своих коммуникаций с окружающими людьми.

- существенно вырос уровень патриотических настроений (рисунок 5). Патриотами нашей страны считают себя более 80% обучающихся. Тем не менее, с учетом реалий нашего времени этот показатель недостаточен и должен быть предметом пристального внимания преподавателей и кураторов учебных групп.

- на 20-40% выросло число обучающихся отмечающих национальные праздники (рисунок 4). В 2012 году национальные праздники не являлись в достаточной степени актуальными для молодежи.



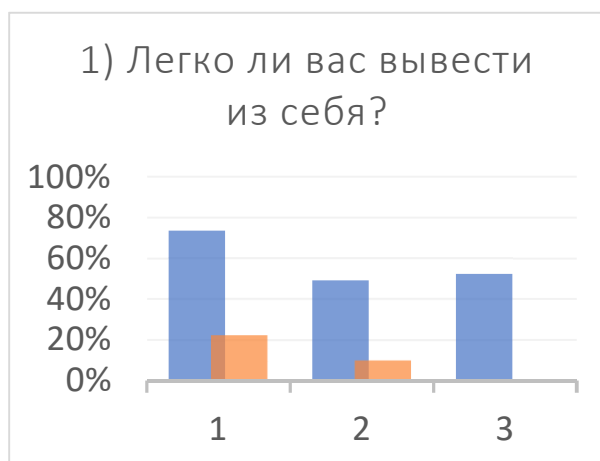


Рисунок 2 – Степень несдержанности

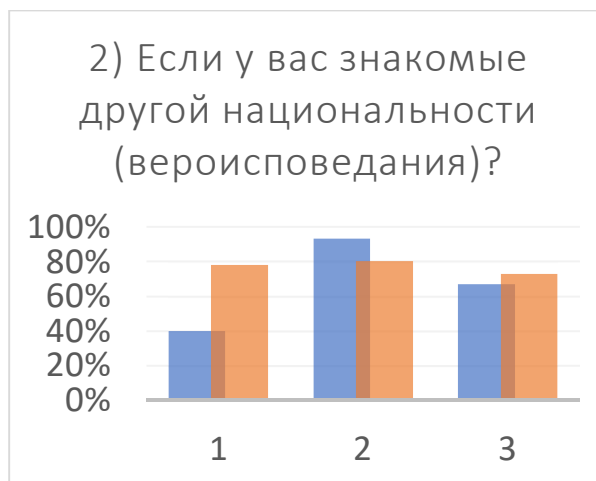


Рисунок 3 – Степень межнационального общения

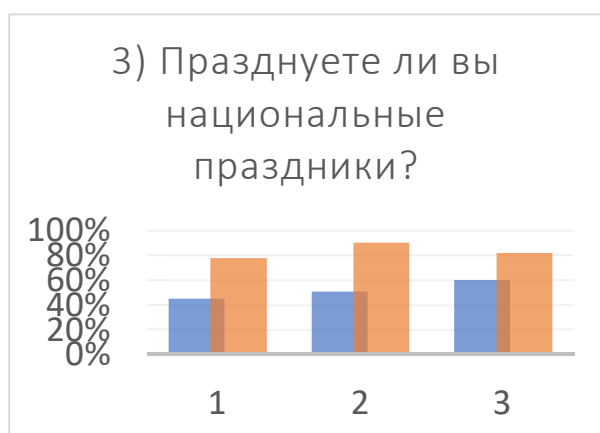


Рисунок 4 – Участие в национальных праздниках

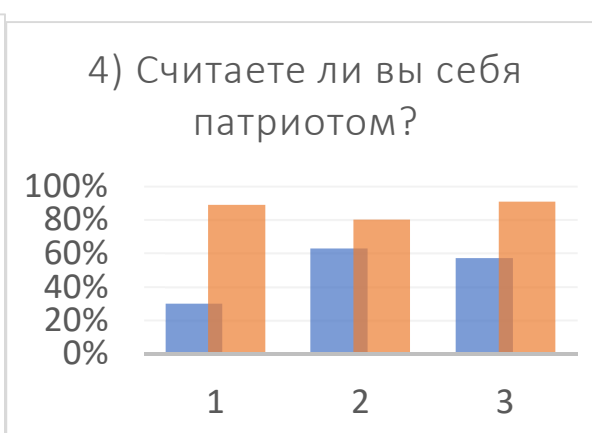


Рисунок 5 – Самоощущение патриотом Родины

- уровень толерантности с 2012 по 2022 годы в целом остался на прежнем уровне (рисунок 6). За последнее время само понятие толерантности становится несколько размытым в сознании обучающихся и требует дополнительного определения. Кроме этого, в конце нулевых, начале 10-х годов в ДГТУ функционировала школа толерантности для обучающихся и преподавателей ДГТУ. Возможно, этим объясняется небольшое снижение толерантности у первокурсников на 15%.

