Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2017 № 4(77) с. 30–42
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2017-4-30-42

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Поисковые исследования повышения надежности сварных металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых в условиях Севера

Юрий Сараев [1, a, *], *Николай Голиков* [2, b*], *Михаил Сидоров* [2, c], *Екатерина Максимова* [2, d], *Сергей Семёнов* [2, e], *Марина Перовская* [1, f]

[1] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия
[2] Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, ул. Октябрьская, 1, г. Якутск, 677981, Россия

[a] http://orcid.org/0000-0002-9457-4309, litsin@ispms.tsc.ru, [b] http://orcid.org/0000-0001-9209-1592, n.i.golikov@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0001-7490-2777, sidorovmm@bk.ru, [d] http://orcid.org/0000-0001-6556-1659, nikiforova_em@mail.ru,
[e] http://orcid.org/0000-0002-6639-9195, s1789@mail.ru, [f] http://orcid.org/0000-0003-2780-6023, mv_perovskaya@inbox.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 812.35.15.14

История статьи:
Поступила: 19 сентября 2017
Рецензирование: 16 октября 2017
Принята к печати: 3 ноября 2017
Доступно онлайн: 15 декабря 2017

Ключевые слова:
Сварные соединения
Металл шва
Импульсно-дуговая сварка
Покрытые электроды
Низкие климатические температуры
Механические свойства
Структура
Ударная вязкость
Погонная энергия сварки

Финансирование:
Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 16-19-10010.

АННОТАЦИЯ

Введение. Сварка оказывает большое влияние на работоспособность создаваемых конструкций, эксплуатируемых в условиях низких климатических температур, вследствие снижения сопротивляемости зарождению и распространению трещин в зоне термического влияния и металла шва. Несмотря на существующее достаточно большое количество способов повышения надежности сварных соединений, некоторые из них сейчас полностью исчерпали свои возможности, а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому разработка необходимой специальной технологии сварки в условиях низких температур остается актуальной проблемой. **Цель работы:** изыскание путей повышения надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения при сварке в условиях низких температур. **В работе исследованы** сварные соединения стали 09Г2С, полученные сваркой на постоянном токе и в режиме импульсной низкочастотной модуляции тока в условиях положительных (+20 °С) и отрицательных (-45 °С) температур окружающего воздуха с применением трех новых марок сварочных электродов. **Методами исследования** являются механические испытания на статистическое растяжение и на ударный изгиб образцов сварных соединений, а также спектральный анализ химического состава и металлографические исследования металла шва. **Результаты и обсуждение**. Выявлено, что эксплуатационные показатели металлоконструкций зависят от выбора способа и температуры выполнения сварки, а также характеристик сварочного материала. Установлено, что для повышения значений ударной вязкости образцов, сваренных в условиях отрицательных температур методом адаптивной импульсно-дуговой сварки, требуется увеличение тепловложения относительно погонной энергии, реализуемой в процессе сварки образцов при положительной температуре. Подтвержден эффект измельчения структуры металла шва при использовании адаптивной импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами, в том числе и в условиях отрицательной температуры окружающего воздуха (вплоть до -45 °С). Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на получение новых классов материалов и изделий из них, предназначенных для работы в условиях Севера и Арктики.

Для цитирования: Поисковые исследования повышения надежности сварных металлоконструкций ответственного назначения, эксплуатируемых в условиях Севера / Ю.Н. Сараев, Н.И. Голиков, М.М. Сидоров, Е.М. Максимова, С.В. Семенов, М.В. Перовская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 4 (77). – С. 30–42. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-30-42.

Введение

Исчерпание работоспособности ответственных конструкций, эксплуатируемых в условиях холодного климата, имеет ускоренный характер. Экстремальные погодно-климатические условия занимают большую часть годового периода на территории Крайнего Севера и Арктики и значительно влияют на их эксплуатацию. В основном

***Адрес для переписки**
Сараев Юрий Николаевич, д.т.н., главный научный сотрудник,
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4, 634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8-3822-492-942, 8-3822-286-990, **e-mail:** litsin@ispms.tsc.ru

Голиков Николай Иннокентьевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник,
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
ул. Октябрьская, 1, 677981, г. Якутск, Россия
Тел. 8-4112-35-88-69, **e-mail:** n.i.golikov@mail.ru

разрушения конструкций связаны с накоплением технологических эксплуатационных повреждений и возникновением хрупких трещин в зонах их сварного соединения. В целом поток аварий металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях зимнего периода по сравнению с летним, увеличивается в 2-3 раза, по некоторым данным до 4... 6 раз, что наносит экономике России большие убытки [1–3].

