

О ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ПОСРЕДСТВОМ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЗОНЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ*

**Сараев Ю.Н.¹, д.т.н., профессор, Безбородов В.П.^{1,2}, к.т.н., с.н.с.,
Гладковский С.В.³, д.т.н., профессор, Голиков Н.И.⁴, к.т.н., с.н.с.**

¹*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия; E-mail: litsin@ispms.tsc.ru;*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск;*

³*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург;*

⁴*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск*

В работе излагается концепция выполнения исследований по повышению надежности металлических конструкций, предназначенных для работы в условиях низких климатических температур. Проанализированы мировые тенденции в исследовании процессов деформации и разрушения материалов и изделий в условиях низких климатических температур. Сформированы основные методологические подходы, направленные на обеспечение высоких показателей эксплуатационной надежности конструкций малоуглеродистых низколегированных сталей. Проанализированы ранее полученные экспериментальные данные. Намечены направления экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: сварка, надежность, металлическая конструкция, модифицирование, сварное соединение, низкие климатические температуры.

1. Актуальность

В последние годы, в производстве металлоконструкций ответственного назначения, наблюдается непрерывный рост применения продукции сварочно-технического назначения зарубежных производителей. Основной причиной этого, на наш взгляд, является недостаточные качественные показатели продукции отечественного производства, а также их низкие потребительские свойства. Отмеченное обстоятельство представляется очень значимым, поскольку речь идет о необходимости принципиального повышения качества выпускаемой продукции, в том числе и в условиях реализации стратегии импортозамещения продукции сварочно-технического назначения, используемой при производстве высокоответственных конструкций в судостроении, атомной промышленности, энергетике, машиностроении, строительной индустрии, химическом машиностроении, транспорте.

Актуальность успешного выполнения выше перечисленных задач непосредственно связана с вопросами национальной безопасности при реализации на территории России крупных индустриальных проектов государственной важности, в том числе, осуществляемых в интересах развития её Арктической зоны [1].

С учетом изложенного, главным направлением исследований в указанной области должно стать направление по организации и обеспечению опережающего развития сварочного производства на промышленных предприятиях России, а также обеспечение повышения эксплуатационной надежности технических систем ответственного назначения, изготавливаемых с применением нового поколения сварочного оборудования

и материалов, разрабатываемых на основе инновационных технологических и технических решений [2, 3].

2. Методологические основы повышения свойств зон сварных соединений базируются, в частности, на современных представлениях о динамике разрушения материалов.

В настоящее время сварные соединения из одноименных и разнородных металлов и сплавов находят широкое применение в машиностроительных изделиях и строительных конструкциях, в том числе работающих в условиях низких климатических температур. Однако наличие сварного соединения в ряде случаев может способствовать развитию процесса хрупкого разрушения механически нагруженных изделий, конструкций и инженерных сооружений, приводящему к катастрофическим последствиям. При сварке происходят изменение металлургического состояния металла, локальные микроструктурные изменения, а также формируются остаточные напряжения, значительно превышающие их расчетный уровень [4]. Микроструктура металла сварного шва и ЗТВ низкоуглеродистых сталей в зависимости от химического состава, технологии сварки и условий охлаждения может содержать эвтектоидный и игольчатый феррит, крупно - и мелкодисперсный бейнит и мартенсит. Неоднородность структурного состава различных участков сварного соединения существенным образом сказывается на его механических свойствах и сопротивлении хрупкому разрушению. Традиционно для оценки эксплуатационной надежности сварных изделий и элементов конструкций, работающих в сложных температурно-силовых условиях нагружения, используются механические испытания на растяжение, мало - и многоцикловую усталость, а также испытания на ударную вязкость при комнатной и пониженной температурах. Однако адекватная оценка возможности работы сварных изделий при наличии опасных дефектов в виде трещин может быть дана только по результатам испытаний на статическую, циклическую и динамическую трещиностойкость, проводимых с использованием подходов и критериев механики разрушения [5]. Металл различных зон сварных соединений низкоуглеродистых сталей, таких как 09Г2С, 10ХСНД, 16Г2АФ существенно различается по сопротивлению роста усталостной трещины [6]. При этом статическая и циклическая трещиностойкость основного металла как правило всегда выше по сравнению со сварным швом и ЗТВ.