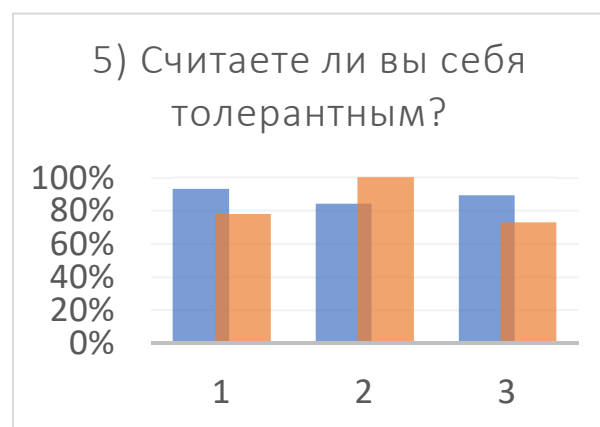


Рисунок 6 – Уровень толерантности

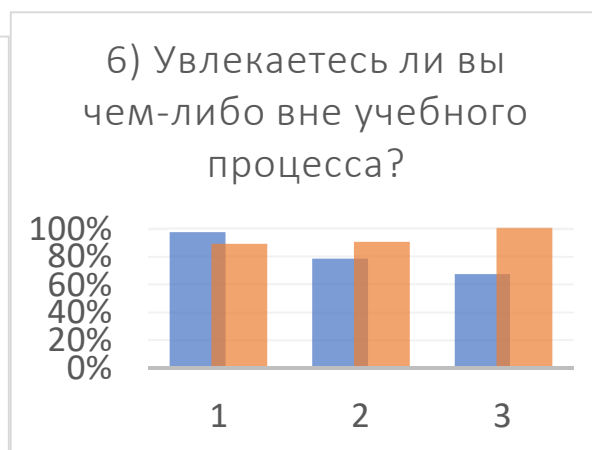


Рисунок 7 – Увлечения, хобби

- подавляющее большинство обучающихся (80 - 100%) поступают, руководствуясь моральными принципами (рисунок 8). И этот показатель вырос с 2012 года на 10 - 30%. Однако, большая часть молодых людей в 2022 году, в целом более 50%, отдают свои предпочтения материальным ценностям (рисунок 9), не считают духовные ценности важнее материальных, не готовы тратить время и силы на повышение своего духовного уровня. К сожалению, эта тенденция возобладала с 2012 по 2022 год и, видимо, продолжает усугубляться. Вероятно, это может быть связано с тем, что большинство обучающихся в ВУЗе на очной форме обучения (2-я типологическая группа) и тем более на заочной совмещают учебу и работу и уже столкнулись со сложной материальной стороной нашего мира.



Рисунок 8 – Мотивация моральными принципами

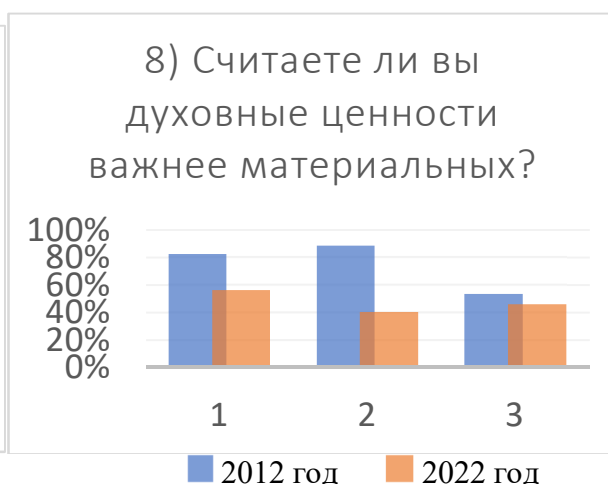


Рисунок 9 – Значимость духовных ценностей

- проблема, касающаяся благотворительности, выявила равнодушие студентов к этой теме. Существенно снизились масштабы благотворительности на 20 – 40%. Для конкретных обучающихся, принявших участие в опросе - это можно объяснить следующим образом. В 2012 году обучающиеся девушки и юноши, опрошенные в рамках типологических групп 2 и 3 в ходе получения базового образования по учебным программам «Профессиональное обучение» принимали активное участие в работе педагогического отряда «Горящие сырца», в работе «Социально-реабилитационного центра для несовершеннолетних» (рисунок 11). Несомненно, это имело высокий воспитательный духовно-нравственный эффект.



Рисунок 10 – Занятость обучающихся благотворительностью



Рисунок 11 – Почетная грамота студентам

В настоящее время в ДГТУ по-прежнему широко развито и продолжает развиваться волонтерское движение: обучающиеся работают с детскими домами, реабилитационными центрами, военными госпиталями, группами инвалидов, и регулярно проводят множество акций в поддержку и развитие малых социальных групп. Однако, опрошенные в настоящее время обучающиеся в последнее время благотворительностью занимаются мало, участвуют в благотворительных мероприятиях самостоятельно «по одиночке» от случая к случаю, ориентируются на работу отдельных агитационных групп. Несомненно, кураторам следует обратить на это внимание и привлекать своих обучающихся в соответствующие волонтерские структуры ДГТУ.

- абсолютное большинство опрошенных практически 100% считают себя воспитанными людьми (рисунок 12), но, согласно их мнению, не всегда считают таковыми своих одноклассников. Вероятно, можно заключить, что у обучающихся несколько размыто понятие о воспитанности, и основано на личном, субъективном мнении. При этом 10 лет назад эта тенденция была чрезвычайно актуальна, особенно в среде первокурсников (1 типологическая группа).