Помимо длительного воздействия низких температур существуют другие факторы, усложняющие эксплуатацию конструкций в условиях северной и арктической зоны. В частности, проведение сварочных работ в условиях отрицательных температур окружающего воздуха, при котором увеличивается скорость охлаждения сварных соединений, уменьшается диффузия водорода. В результате снижаются температуры структурных превращений, существенно понижается удаление водорода из зон, склонных к образованию холодных трещин, смещаются в сторону положительных температур критические температуры хрупкости [1].

Сварка, как основной метод металлообработки, применяемый при создании конструкций ответственного назначения, оказывает большое влияние на прочностные свойства создаваемых конструкций, работающих в различных условиях эксплуатации и климатических температур. Обеспечение требуемых свойств выполняется выбором сварочных материалов, режима сварки и подогрева с учетом естественного рассеяния ряда технологических параметров сварки, а также характеристик основного и сварочных материалов [4–7]. Общими недостатками используемых технологий является появление в неразъемных соединениях зон структурной неоднородности, которые определяют поведение металлоконструкции на протяжении всего её жизненного цикла [8–13].

В настоящее время, несмотря на существующее довольно большое количество способов повышения технологической и эксплуатационной прочности сварных соединений, некоторые из них полностью исчерпали свои возможности, а другие не доведены до стадии широкого практического применения. Поэтому разработка необходимой специальной технологии сварки в условиях низких температур остается актуальной научно-технической задачей, направленной на решение проблемы повышения надежности и безопасности изделий техники и конструкций, эксплуатируемых в условиях Севера и Арктики.

Следует признать, что радикальное решение проблемы создания неразъемных соединений с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами при снижении их ресурсо- и энергоемкости требует нетрадиционных подходов. Одним из перспективных направлений такого подхода является применение методов сварки, основанных на реализации алгоритмов импульсного управления энергетическими параметрами процесса.

Цель работы: изыскание путей повышения надежности сварных соединений металлоконструкций ответственного назначения при сварке в условиях низких температур.

Методики исследований и материалы

Для исследований были подготовлены под сварку пластины размерами 150×300×12 мм из листовой стали 09Г2С, скосом кромок (25±2)°. Пластины были собраны встык в специальном кондукторе с зазором 2,5…3,0 мм, исключающим коробление пластин в процессе и после сварки. Сварку осуществляли в три прохода электродами диаметрами 3,0 и 4,0 мм на постоянном токе (СПТ) и с модуляцией тока (СМТ) – метод адаптивной импульсно-дуговой сварки. Конструктивные элементы свариваемых образцов и размеры швов выполнены в соответствии с ГОСТ 5264–80. Перечень использованных электродов и их химический состав приведены в табл. 1. При сварке с модуляцией тока в выходную цепь источника питания дополнительно включался специальный полупроводниковый коммутатор тока, работающий по принципу импульсно регулируемого сопротивления. В этом случае благодаря полупроводниковому ключу электрическая дуга получает питание от двух чередующихся по определенной программе энергетических уровней источника питания: высокий энергетический уровень (импульс), на интервале которого происходит высококонцентрированное выделение на дуге энергетического потока, способствующего быстрому нагреву зоны соединения, и низкий энергетический уровень (пауза), на интервале которого происходит частичное остывание расплавленного металла, уменьшение его

Таблица 1
Table 1

Электроды, применяемые при сварке образцов
Welding Electrodes

Марка электрода	C, %	Si, %	Mn, %	Ni, %	Mo, %	S, %	P, %
УОНИ-13/МОРОЗ	0,075	0,3	0,7	2,8	–	0,010	0,017
Э50А-ХОБЭКС-К-54	0,09	0,42	0,83	–	–	0,022	0,024
LB-52TRU	0,09	0,42	0,9	–	–	0,017	0,020

теплосодержания и, как следствие, увеличение скорости кристаллизации расплава, что способствует минимальным структурным изменениям, а следовательно, и минимальным напряжениям и деформациям [14]. Режимы и параметры сварки приведены в табл. 2.