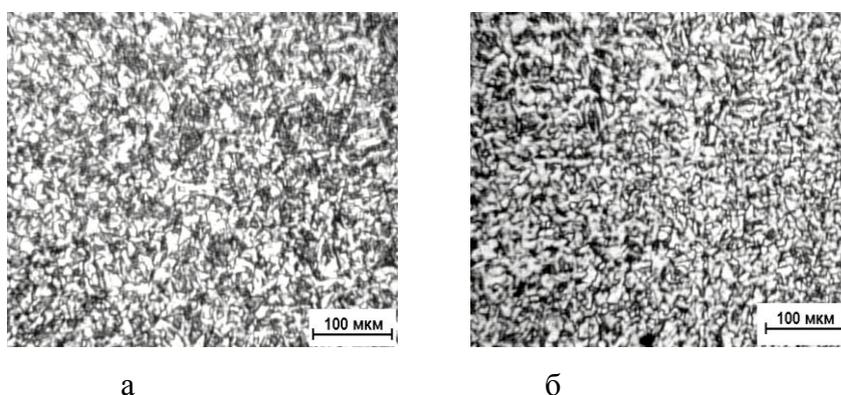


Рисунок 1 - Структура сварного соединения стали 09Г2С: а - металла шва после сварки на постоянном токе; б - металла шва после адаптивной импульсно-дуговой сварки.

Вместе с тем различие в циклической трещиностойкости участков сварных соединений зависит от величины размаха коэффициента интенсивности напряжения в

вершине трещины (ΔK) и соответствующей ему скорости роста усталостной трещины. При скорости роста трещины ниже 10^{-4} мм/цикл металл шва стали 10ХСНД обладает меньшим сопротивлением распространению трещины, чем ЗТВ. Однако при более высоких скоростях роста трещины при переходе в область малоциклового усталости, когда механизм разрушения определяется исходным запасом пластичности и прочности материала, лучшую циклическую трещиностойкость имеет металл шва.

Таблица 1 - Механические свойства металлов шва сварного соединения

Зона сварного соединения	$\sigma_{0.2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %
Шов после сварки на постоянном токе	345	495	15	42
Шов после адаптивной импульсно-дуговой сварки	345	510	18	50

В ряде работ анализируется влияние удельной энергии при сварке, а также технологии процесса сварочного производства на характеристики ударной вязкости низколегированных сталей при комнатной и пониженных температурах [7, 8]. Вместе с тем работы по изучению влияния современных технологий сварочного производства на характеристики трещиностойкости сварных соединений из низкоуглеродистых сталей при различных видах нагружения носят фрагментарный характер. Исключение составляют работы [9, 10], в которых на примере стали 09Г2С показано, что использование новой технологии адаптивного импульсно-дугового процесса сварки за счет диспергирования структуры в зоне сварного соединения позволяет существенно повысить характеристики ударной вязкости, циклической и динамической трещиностойкости (J_{td}) по сравнению с технологией сварки на постоянном токе. Это продемонстрировано в работах авторов, [9, 10] на примерах изменений структуры и механических свойств материалов зон сварного соединения после сварки по технологиям на постоянном токе и адаптивной импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами (рисунок 1 и таблица 1).

Данные таблицы показывают, что способ и технология адаптивной импульсно-дуговой сварки позволяют обеспечить более высокий комплекс прочностных и пластических свойств сварного шва по сравнению с технологией сварки на постоянном токе. Об этом же свидетельствуют и характеристики ударной вязкости и усталостной прочности сварного соединения стали 09Г2С при температуре -60°C , представленные на рисунках 2 и 3.