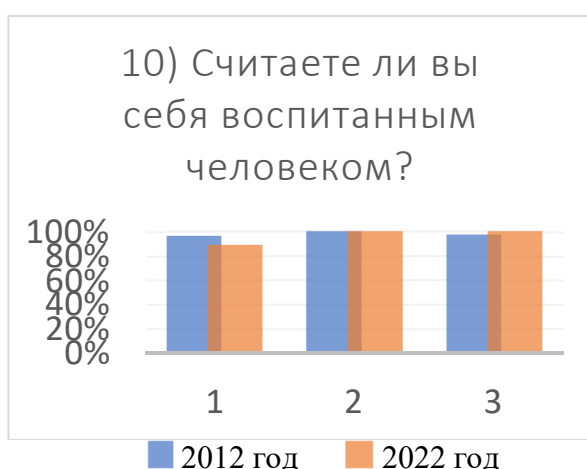


Рисунок 12 – Оценка собственной воспитанности

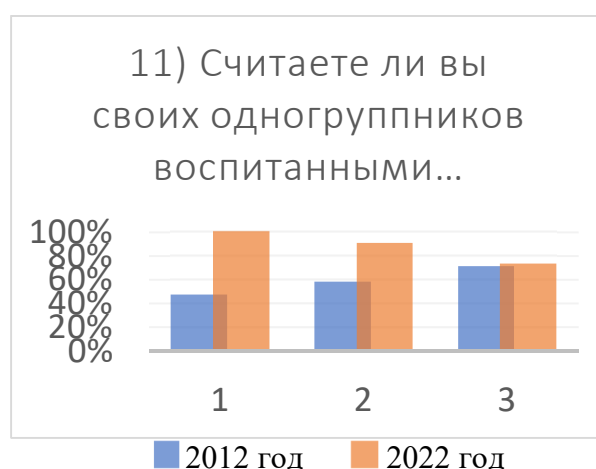


Рисунок 13 – Оценка воспитанности своих товарищей в группах

Учитывая единую систему образования и воспитания, функционирующую в ДГТУ, традиции, мировоззрение преподавателей, профессиональную деятельность представленные результаты самоанализа относительно обучающихся, имеющих отношение к кафедре «Машины и автоматизация сварочного производства», вероятно, могут быть распространены на другие родственные кафедры.

Общие выводы.

1. Общий уровень духовно-нравственного воспитания обучающихся технических направлений в ДГТУ достаточно высокий. За последние 10 лет отмечается рост патриотизма и моральных принципов. Результаты обработки проведенного самоанализа обучающихся выявляет направления дальнейшего совершенствования воспитания: благотворительность, отношение к духовным ценностям.

2. Созданная в ДГТУ система духовно-нравственного, патриотического воспитания обучающихся формирует у студентов правильное личностное восприятие и отношение к действительности.

3. Апробация настоящего подхода показала его простоту, объективность и информативность. Предлагаемая методика самооценки духовно-нравственного воспитания обучающихся может быть распространена на другие структурные подразделения ВУЗа.

УДК 621.791:378.1

**ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ИНСТРУМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Афанасьев Р.И.

ОП «Уфимское» ООО «ГСП-2», г. Уфа

**Аннотация.** Указ Президента РФ В.Путина от 21 июля 2020 года № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» определяет цифровую трансформацию (ЦТ) как одно из приоритетных направлений дальнейшего развития РФ до 2030 года. Задачи по цифровой трансформации в России на ближайшее десятилетие коснулись и образование.

Цифровизация в 21 веке становится ведущим механизмом развития, как государства, так и определенных отраслей экономики. Актуальность выбранной темы статьи заключается в том, что взятый Россией курс на цифровизацию экономических процессов порождает новый технологический уклад отраслей и в связи с этим, возрастает потребность на новые профессии и кадровый потенциал [3]. Подготовка кадров становится приоритетным направлением в условиях новой технологической революции «Индустрия 4.0» [2].

Использование цифровых технологий вносит качественные изменения в производственных процессах и на глобальных рынках. Такая перестройка сфер производства захватывает и сферу образования. На современном этапе трансформация в образовательных процессах началась во всем мире. Трансформационные процессы стали необходимы и в отечественном образовании. Цифровая трансформация диктует свои требования, в которых каждый обучаемый должен владеть компетенциями 21 века:

- креативным мышлением;
- способностью к саморазвитию;
- умением применения цифровых инструментов, источников и сервисов в своей повседневной работе;
- творческим применением имеющихся знаний в быстро развивающейся цифровой среде [5].

ЦТ образования - это реконструкция содержания образовательного процесса, методик и организационных форм обучения для кардинального улучшения образовательных результатов каждого обучающегося [5]. Сущность ЦТ образовательных процессов заключается в достижении обучаемыми существенных результатов за счет персонализации образовательного процесса, используя методы искусственного интеллекта (ИИ), инструменты виртуальной реальности, развивая цифровую образовательную среду, обеспечив доступ к широкополосному интернету и Big Data (большие данные).

Отличительной чертой ЦТ образовательных процессов является высокая скорость преобразований, которым способствуют следующие факторы:

- «Индустрия 4.0» (4-ая промышленная революция), основанная на цифровых механизмах развития. С использованием цифровых технологий в производственных процессах в отраслях экономики возросла роль знаний и образования. ЦТ образовательных процессов базируется на применении информационных и телекоммуникационных технологий (ИКТ).