В процессе сварки производили регистрацию основных энергетических параметров (тока и напряжения дуги) при помощи цифрового запоминающего осциллографа «АКИП-4122/1V», дифференциального пробника «Pintek Electronics «DP-50» и токосъемного блока «current probe PR 1030». Полученные результаты обрабатывали с применением программы «OWON_Oscilloscope_2.0.8.26». Регистрацию термических циклов производили тепловизором «Therma CAM^{TM}P65HS». В ходе технологического эксперимента оценивали время сварки и рассчитывали среднее тепловложение в соответствии с общепринятой методикой. Полученные результаты подвергались статистической обработке с получением гистограмм основных энергетических параметров.

Сварку пластин производили как при положительных, так и отрицательных температурах окружающего воздуха. Номера сваренных пластин различными электродами и при различных температурах окружающего воздуха приведены в табл. 3.

Спектральный анализ содержания легирующих элементов металла шва получен по результатам трех измерений каждого образца на установке «Foundry-master».

Исследование макроструктуры образцов проводили с помощью оптического микроскопа МБС-10 при увеличении ×12, микроструктуры с помощью оптического микроскопа NEOPHOT-21 при увеличении ×200. Травление шлифов осуществляли химическим способом в 3 %-м спиртовом растворе азотной кислоты

Таблица 2
Table 2

Режимы и параметры сварки пластин 09Г2С
Modes and parameters of the 09G2S billet welding

Номер пластины	Режим сварки	Параметры тока и напряжения	Ток импульса, $I_и$; длительность импульса, $t_и$; частота модуляции, f	Ток паузы $I_п$, длительность паузы $t_п$
8, 12,16, 10, 14, 18	На постоянном токе	Корень: Ø 3,0 мм: $I_{д\,ср}$ = 70…90 А; $U_{д\,ср}$ = 20…22 В Заполнение: Ø 4,0 мм: $I_{д\,ср}$ = 120…169 А; $U_{д\,ср}$ = 23…26 В	–	–
7,11,15, 9, 13, 18	С модуляцией тока	Корень: Ø 3,0 мм: $I_{д.ср}$ = 80…100 А; $U_{д\,ср}$ = 20…22 В Заполнение: Ø 4,0 мм: $I_{д.\,ср}$ = 140…170 А; $U_{д\,ср}$ = 22…25 В	$I_и$ = 80…110 А $t_и$ = 0,3 с $I_и$ = 170…200 А $t_и$ = 0,3 с f =1,67 Гц	$I_п$ = 29 А; $t_п$ = 0,3 с $I_п$ = 35 А; $t_п$ = 0,3 с

Таблица 3
Table 3

Маркировки пластин для каждого режима и условий сварки
Plates marking for each mode and conditions of welding

Режимы и условия сварки	Марка электродов		
	ЛБ-52TRU	ХОБЭКС-К-54	УОНИ 13/Мороз
	Маркировка сварных проб, №		
Сварка с модуляцией тока при температуре (+20) °С	7	11	15
Сварка на постоянном токе при температуре (+20) °С	8	12	16
Сварка с модуляцией тока при температуре (–40) °С	9	13	17
Сварка на постоянном токе при температуре (–40) °С	10	14	18

с погружением шлифа до выявления границ сварного шва.

Механические испытания на растяжение и ударный изгиб металла сварного соединения выполняли в соответствии с ГОСТ 6996–66. Статическое растяжение образцов с целью определения предела текучести, предела прочности, относительного удлинения сварных соединений проведено на универсальной электромеханической испытательной машине «Zwick Roell Z600», ударный изгиб образцов с V-образным надрезом при температурах испытаний (–20) °С, (–40) °С и (–60) °С осуществлен на инструментированном маятниковом копре «Amsler RKP 450». V-образные надрезы образцов наносили на специальном станке «Black Charpy», охлаждение образцов до требуемых температур во время испытаний производилось в климатической камере «Lauda».

Результаты и их обсуждение

В табл. 4 представлены усредненные результаты спектрального анализа химического состава образцов, вырезанных из сварных соединений каждой пластины.