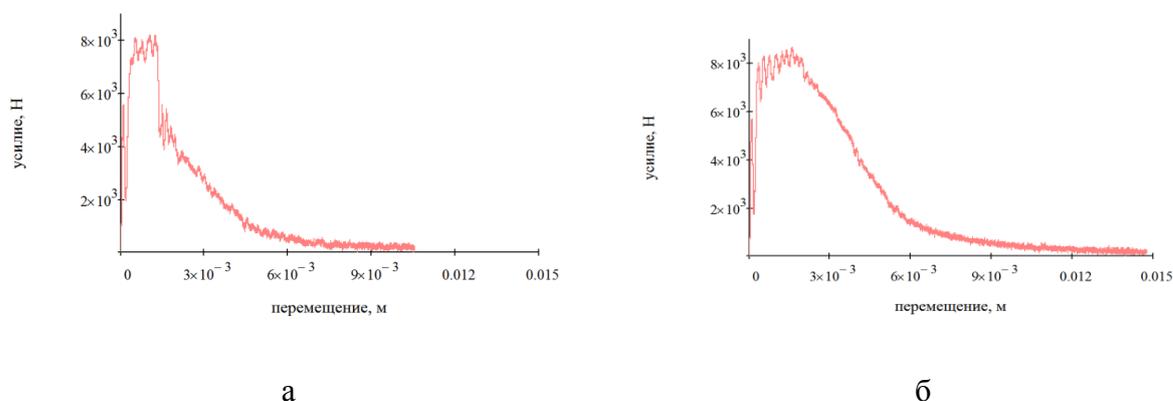
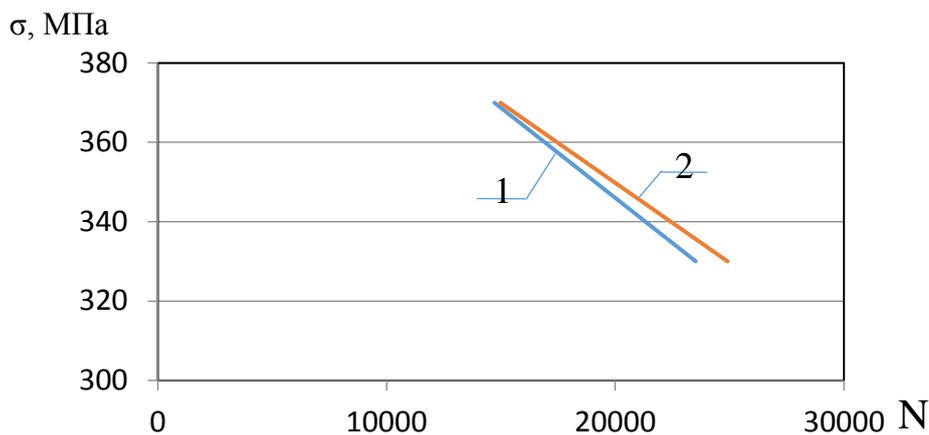
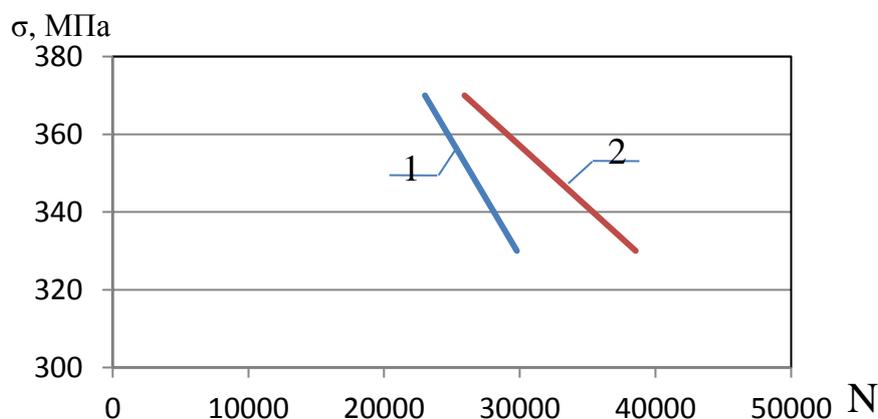


Рисунок 2 - Диаграммы ударного нагружения ЗТВ при температуре -60°C : а - ЗТВ после сварки на постоянном токе; б - ЗТВ после адаптивной импульсно-дуговой сварки.