Ю. Бровкина директор консалтинговой компании «Пакс Текум» отмечает, что: «основные прорывные идеи возникают на стыке междисциплинарных знаний и кроссфункциональных навыков (навыков, рождающихся в процессе управления проектами, которые реализуются на пересечении разных видов деятельности). Большая часть специфичных профессиональных навыков (так называемые твердые навыки – Hardskills) устаревают каждые 3-5 лет. Отсюда новые требования к образованию». Существенно возрос запрос на специалистов с высшим образованием. Жан-Эрик Обер (Dr.Jean-Eric Aubert)

эксперт по инновационной политике и стратегиям развития считает, что «общеобразовательные школы были драйверами индустриальной революции, высшее образование - драйвер цифровой революции».

В 21 веке востребован кадровый персонал, способный использовать полученные в образовательных учреждениях знания и навыки из разных областей и применять их в новых сферах деятельности. Основным итогом процесса вторичного и третичного образования становится постоянное самообразование, креативное мышление и эрудированность (как некий «кандидатский минимум», который необходим для быстрого погружения в содержательный контекст в любой сфере деятельности) [4].

- демографический. Каждые 15 лет удваивается количество студентов, обучающихся в вузах всего мира. Согласно прогнозам, в 2025 году количество студентов в высшие образовательные организации увеличится до 95 млн. в год, несмотря на то, что «пропускная способность существующих образовательных учреждений существенно ограничена» [1].

- переход на новые модели обучения, которые содержат высокотехнологичные организационно-педагогические и методические решения. Использование таких моделей в образовательных процессах представляет цифровую трансформацию образования, одной из приоритетных задач которой является - разработка и распространение высоко результативной и экономически эффективной компетентностно-ориентированной модели персонализированной организации образовательного процесса, которая позволит решить задачу преодоления цифрового разрыва [4].

ЦТ образовательного процесса базируется на перспективных цифровых технологиях, таких как:

- облачные технологии;
- технологии Big Data;
- сетевые технологии.

Преподаватели должны не только пользоваться цифровыми технологиями, но и являться разработчиками технологий искусственного интеллекта, виртуальной реальности и распределенного реестра, используя blockchain (блокчейн).

Термин «искусственный интеллект» (ИИ) ввел в обращение математик Джон Маккарти (первая программа ИИ «Logic Theorist» Moor, 2006) на конференции в Дартмутском колледже (США), которую он организовал для обсуждения перспективных исследований в области ИИ («мозговой шторм») Интерес к интеллектуальным обучающим системам (Intelligent Tutoring Systems - ITS) возник в 70-х годах прошлого века. В вузах нашей страны создавались автоматизированные обучающие системы (АОС). Цель исследований и разработок в области ITS состояла в том, чтобы смоделировать учебный процесс, взаимодействие ученика с преподавателем (репетитором). Прорыв в области ITS наметился в начале 2000-х годов, когда разработчики адаптивных цифровых платформ Knewton и Dreambox, используя методы искусственного интеллекта, показали, что с их помощью можно существенно повысить эффективность систем дистанционного обучения. В настоящее время практически все платформы для адаптивного онлайн-обучения (ALEKS, MATHia, Dreambox Learning, STMath, Achieve3000) используют идеи и решения, которые были выработаны при разработке ITS.

Схема обучающей системы с использованием ИИ (ITS) представлена на рисунке 1, которая включает интерфейс обучаемого для взаимодействия с обучающей системой и три взаимодействующие модели: модель предметной области, модель обучаемого и преподавательская модель (педагогическая модель) обучающего.