Анализ результатов спектрального анализа показывает, что наибольшее отличие в содержании

Таблица 4
Table 4

Химический состав исследованных образцов
The chemical composition of the samples

Номер образца	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo	Cu	Fe
7	0,06	0,74	1,28	0,06	0,25	0,02	0,01	0,02	0,23	Ост
8	0,05	0,64	1,10	0,06	0,13	0,02	0,01	0,02	0,19	Ост
9	0,06	0,53	1,05	0,06	0,12	0,02	0,01	0,02	0,19	Ост
10	0,05	0,63	1,15	0,06	0,13	0,02	0,01	0,02	0,19	Ост
11	0,06	0,54	1,30	0,06	0,09	0,02	0,02	0,02	0,17	Ост
12	0,06	0,51	1,32	0,06	0,09	0,02	0,01	0,02	0,16	Ост
13	0,06	0,56	1,38	0,05	0,09	0,02	0,02	0,02	0,16	Ост
14	0,07	0,59	1,30	0,09	0,10	0,02	0,01	0,02	0,19	Ост
15	0,07	0,40	0,80	0,10	2,74	0,02	0,01	0,08	0,17	Ост
16	0,07	0,40	0,80	0,10	2,77	0,02	0,01	0,08	0,17	Ост
17	0,07	0,38	0,73	0,10	2,68	0,02	0,01	0,08	0,18	Ост
18	0,07	0,38	0,80	0,10	2,70	0,02	0,01	0,08	0,17	Ост

химических элементов в металлах шва сварных соединений пластин имеется в процентном содержании элементов марганца Mn) и никеля (Ni) и зависит от химического состава сварочного материала.

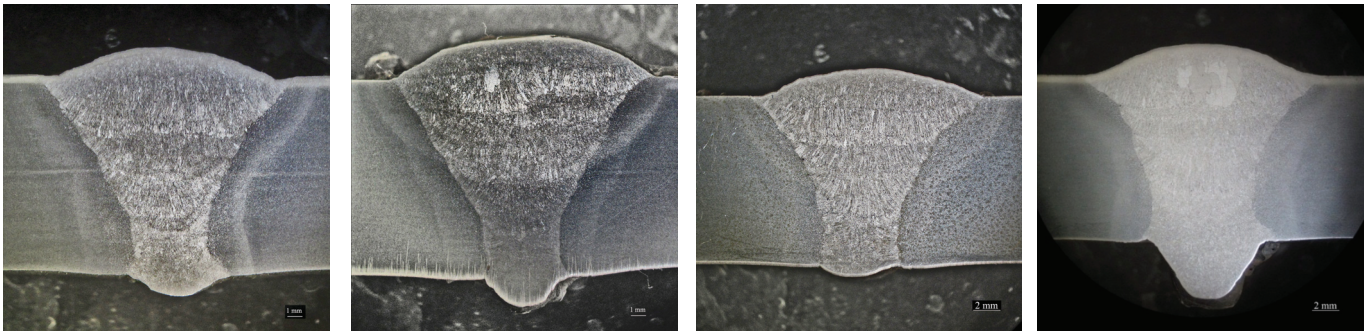
Так, наибольшее содержание Mn в интервале 1,30…1,38 % имеется у образцов с маркировками № 11–14, полученных сваркой с применением электродов марки ХОБЭКС-К-54. У образцов № 7–10 содержание Mn составило 1,05…1,28 %, их сварка осуществлялась с применением электродов ЛБ 52TRU, а наименьшее содержание этого элемента, равное 0,73…0,80 %, наблюдается у образцов № 15–18, полученных сваркой с применением электродов УОНИ 13/Мороз.

Наибольшее количество содержания Ni, равное 2,68...2,77 %, выявлено у образцов с маркировками № 15–18, полученных сваркой с применением электродов УОНИ 13/Мороз. У образцов № 7–10, полученных сваркой с применением электродов марок ЛБ 52TRU, составляет 0,12…0,25 %. Наименьшее количество содержания этого элемента, равное 0,09…0,10 %, наблюдается у образцов № 11–14, полученных сваркой с применением электродов ХОБЭКС-К-54.

Исследования микроструктуры металла шва облицовочного слоя всех образцов показали, что они имеют крупнозернистую столбчатую структуру, где зерна вытянуты в одном направлении. Металл шва заполняющего и корневого слоев всех образцов имеют характерную мелкозернистую структуру с равномерным распределением зерен феррита и перлита, что особенно часто встречается при многослойной сварке. Выявлено, что при сварке с модуляцией тока размер зерен металла шва меньше, чем при сварке на постоянном токе.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее полученными приведенными в работах [15, 16] результатами, в которых был установлен эффект существенного измельчения структуры металла шва и зоны термического влияния при использовании адаптивной импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами. Вышеуказанный эффект достигается за счет регулируемого тепловложения, а также возможности управления процессами плавления и кристаллизации металла шва при частотах модуляции, лежащей в диапазоне 0,25…5,0 Гц [16]. Увеличение частоты свыше 5,0 Гц приводит к усреднению теплового потока, и эффекта регулируемого тепловложения не происходит из-за теплоинерционности расплава. При этом резко возрастает размер зерна и увеличивается в размерах зона термического влияния.