а



б

Рисунок 3 - Линии малоциклового усталости металла шва сварных соединений после испытаний при комнатной температуре (а) и при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$: 1 - сварка на постоянном токе; 2 - адаптивная импульсно-дуговая сварка.

Результаты испытаний на ударную вязкость свидетельствуют о том, что режим адаптивной импульсно-дуговой сварки обеспечивает снижение риска появления трещин в околошовной зоне в условиях пониженных климатических температур.

Механизм разрушения образцов, полученных после сварки на постоянном токе, при испытанных при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ - квазискол. Образцам после адаптивной импульсно-дуговой сварки характерен смешанный механизм разрушения металла ЗТВ - присутствуют локальные участки с вязким изломом. Это свидетельствует о том, что режим адаптивной импульсно-дуговой сварки позволяет снизить риск появления трещин в ЗТВ.

Указанное направление исследований является весьма перспективным и требует более детальной проработки в научном и технологическом отношении.

3. Анализ направлений фундаментальных и ориентированных исследований по изысканию путей повышения эксплуатационной надежности металлоконструкций ответственного назначения

Исследования, выполненные в последние годы в указанном направлении, ведущими Российскими научно-исследовательскими и учебными учреждениями, позволили сформировать концептуальный подход к решению фундаментальной проблемы

повышения прочностных и эксплуатационных свойств материалов изделий, подвергающихся интенсивному износу [11]. Так, например, обеспечение направленного модифицирующего влияния на структуру зон сварных соединений, может достигаться использованием в процессе сварки дополнительного ультразвукового воздействия на расплав сварочной ванны, а также поверхностным пластическим деформированием зоны термического влияния неразъемного соединения после завершения технологического процесса [12]. При этом применение субмикроструктурных и нано композиционных порошковых материалов может приводить к формированию швов в виде композиций, с включениями микро- и наноразмерных модифицирующих фаз. В процессе формирования шва вкрапления таких фаз в матрице будет приводить к получению дисперсно-упрочненного материала и повышению физико-механических и эксплуатационных свойств сварных соединений и наплавленных изделий [13].

Полученные в указанном направлении результаты исследований позволили создать научно-технический задел:

- в осмыслении кинетики плавления и переноса электродного металла при электродуговой сварке и наплавке, а также процессов кристаллизации металла шва из расплава;

- в оценке влияния напряженно-деформированного состояния материалов на эксплуатационную надежность материалов и изделий;

- в понимании физической природы повышения механических и эксплуатационных свойств материалов, имеющих зоны структурной неоднородности;

- в формировании методологии разработки методов диагностики и управления характером распределения остаточных напряжений в зонах неразъемных соединений.

Следует признать, что накопленный к настоящему времени экспериментальный опыт, **носит фрагментарный характер** и, требует более глубокого и комплексного изучения особенностей физических процессов, сопровождающих образование зон неразъемных соединений, в том числе и их структурной неоднородности, играющей определяющую роль в ускоренном появлении и развитии микродефектов, приводящих к необратимым процессам разрушения [14].

Исследователями из многих стран мира осуществляется поиск путей снижения структурной неоднородности неразъемных соединений, в том числе и путем измельчения в них структурных элементов. Для промышленно развитых стран, характерен принцип жесткого задания энергетических параметров сварочного процесса. Регулирование процессов плавления и переноса электродного металла в дуге осуществляется за счет металлургического и физического воздействия - введением активирующих добавок, применением смесей газов. Однако, на наш взгляд этого не достаточно для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик.

Для решения данной проблемы требуется разработка принципиально новых положений теории сварочных процессов, учет которых при реализации технологических процессов сварки и наплавки позволит обеспечить повышение эксплуатационной надежности сварных конструкций и изделий техники специального назначения в целом.