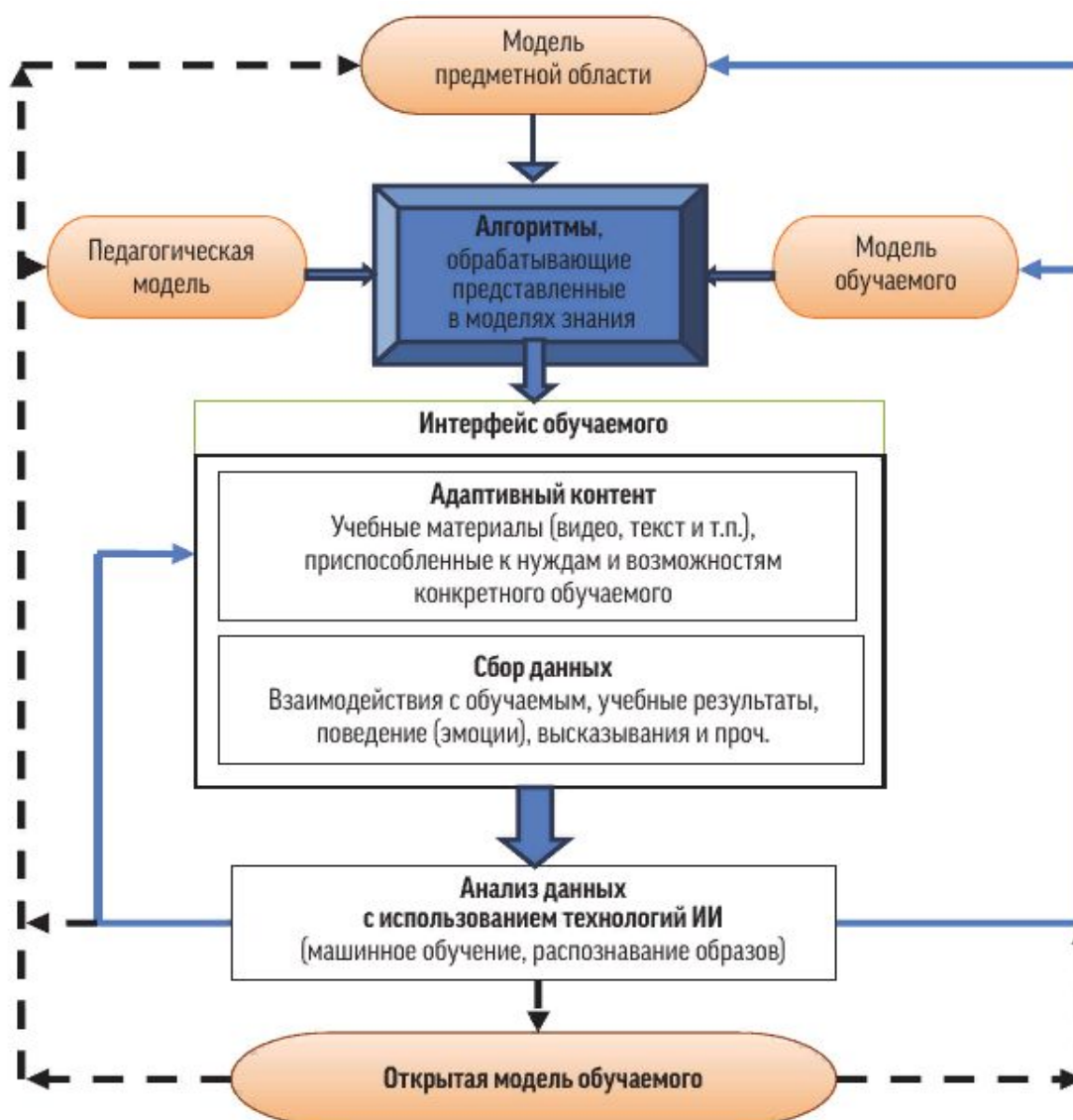


Рисунок 1 – Схема обучающей системы с использованием ИИ (ITS)

Модель предметной области включает все изучаемые элементы содержания (понятия, умения, навыки) в соответствующей предметной области и их взаимосвязи, а также процедуры решения задач, которые будут предлагаться обучаемым для демонстрации результатов обучения. На современном этапе перечень предметных областей достаточно ограничен. В него входят лишь области, где обучающиеся могут продемонстрировать результаты обучения с помощью решения таких задач, в которых требуется усвоить и применить набор действий, ранее определенный экспертами.

Модель обучаемого в ITS использует ответы студентов, решения предлагаемых им задач и статистические модели их способности к познанию для оценки и мониторинга текущего состояния усвоения знаний в определенной области. Данные о работе обучаемого, как правило, собирают на уровне отдельных понятий их составляющих, а также микроумений, формируемых на отдельных шагах учебного процесса. Модель обучаемого также может собирать данные о выполнении студентами предлагаемых ему заданий (количество выполненных заданий, время их выполнения, количество ошибок и т.д.) [5].

Преподавательская модель получает данные от модели предметной области и модели обучаемого и уточняет порядок/способ взаимодействия с обучаемым, оптимизируя результаты его полученных знаний.

Система обычно предоставляет обучаемым дополнительные материалы, предлагает решить новые задачи, выполнить корректирующее задание, вернуться к изучению

излагаемого материала и т.д. Когда элемент содержания освоен, преподавательская модель позволяет обучаемому перейти к следующему уровню знаний или продолжить усвоение исходного материала на более высоком уровне сложности. Использование различных методических приемов зависит от конкретной системы обучения.

Инструменты ИИ (приложение или компьютерная программа), используя данные (знания) каждой из моделей, формируют очередное сообщение (часть образовательного материала, вопрос, задание и др.), которое направляется обучаемому с учетом его индивидуальных особенностей. Обучаемый, получив очередную долю образовательного материала в виде аудио- или видео-сообщения, текста, анимации и т.д., приступает к ее изучению. Обучающая система анализирует его действия (ответы на вопросы, скорость реакции и т.д.) и готовит следующую часть материала для продолжения обучения. Более глубокий анализ образовательного процесса проводится для корректировки модели обучаемого и уточнения объема освоенных им знаний, умений и навыков на текущий момент. В итоге обучаемый получает генерируемые системой сообщения, которые учитывают, как его индивидуальные особенности, так и уровень усвоенных знаний.

Таким образом, цифровая трансформация в образовательных организациях представляет собой не только изменение содержательного процесса образования, его структурную организацию, но и реформирование преподавательской деятельности. Профессионалы нового уровня должны уметь ориентироваться в быстро меняющихся производственных процессах, синтезировать идеи из разных областей, адаптироваться к ЦТ. Цифровые компетенции в образовании должны быть направлены на совершенствование применения цифровых технологий в преподавании и обучении, развитие навыков, необходимых для цифровой трансформации, анализ и прогнозирование на основе данных в образовании [4].