Существенная разница обнаружена в структурах облицовочных слоев металла шва в зависимости от условий сварки. В облицовочных слоях всех образцов, полученных в условиях отрицательных температур, наблюдаются крупные участки структурных составляющих в виде белых пятен. В условиях положительных температур независимо от марки применяемого электрода и режима сварки таких пятен не наблюдается. Структуры остальных слоев (заполняющие и корневые) практически одинаковы во всех случаях. В качестве примера на рис. 1 приведена макроструктура сварных соединений образцов



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Макроструктура стыковых соединений, выполненных электродами марки «УОНИ 13/Мороз»:
а – образец № 15 СМТ (+20 ºС); *б* – образец № 17 СМТ (–45 ºС); *в* – образец № 16 СПТ (+20 ºС); *г* – образец № 18 СПТ (–45 ºС)

Fig. 1. Macrostructure of butt joints made with electrodes classification “УОНИ 13 /Мороз”:
а – sample N 15; *б* – sample N 16; *в* – sample N 17; *г* – sample N 18

№ 15–18, полученных сваркой в условиях положительной и отрицательной температуры с применением электрода марки УОНИ 13/Мороз.

В табл. 5 представлены средние значения механических характеристик по типам образцов. Временное сопротивление и предел текучести образцов, разрушенных по основному металлу при изменениях температуры и режимов сварки (СМТ, СПТ), практически не меняется. Разброс значений в пределах 2 %. Относительное удлинение образцов, сваренных при разных температурах, не имеет существенных различий.

Таблица 5

Table 5

Средние значения механических характеристик образцов

Mean values of the samples mechanical characteristics

№ п/п	Типы образцов	Механические характеристики		
		Временное сопротивление, $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Относительное удлинение δ, %
1	Все образцы, разрушенные по основному металлу	534	405	26,26
2	Образцы, разрушенные по основному металлу Сварка при комнатной температуре (+20) °С	537	412	25,84
3	Образцы, разрушенные по основному металлу Сварка при отрицательных температурах ниже (–45) °С	533	403	26,43
4	Образцы, разрушенные по основному металлу Сварка с модуляцией тока	533	403	24,99
5	Образцы, разрушенные по основному металлу Сварка на постоянном токе	536	408	27,53
6	Все образцы с дефектами, разрушенные по линии сплавления	505	399	14,78

По результатам ударных испытаний построены графики зависимости ударной вязкости (KCV) металла шва, полученной сваркой с применением трех различных марок электродов от температуры испытаний (рис. 2–4).

В табл. 6 показано сравнение средних значений ударной вязкости (KCV) металла шва (МШ), полученных при сварке в условиях положительных и отрицательных температур.

Установлено, что ударная вязкость образцов, сваренных при положительных температурах, выше, чем при отрицательных для каждой марки сварочного электрода. Наиболее значительная разница значений KCV в пределах 20 % выявлена у электродов марки ХОБЭКС-К-54. Разница значений KCV электродов ЛБ 52TRU и УОНИ 13/Мороз незначительна.

В табл. 7 приведено сравнение средних значений ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах испытания, полученных различными видами сварки с учетом температуры их выполнения.

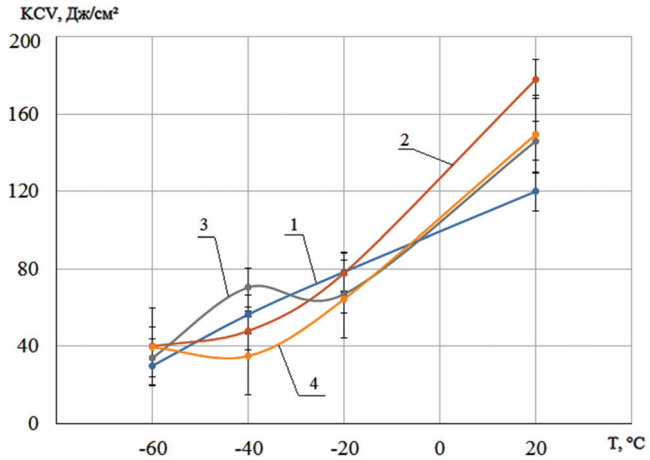


Рис. 2. Зависимость ударной вязкости металла шва, полученной сваркой с применением электродов ЛБ 52TRU от температуры испытаний:

1 – СМТ; *2* – СПТ; *3* – СМТ (–45) °С; *4* – СПТ (–45) °С

Fig. 2. Dependence of the toughness of weld metal obtained by welding using LB 52TRU electrodes on the test temperature:

1 – welding with modulation of current; *2* – direct current welding; *3* – welding with modulation of current at –45 °C; *4* – direct current welding at –45 °C

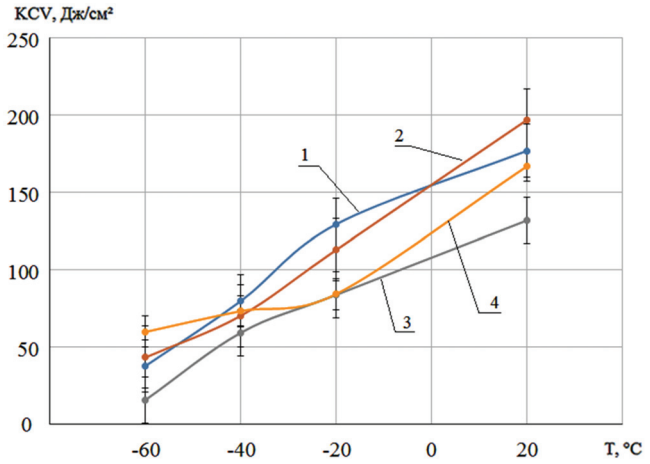


Рис. 3. Зависимость ударной вязкости металла шва, полученной сваркой с применением электрода ХОБЭКС-К-54 от температуры испытаний:

1 – СМТ; *2* – СПТ; *3* – СМТ (–45) °С; *4* – СПТ (–45) °С

Fig. 3. Dependence of the toughness of the weld metal obtained by welding with the use of the HOBEX-K-54 electrode on the test temperature:

1 – welding with modulation of current; *2* – welding with a direct current; *3* – welding with modulation of current at a temperature (–45) °C; *4* – welding with a direct current at a temperature (–45) °C

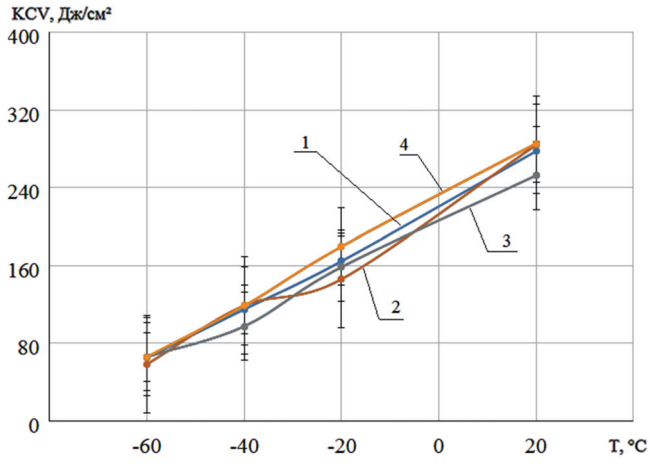


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости металла шва, полученной сваркой с применением электрода УОНИ 13/Мороз от температуры испытаний:

1 – СМТ; *2* – СПТ; *3* – СМТ (–45) °С; *4* – СПТ (–45) °С

Fig. 4. Dependence of the toughness of the weld metal obtained by welding using an electrode УОНИ 13 /Мороз from the test temperature:

1 – welding with modulation of current; *2* – direct current welding; *3* – welding with modulation of current at –45 °C; *4* – direct current welding at –45 °C

Таблица 6

Table 6

Сравнение средних значений ударной вязкости металла шва, полученных при сварке в условиях положительных и отрицательных температур

Comparison of the average values of the toughness of the weld metal, received when welding in the conditions of positive and negative temperatures

Температура сварки $T_{св}$, °С	Средние значения ударной вязкости KCV, Дж/см^2		
	ЛБ 52TRU	ХОБЭКС-К-54	УОНИ 13/Мороз
+20	79	106	154
–45	76	85	153
Разница KCV в %	4	20	<1

Результаты ударных испытаний показали, что при СМТ в условиях положительных (комнатных) температур обнаружено повышение до 9 % ударной вязкости металла швов для всех испытанных марок сварочных электродов по сравнению с образцами, полученными СПТ. Ударная вязкость металла шва образцов, сваренных в условиях отрицательных температур (–45 °С), меняется неоднозначно.