В технологиях сварки и наплавки, применяемых при производстве и ремонте технических систем ответственного назначения, в качестве инструмента повышения их качества эффективными могут стать методы адаптивного импульсного управления сложной электродинамической системой: источник питания - дуга - сварочная ванна -

изделие [15]. Технологические процессы, в которых будет реализовано такое управление, позволят обеспечить оптимальное тепловложение при сварке и наплавке, а также выполнить условие равнопрочности зон формируемых неразъемных соединений. Надежность неразъемных соединений определяет долговечность эксплуатации металлоконструкции в целом [16].

Одним из положительных примеров реализации вышеприведённых примеров повышения качественных характеристик создаваемых технологий может быть пример, который позволяет исключить недостатки процесса сварки в среде CO_2 . Этот процесс. До сих пор, является одним из самых массовых способов сварки, применяемым для производства металлических конструкций. Однако, присущие данному процессу недостатки, такие как повышенное разбрызгивание и нестабильность процесса плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, сдерживало его широкое применение [17]. Вместе с тем, в результате интенсивных исследований, выполненных российскими учеными, стало возможным создать перспективное направление по использованию методов адаптивного импульсного управления плавлением и переносом каждой каплей электродного металла независимо от действия многочисленных возмущений, что коренным образом позволило устранить имеющиеся недостатки вышеназванного процесса [18].

Это в свою очередь, позволило в конце восьмидесятых годов двадцатого столетия, впервые в мире выполнить механизированную одностороннюю сварку плавящимся электродом в среде CO_2 «короткой дугой» корневых швов с формированием обратного валика на весу без использования дополнительных подкладок и подварки с обратной стороны (рисунок 4).



а

б

Рисунок 4 - Снимки вертикальной адаптивной импульсно-дуговой сварки корневого шва способом сверху – вниз судовых конструкций в CO_2 с переносом электродного металла во время принудительных коротких замыканий дугового промежутка (а) и внешний вид корневого шва с обратной стороны (б)

Начиная с середины девяностых годов двадцатого столетия, ведущими мировыми производителями сварочного оборудования и материалов, начато активное использование, созданного российскими учеными научно-технического задела, при создании огромного количества процессов сварки [19, 20, 21]: STT (Surface Tension Transfer - перенос за счет

сил поверхностного натяжения), СМТ (Cold Metal Transfer - «холодный перенос электродного металла»). Fast Root (быстрая сварка корня шва), Speed Root (высокоскоростная сварка корня шва) и другие.

Перечисленные процессы в основном повторяют созданные Российскими учеными алгоритмы управления, составляющими основу адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки [22, 23].

4. Основные задачи по развитию направлений фундаментальных и ориентированных исследований, обеспечивающих повышение надежности металлоконструкций ответственного назначения в условиях низких климатических температур Крайнего Севера и Арктики.

Современные требования к качеству изделий и конструкций машиностроительных производств обуславливают тенденцию возрастания доли легированных сталей в общем объеме. Стремление конструкторов к применению нового поколения машиностроительной продукции может быть вполне оправдано, поскольку при этом повышаются прочностные характеристики как всего изделия в целом, так и отдельных ресурсопределяющих узлов и деталей. Вместе с тем, какими бы уникальными свойствами ни обладал используемый для создания металлоконструкции материал, в процессе изготовления указанные свойства ухудшаются вследствие влияния зон структурной неоднородности, появляющихся в результате повторного расплавления и кристаллизации металла шва. Вследствие этого сварное соединение всегда является концентратором напряжений.

В сварных соединениях конструкционных низко - и среднелегированных сталей при сварке во время охлаждения происходит вторичная кристаллизация, связанная с образованием структур распада аустенита. Характер этих структур зависит как от составов шва и основного металла, так и от термического цикла сварки. В многослойных швах структурная неоднородность усиливается за счет термического воздействия на нижележащие слои при наложении верхних слоев. Вследствие происходящих фазовых превращений, при охлаждении, это приводит к образованию слоев перекристаллизации и обуславливает их слоистую обработку. Многократное термическое воздействие приводит к охрупчиванию корневых швов и возникновению в них трещин. В целом, развитая химическая и структурная неоднородности сварных швов и зоны соединения оказывают большое влияние на их механические свойства.