#### **Список использованных источников.**

1. Витковский А. Трансформация системы образования: почему и как происходит. – URL: <https://medium.com/direktoria-online/brovkina-9c7cf1e2f423> (дата обращения 09.11.2022).
2. Сергеева О.Ю. «Индустрия 4.0» как механизм формирования «Умного производства» // Нанотехнологии в строительстве. - 2018. - Том 10, № 2. - С. 100-113. - DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-100-113](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-2-100-113).
3. Сергеева О.Ю., Ходковская Ю.В. Российский рынок труда в цифровой экономике // European Social Science Journal. – 2018. - №4. – С. 8-12.
4. Сумина Г.А., Новикова Е.Ю. Цифровая трансформация образования. – Саратов, 2021. - 26с.
5. Трудности и перспективы цифровой трансформации образования [Текст] / А.Ю. Уваров, Э. Гейбл, И.В. Дворецкая и др.; под ред. А.Ю. Уварова, И. Д. Фрумина; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики», Ин-т образования. - М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2019. – 343с.
6. Jang D.-H., Yi P., Shin I.-S. (2015). Examining the Effectiveness of Digital Textbook Use on Students' Learning Outcomes in South Korea: A Metaanalysis // The Asia-Pacific Education Researcher. 2015.
7. Wallet P. (2014). Information and Communication Technology (ICT) in Education in Asia. Montreal, Canada: UNESCO Institute for Statistics, 2014.

УДК 621.791:377.6

**КОНКУРСЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МАСТЕРСТВА  
КАК ФОРМА МОТИВАЦИИ И ПРОФОРИЕНТАЦИИ ШКОЛЬНИКОВ**

Туманова Е.Ю.; Смаков Д.А.; Низаметдинова Е.А.; Русакова К.С.; Борисов А.О.

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа

**Аннотация.** Роль профориентации очень высока для молодых людей. Образовательные организации ведут профориентационную работу исключительно с позиции рекламы и привлечения талантливых абитуриентов на образовательные программы. Для более же точного представления о будущей профессии лучшим образом расскажет не информационный буклет, а вовлечение в деятельность. В данном материале представлен кейс, состоящий из образовательных мастер-классов и трех конкурсных мероприятий, который получил название «марафон» и стал лучшей практикой профориентационных мероприятий. Особое внимание уделено конкурсному движению как механизму повышения мотивации и профессионального роста специалиста.

Одно из самых важных решений, которые принимает молодой человек – это выбор профессии и карьерного пути, который определит качество всей дальнейшей жизни. Этот выбор не всегда совершается после должного обдумывания, чаще под давлением желания окружающих: друзей и родителей. Но бывает, что решение принимается под впечатлением недавно увиденной профессии без осознания представления о специальности в целом [1].

Отрасль сварочного производства не потеряет своей актуальности еще много лет, но она долгое время ассоциируется лишь с рабочей профессией «сварщик», как тяжелой и низкоквалифицированной. За последние годы производство в России шагнуло далеко вперед и теперь рабочие профессии – это престижный и высокотехнологичный труд. Однако отрасль испытывает острый дефицит рабочих специальностей высокой квалификации, это в том числе связано с тем, что число школьников, которые хотят получить рабочую профессию значительно сократилось. Молодежь стремительно тянется к «цифре» и есть опасения, что некому будет работать на предприятиях и управлять сложной техникой.

В данном материале представлен кейс профориентации, в котором погружение школьников в представление о профессии сделано через вовлечение в деятельность. Профориентационный комплекс, состоящий из образовательных и конкурсных мероприятий, объединенных общей темой «Оборудование и технологии сварки», получил название марафон для школьников «Золотые руки. Welcome to Welding». Все мероприятия марафона направлены на развитие интереса к научной и профессиональной деятельности специалистов сварочной отрасли [2].

Марафон построен по следующему принципу: сначала общее знакомство и экскурсия, затем серия обучающих мастер-классов, на которых школьники берут в руки сварочные горелки и пробуют выполнить сварной шов, а в финале конкурс профессионального мастерства. Таким образом, сначала ребят учат делать, а в конце оценивается полученный навык через участие в конкурсе.

Конкурсное движение во многих отраслях используется как фактор стимулирования профессионального роста. Спортивные соревнования и олимпиады по образовательным дисциплинам – это тоже конкурсное движение. Но, кроме этого, в последнее набирают популярность различные конкурсы «Лучший по профессии» в самых различных отраслях. Профессиональные конкурсы являются проверенным инструментом мотивации сотрудников, способствуют их взаимодействию вне рабочей площадки и обмену опытом между ними [3].

Следует отметить конкурсное движение WorldSkills, как крупнейшее соревнование рабочих профессий, «олимпиаду для рабочих рук». Основной миссией этот крупнейший конкурс провозглашает привлечение внимания к рабочим профессиям и создания условий



для развития высоких профессиональных стандартов. Недостатком конкурсов мирового уровня является невозможность вовлечения в них широкого круга участников. Поэтому проведение конкурсов по профессии для массового участия в них молодых людей в возрасте до 22 лет является актуальной задачей [4].