Повышение ударной вязкости на 24 % обнаружено у электродов марки ЛБ-52TRU при переходе от постоянного к импульсному режиму сварки. У остальных марок сварочных электродов ударная вязкость металла швов проб, сваренных в режиме СМТ, меньше, чем полученных СПТ.

Анализ результатов испытаний показал, что значение ударной вязкости существенно зависит от тепловложения при сварке. Известно, что в случае сварки при низких температурах (ниже –40 °С) наблюдаются следующие особенности: изменяются условия горения дуги, увеличивается теплоотдача от изделия в воздух, в десятки раз уменьшается диффузия водорода. В интервале температур 600… 500 °С скорости охлаждения сварных соединений увеличиваются на

Таблица 7
Table 7

Сравнение средних значений ударной вязкости металла шва при отрицательных температурах испытаний, полученных различными видами сварки

Comparison of average values of toughness of weld metal obtained by different types of welding at negative test temperatures

Сварочные электроды	Температура сварки (+20) °С, $T_{св}^{20}$		Температура сварки (–45) °С, $T_{св}^{-45}$		Разница KCV между видами сварки, %	
	Сварка с модуляцией тока	Сварка на постоянном токе	Сварка с модуляцией тока	Сварка на постоянном токе		
	Средние значения ударной вязкости KCV, Дж/см^2				$T_{св}^{+20}$	$T_{св}^{-45}$
ЛБ 52TRU	55	55	57	46	0	24
ХОБЭКС-К-54	83	76	53	73	9	38
УОНИ 13/Мороз	115	108	107	121	6	13

25… 40 %, длительность пребывания металла в интервале температур 300… 100 °С сокращается в несколько раз. Кроме того, вследствие уменьшения диффузии водорода избыточный водород остается в металле шва, что в итоге может привести к снижению значений ударной вязкости при отрицательных температурах испытаний. По-видимому, в условиях сварки при низких температурах окружающего воздуха требуется некоторое увеличение энергетических параметров процесса, что приведет к увеличению тепловложения, интенсивному выделению из расплава водорода и, как следствие, повышению хладостойкости неразъемных соединений [17–18].

Сварку всех образцов в условиях положительных и отрицательных температур производили примерно с одинаковым тепловложением с разницей примерно до 12 %. Такое различие существенно повлияло на значения ударной вязкости. Сравнительно низкие значения ударной вязкости металла шва электродов УОНИ 13/Мороз и ХОБЭКС-К-54, полученных адаптивной импульсно-дуговой сваркой при отрицательной температуре (–45 °С) (табл. 7, рис. 3 и 4), объясняются более низкими (на 7–8 %) по сравнению с СПТ режимами тепловложения, хотя сварку этих проб режимом СМТ при –45 °С производили с повышением тепловложения от 3 до 8 % по сравнению с комнатной температурой. Погонная энергия при СМТ в условиях отрицательных температур электродами марки ЛБ-52TRU была самой наибольшей (до 16 %) по сравнению с режимами импульсно-дуговой сварки других образцов.

Анализ полученных результатов показывает, что при сварке с модуляцией тока в условиях отрицательной температуры (ниже –45 °С) требуется повышение тепловложения по сравнению с режимами сварки, осуществляемыми при положительной температуре, до 20 %. Однако при более существенном повышении тепловложения может наблюдаться значительный перегрев металла шва [18], увеличение размеров ЗТВ и, как следствие, повышение значений растягивающих остаточных сварочных напряжений, отрицательно влияющих на работоспособность сварных соединений [19–24].

Электроды марки УОНИ 13/Мороз показали наиболее высокие значения ударной вязкости по сравнению с другими испытанными марками электродов. Ударная вязкость при температуре испытаний (–60) °С всех сварных проб, выполненных электродами УОНИ 13/Мороз, выше 50 Дж/см^2, в то время как у образцов остальных марок электродов значение KCV^{-60} опускалась ниже 30 Дж/см^2.

Заключение

1. Установлено, что на формирование структуры металла шва значительно влияет температура окружающего воздуха, при которой осуществляется процесс сварки. Значительное различие

в размерах структурных составляющих зоны неразъемного соединения наблюдается в структурах облицовочных слоев металла шва, полученных в условиях отрицательных температур, где имеются крупные участки структурных составляющих в виде белых пятен, по сравнению со сварными соединениями, полученными при положительных температурах окружающегося воздуха, независимо от марки применяемого электрода и режима сварки.