Применение высококачественных электродов зарубежных фирм существенно увеличивает стоимость продукции, а применение новых марок порошковых проволок большого диаметра связано с трудностями обеспечения надлежащих условий транспортировки, хранения и обращения с этим чувствительным к внешним воздействиям и несовершенству технологии сварки материалом. Наряду с выше указанным, для сварных соединений, получаемых традиционными методами сварки, характерны большой разброс значений уровней механической и усталостной прочности, низкая ударная вязкость, особенно при отрицательных температурах, что также обусловлено неоднородностью структуры.

Создание новых материалов, обладающих более высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами, связано с получением оптимального сочетания структур, наличия равномерного распределения по объему легирующих элементов, обеспечивающих высокие технологические свойства.

В основе создания материалов с заданными свойствами лежат два основных подхода: изменение химического состава и формирование необходимой структуры материала. На этих же принципах основаны методы упрочнения поверхностей за счет модифицирования слоя материала (без изменения геометрических размеров детали) и за счет нанесения покрытия на поверхность детали, когда размеры детали изменяются на величину нанесенного слоя покрытия. В первом случае изменяются или структура материала в поверхностном слое, или химический состав и распределение элементов по глубине слоя, или, одновременно, и то, и другое. Во втором случае главным фактором, определяющим упрочнение, является выбранный материал покрытия, отличающийся от основного материала детали и обеспечивающий требуемые свойства поверхности.

Таким образом, для решения проблемы повышения эксплуатационной надежности, прежде всего, усталостной и механической прочности сварных соединений, изготавливаемых из современных марок легированных сталей, необходим новый подход, основанный на комплексном сочетании методов и технологий сварки и наплавки, разрабатываемых на основе адаптивных импульсных алгоритмов управления процессами, модифицировании субмикро- и наноразмерными тугоплавкими частицами присадочных материалов, флюсов, порошковых проволок и обмазок электродов.

При этом, доминирующий вклад в достижении положительного результата должно внести обеспечение стабильности функционирования сложной электродинамической системы «источник питания - дуга - сварочная ванна - изделие», которая, даже при влиянии на неё многочисленных возмущающих воздействий, способна гарантировать получение требуемых физико-механических и эксплуатационных свойств сварных соединений из сталей, применяемых в экстремальных условиях низких климатических температур.

С учетом сказанного необходимо кардинально изменить концепцию проведения исследований быстропротекающих процессов плавления и переноса электродного металла, кристаллизации металла шва из расплава, усовершенствовать методы модифицирования зон неразъемных соединений, с целью снижения структурной неоднородности в этих областях.

Результаты исследований позволят создать концептуальные основы для разработки, производства и практического применения нового поколения технологического оборудования и новых энерго- и ресурсосберегающих технологий.

5. Заключение

Опыт эксплуатации металлоконструкций ответственного назначения в условиях Крайнего Севера показывает, что в зонах сварных соединений происходит деформационное старение, приводящее к снижению прочности и несущей способности металла, а также к последующему развитию усталостных трещин и разрушению.

В зонах сварных соединениях сталей, полученных с применением адаптивной импульсно-дуговой сварки, снижается структурная неоднородность, и повышаются физико-механические и эксплуатационные свойства. Это открывает новые возможности в широком использовании создаваемых технологий при производстве ответственных металлоконструкций.

Предлагаемый подход базируется на проведении комплексных исследований по повышению надежности и живучести техническим систем ответственного назначения,

эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, применении управления микрометаллургическими процессами в электродном материале и металле шва за счет использования адаптивных импульсных технологических процессов сварки, новых сварочных материалов, а также после сварочной ударной механической обработки зон структурной неоднородности.

Данный подход является оригинальным, и не имеет аналогов в мировой практике.

** Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда в 2016 году, проект №16-19-10010.*

Литература

1. Научно-технические проблемы освоения Арктики / Дынкин А.А., Верниковский В.А., Добрецов Н.Л. и др. // Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительный центр РАН «Издательство «Наука». – Москва. – 2015. – с. 490.
2. Ларионов В.П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера / Ларионов В.П., Слепцов О.Е., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. // Вестник академии военных наук. - 2008. - № 3. С. 67.
3. Ларионов В.П., Слепцов О.И., Михайлов В.Е. и др. Рекомендации по технологии сварки металлоконструкций и машин, эксплуатируемых при низких температурах / Ларионов В.П., Слепцов О.И., Михайлов В.Е. и др. / Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР. – 1987. – с. 23.
4. Бакши О.А. О совместном влиянии концентрации напряжений, свойств металла околошовной зоны и остаточных напряжений на усталость образцов при плоском напряженном состоянии / Бакши О.А., Клыков Н.Н., Романов Е.С. // Автоматическая сварка. - 1971.- № 7. - С. 8-10.
5. Винокуров В.А. Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / Винокуров В.А., Куркин С.А., Николаев Г.А. / Монография под ред. Б. Е. Патона. - М.: Машиностроение. – 1996. - 576 с.
6. Москвичев В.В. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. - Новосибирск: Наука. – 2002. - 334 с.
7. Лебедев Б.Ф. Зависимость ударной вязкости ЗТВ сварных соединений низколегированных сталей от удельной энергии при сварке / Лебедев Б.Ф., Пашин Г.А., Дудко М.С. // Автоматическая сварка. – 1987. - № 4. - С.7 - 10.
8. Shin H.S. Low temperature impact toughness of structural steel welds with different welding processes / Shin H.S., Park K.T., Lee C.H. et al. / KSCE Journal of Civil Engineering. – 2015. - Vol. 19. - Is. 5. - p. 1431 - 1437.
9. Сараев Ю.Н. Повышение эксплуатационных свойств металлоконструкций для работы в условиях низких климатических температур методами адаптивной импульсно-дуговой наплавки / Сараев Ю.Н., Гладковский С.В., Голиков Н.И., Веселова В.Е. // Сварочное производство. – 2015. - № 11. – с. 33-41.
10. Сараев Ю.Н. Исследование свойств сварных соединений марганцовистой стали, полученных низкочастотной импульсно-дуговой сваркой / Ю.Н. Сараев, В.П. Безбородов, С.В. Гладковский, Н.А. Голиков // Деформация и разрушение. – 2016. - № 4. – с. 36 – 41.
11. Псахье С.Г. Концептуальный подход к разработке современных технологий производства, ремонта и упрочняющей обработки ресурсопределяющих деталей и

- изделий автобронетанковой техники Вооруженных Сил России / Псахье С.Г., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. // Вестник Академии военных наук. - 2008. - № 3. - с. 27 - 30.
12. Башенко А.П. Воздействие высоких динамических давлений на структуру и механические свойства мартенситных сталей 38ХС и 30ХГСН2А / Башенко А.П., Меттус А.О., Спасский М.Н., Орленко Л.П. // Физика металлов и металловедение. - 1983. - Т.55. - № 6. - С.1202-1206.
13. Сараев Ю.Н. Модифицирование покрытий тугоплавкими соединениями и высокоэнергетическим воздействием как метод повышения эксплуатационной надежности ресурсопределяющих изделий / Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Оришич А.М., Ильющенко А.Ф., Скаков М.К. // Сварочное производство. - 2011. - № 7. - с. 24 - 30.
14. Плешанов В.С. Статическая и малоцикловая прочность сварных соединений низколегированной стали на мезомасштабном уровне / Плешанов В.С., Сараев Ю.Н., Лавров О.Н., Дашук Ю.Т., Козлов А.В. // Сварочное производство. - 2000. - № 4. - с. 12 - 17.
15. Лоос А.В. Источники питания для импульсных электротехнологических процессов / Лоос А.В., Лукутин А.В., Сараев Ю.Н. / Издательская полиграфическая фирма ТПУ. - Томск. - 1998. - 159 с.
16. Сараев Ю.Н. Исследование Влияния адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и остаточные напряжения сварных соединений стали марки 09Г2С / Сараев Ю.Н., Голиков Н.И., Дмитриев В.В., Санников И.И., Безбородов В.П., Григорьева А.А. // Обработка металлов. - 2013. - № 3. - с. 19 - 24.
17. Потапьевский А.Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / А.Г. Потапьевский, Ю.Н. Сараев, Д.А. Чинахов / Юргинский технологический институт. - Томск: Издательство Томского политехнического университета. - 2012. - 208 с.
18. Сараев Ю.Н. Особенности разработки электротехнологических процессов сварки и наплавки на основе алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2015. - Т.3. - №3. - с. 3-11.
19. Квасов Ф.В. Особенности механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла // Сварочное производство. - 1999. - № 8. - С.27 - 31.
20. Yapp, D. Recent developments in high productivity pipeline welding. Journal of the Brazilian Society of Science and Engineering / Yapp, D., u. A. Blackman. - 2004. - Н. 26, p. 89-97.
21. Mannion, B. Setting up and determining parameters for orbital tube welding / Mannion, B., u. J. Heinzmann // The Fabricator 29/ - 1999. - Н. 5, p. 26-30.
22. Сараев Ю.Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов // Сварочное производство. - 2002. - № 1. - с. 4 - 11.
23. Сараев Ю.Н. Опыт разработки и практического применения адаптивных импульсно-дуговых методов сварки для строительства и ремонта магистральных трубопроводов // Вопросы материаловедения. - 2015. - № 1. - С. 210-219.