Предлагаемый марафон является открытым и бесплатным для обучающихся школ от 6 до 11 класса, поэтому позволяет охватить очень много участников. На сегодняшний день командой организаторов проведено два марафона и общее количество участников составило более ста человек. Основными целями и задачами проводимого марафона для школьников являются:

- создание необходимых условий для развития интеллектуальных и творческих способностей молодежи;
- выявление лиц, проявивших повышенный интерес и способности к специальному и высшему профессиональному образованию и в области технологии сварки;
- привлечение талантливых выпускников в УГНТУ;
- содействие в профессиональной ориентации школьников и повышение привлекательности профессий специалистов сварочного производства.

Кроме финального конкурса сварочного мастерства в марафоне предусмотрены еще два конкурсных мероприятия: графический конкурс «Золотые руки» и квиз-игра «Welcome to Welding».

Графический конкурс «Золотые руки» заключается в выполнении участником фигурной непрерывной линии, имитирующей движение электрода во время сварки. Участник выполняет линию пишущим инструментом, зажатом в электрододержателе, на листе бумаги с нанесенным на нем следом эталонной линии. Лист бумаги может лежать горизонтально на столе или быть закрепленным на вертикальной поверхности, имитируя сварку в нижнем или вертикальном положении. Критериями отбора лучших работ являются: выполнение фигурной линии непрерывной и совпадение выполненной линии участником с эталонной линией на листе. На рисунке 1 приведено несколько лучших работ, исполнители которых были призваны победителями графического конкурса.

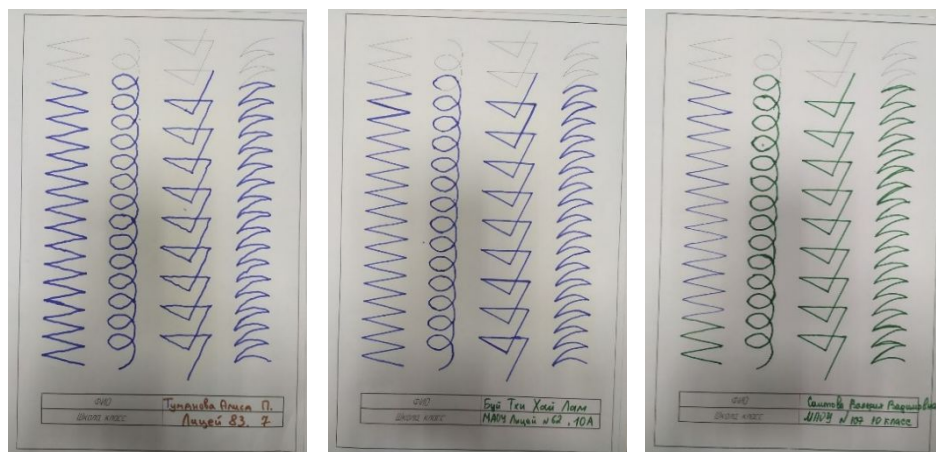


Рисунок 1 – Работы победителей графического конкурса «Золотые руки»

Графический конкурс направлен на определение хорошей кистевой моторики рук школьников. Дело в том, что для сварщика подобный навык действительно важен. Выполняя шов требуется, удерживая в руке сварочную головку или электрододержатель, выполнять манипулирование электродом по различным траекториям, сохраняя при этом точный рисунок и скорость выполнения.

Графический конкурс открывает марафон, потому что выполнить его можно без специальной подготовки. При этом ребята с первого дня вовлекаются в процесс и уже получают первые призовые места.

Квиз-игра – это формат интеллектуальной командной викторины. Квиз был оформлен в так называемые «нескучные уроки», поскольку предназначается для школьников, в том числе с целью показать им из каких областей требуются знания для специалистов по сварке. Это было шесть уроков: история, физика, химия, математика, ОБЖ и обществознание.

Квиз играется в середине марафона. Во-первых, чтобы поддержать общую вовлеченность ребят и напомнить им об их большом количестве. Поддержать общение школьников и вовлечь их в командную работу. Во-вторых, чтобы показать, что сварка это не только «работа руками» в мастерской, но и глубокие знания электричества, материалов, теплообмена и других наук, а также с целью рассказать об исторических личностях в отрасли.

Важным моментом любого конкурса является наличие беспристрастного жюри. Необходимо, чтобы результаты конкурса оценивались беспристрастно, а жюри было компетентным и авторитетным, только в этом случае его решение вызовет доверие и уважение.

В нашем марафоне два конкурсных мероприятия оценивались в бальной системе абсолютно без субъективной оценки человеком. Это Квиз и конкурс сварочного мастерства. Графический конкурс на сегодняшний день оценивается командой экспертов в составе не менее трех человек и оценка этих экспертов исключительно качественная по критериям описанным выше.

Квиз оценивался по количеству баллов за правильно выполненные задания или за верные ответы. Здесь всего лишь математический подсчет количества верных ответов.