ON IMPROVING RELIABILITY OF METAL STRUCTURES WHEN OPERATING AT LOW CLIMATIC TEMPERATURES THROUGH THE INTEGRATED USE OF MODERN METHODS OF MODIFICATION OF THE ZONE WELDED JOINT*

Saraev YuN¹, professor, Bezborodov VP^{1, 2}, Ph. D., senior researcher, Gladkovsky SV³, professor and Golikov NI⁴, Ph. D., senior researcher

¹Institute of strength physics and materials science SB RAS, Academic PR., 2/4, Tomsk, 634055, Russia; E-mail: litsin@ispms.tsc.ru;

²National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk;

³Institute of mechanical engineering, Ural branch of RAS, Ekaterinburg;

⁴Institute of physical and technical problems of the North it. V. P. Larionov SB RAS, Yakutsk

Abstract

In the work the concept of performing research to improve the reliability of metal structures intended for operation in conditions of low climatic temperatures. Analyzed global trends in the study of the processes of deformation and fracture of materials and products in conditions of low climatic temperatures. Formed the main methodological approaches to ensuring high operational reliability of the structures of low-carbon low-alloy steels. Analyzed previous experimental data. Directions of experimental and theoretical studies.

Key words: welding, safety, metal construction, modification, weld, low climatic temperature.

Сведения об авторах

об авторах статьи Ю.Н. Сараева, В.П. Безбородова, С.В. Гладковского, Н.И. Голикова «О повышении надежности металлических конструкций при эксплуатации в условиях низких климатических температур посредством комплексного применения современных методов модифицирования зоны сварного соединения»

1. Сараев Юрий Николаевич, доктор технических наук, доцент, пр. Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН, г. Томск, 634055, Россия. Раб. телефон: (3822)492-942. Моб. Тел.: +7-963-193-55-73. E-mail: litsin@ispms.tsc.ru.

2. Безбородов Валерий Павлович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Академический, 2/4, ИФПМ СО РАН, г. Томск, 634055, Россия. Раб. телефон: (3822)286-850. E-mail: val@ispms.tsc.ru.

3. Гладковский Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, ул. Комсомольская, 34, Институт машиноведения УрО РАН г. Екатеринбург, 620049, Россия. Телефон: 8(343) 362-42-17. E-mail: gsv@imach.uran.ru.

4. Голиков Николай Иннокентьевич, кандидат технических наук, ул. Октябрьская, д. 1, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, 677980, Россия. E-mail: n.i.golikov@mail.ru. Моб. Телефон: 8-914-237-27-19.