Организаторы конкурса разработали три уровня для конкурсов сварочного мастерства: начальный уровень для школьников, базовый для студентов колледжей и вузов, профессиональный для специалистов, работающих в отрасли. В марафоне для школьников конкурс получил название конкурс сварочного мастерства начального уровня «Weld Masters School». В данном конкурсе участники должны выполнить сварной шов в разделку на плоской пластине. Выбран для школьников механизированный способ сварки порошковой проволокой. Выбор способа сварки определен не случайно – данный способ сварки достаточно прост и у начинающего школьника наверняка получится положить свой первый сварной шов. Потому что очень важно дать уверенность участнику на первых этапах погружения в деятельность [5].

Победитель и призеры конкурса сварочного мастерства определяются по индексу квалификации сварщика, полученному технологией 3DLD. Оценка выполненного сварного шва участником конкурса выполняется с помощью установки для оценки квалификации сварщиков по методу объемного лазерного сканирования и визуализации отклонений поверхности сварного шва от эталонной формы. Технология 3DLD разработана с применением научного подхода и учитывает все возможные пространственные положения сварного шва при сварке, физико-механическое свойство расплавленного металла и нормативные требования к конструктивным размерам сварного шва. Метод оценки по технологии 3DLD официально включен в технический файл международного конкурса сварщиков Arc Cup IWC [6]. Выполнение лазерного сканирования показано на рисунке 2.

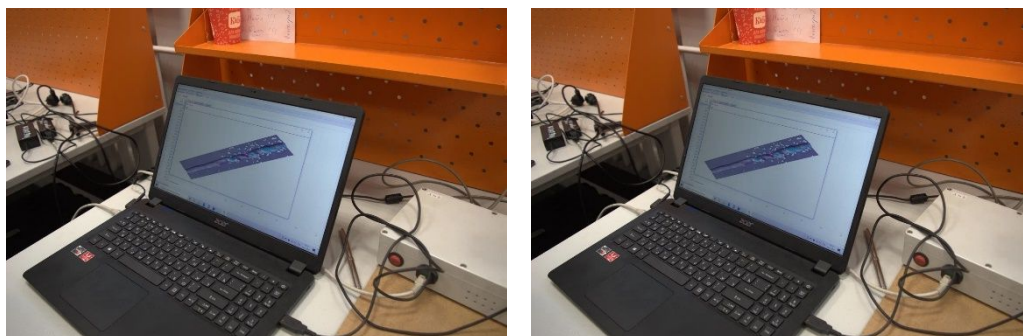


Рисунок 2 – Цифровая оценка качества выполненного сварного шва по технологии 3DLD

Марафон показал востребованность вовлеченных профориентационных мероприятий для школьников. Профессиональное самоопределение и успешный выбор профессии являются важной задачей в жизни молодого человека, поэтому увеличение степени вовлеченности специалистов в профориентацию станет правильным направлением в развитии престижности рабочих профессий.

При этом при разработке новых профориентационных программ следует учитывать какие навыки из профессии можно сформировать у школьника, чтобы они были востребованы в любой будущей практической деятельности. А также систематическое сопровождение наиболее успешных начинаний и сопровождение учащихся, проявивших интерес, вовлекая их в мастерские или научные кружки.

В целом проблема актуальности профориентации стоит довольно остро, и системная работа в данном направлении позволит решить общую кадровую политику отраслей. Но для этого требуется решить задачу профессионализма сотрудников, занимающихся профориентацией, поскольку зачастую это специалисты, не имеющие профильной психолого-профконсультационной компетенции.

Проведенный марафон может быть принят как кейс лучшей практики, для тиражирования в другие образовательные учреждения, или для адаптации его под компетенции и практические навыки других рабочих профессий.

#### **Список использованных источников.**

1. Смаков, Д. А. Наставничество в высшем образовании - основа современной формы подготовки инженеров / Д. А. Смаков // Уральский научный вестник. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 53-58. – EDN MZRGXW.
2. Смаков, Д. А. Роль наставничества в профориентации школьников / Д. А. Смаков // Приднепровский научный вестник. – 2022. – Т. 1. – № 8. – С. 41-45. – EDN GFRIFO.
3. Марьина, И. С. Разработка организационно-управленческих решений по мотивации персонала сварочного производства / И. С. Марьина, А. М. Файрушин // Материалы 73-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ., Уфа, 28–30 апреля 2022 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2022. – С. 430. – EDN CRABGJ.
4. Кулаков, П. А. Цифровой завод - траектория проектно-ориентированного обучения / П. А. Кулаков, Е. Ю. Туманова // Инженерное образование в контексте будущих промышленных революций - СИНЕРГИЯ-2020 : Сборник научных статей международной сетевой научно-практической конференции, Казань, 03 сентября – 04 2020 года / Под редакцией В.В. Кондратьева; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2020. – С. 141-148. – EDN TXEDTP.
5. Файрушин, А. М. Повышение эффективности входного контроля сварщиков при строительстве опасных производственных объектов / А. М. Файрушин, И. А. Марченко, В. С. Хазиев // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2020. – № 6. – С. 58-72. – DOI 10.17122/ogbus-2020-6-58-72. – EDN DYQHMO.
6. Оценка квалификации сварщика с применением цифровых технологий / В. В. Панков, В. М. Букин, С. В. Панков, И. Г. Богородский // Сварка и диагностика. – 2012. – № 6. – С. 54-58. – EDN PKSDUD.