2. Выполненные исследования позволили установить, что при статических испытаниях на растяжение не выявлены различия механических свойств ($\sigma_в$, $\sigma_т$, δ) неразъемных соединений для всех марок электродов в зависимости от температуры выполнения сварки (при –45 °С и +20 °С) и режимов сварки (СМТ, СПТ).

3. Установлено, что ударные испытания с надрезом в металле шва позволяют выявить не только различия составов сварочных материалов, но и чувствительность сваренных образцов к температуре их выполнения и режимам сварки. Для повышения значений ударной вязкости образцов, сваренных в условиях отрицательных температур (–45 °С) методом адаптивной импульсно-дуговой сварки, требуется увеличение тепловложения до 20 % относительно погонной энергии, реализуемой в процессе сварки образцов при положительной температуре.

Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на получение новых классов материалов и изделий из них, предназначенных для работы в условиях Севера и Арктики.

Список литературы

1. Хладостойкость материалов и элементов конструкций: результаты и перспективы / В.П. Ларионов [и др.]; отв. ред. В.В. Филиппов. – Новосибирск: Наука, 2005. – 290 с. – ISBN 5-02-032442-6.

2. Повышение прочности сварных металлоконструкций, горнодобывающей и транспортной техники в условиях Севера / О.И. Слепцов [и др.]; отв. ред. С.П. Яковлева. – Новосибирск: Наука, 2012. – 183 с. – ISBN 978-5-02-019108.

3. *Солнцев Ю.П., Титова Т.И.* Стали для Севера и Сибири. – СПб.: Химиздат, 2002. – 352 с. – ISBN 5-93808-049-5.

4. *Wang J.-M., Wu S.-T.* Implementation of an improved power supply with simple inverters for arc welding machine // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2015. – Vol. 25, iss. 6. – P. 1075–1082. – doi: 10.1002/etep.1890.

5. Investigation of the stability of melting and electrode metal transfer in consumable electrode arc welding using power sources with different dynamic characteristics / Yu.N. Saraev, D.A. Chinakhov, D.I. Ilyashchenko, A.S. Kiselev, A.S. Gordynets // Welding International. – 2017. – Vol. 31, iss. 10. – P. 784–790. – doi: 10.1080/09507116.2017.1343977.

6. Low temperature impact toughness of structural steel welds with different welding processes / H.-S. Shin, K.-T. Park, C.-H. Lee, K.-H. Chang, V.N. Van Do // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2015. – Vol. 19, iss. 5. – P. 1431–1437. – doi: 10.1007/s12205-015-0042-8.

7. Повышение прочности сварных конструкций для Севера / О.И. Слепцов, В.Е. Михайлов, В.Г. Петушков, Г.П. Яковлев, С.П. Яковлева. – Новосибирск: Наука, 1989. – 223 с. – ISBN 5-02-028754-7.

8. In situ strain and temperature measurement and modelling during arc welding / J. Chen, X. Yu, R.G. Miller, Z. Feng // Science and Technology of Welding and Joining. – 2015. – Vol. 20, iss. 3. – P. 181–188. – doi: 10.1179/1362171814Y.0000000270.

9. Influence of Y on microstructures and mechanical properties of high strength steel weld metal / Y.C. Cai, R.P. Liu, Y.H. Wei, Z.G. Cheng // Materials and Design. – 2014. – Vol. 62. – P. 83–90. – doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.057.

10. *Liu C., Bhole S.D.* Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties // Science and Technology of Welding and Joining. – 2013. – Vol. 18, iss. 2. – P. 169–181. – doi: 10.1179/1362171812Y.0000000090.

11. *Sharma S.K., Maheshwari S.* A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – Vol. 38. – P. 203–217. – doi: 10.1016/j.jngse.2016.12.039.

12. *Пояркова Е.В.* Эволюция структурно-механической неоднородности материалов сварных элементов конструкций в рамках концепции иерархического согласования масштабов: дис.... д-ра техн. наук: 05.16.09. – Уфа, 2015. – 392 с.

13. *Остсемин А.А.* Прочность и напряженное состояние несимметричных механически неоднородных сварных соединений с непроваром в центре шва при двухосном нагружении // Проблемы прочности. – 2009. – № 5. – С. 154–168.

14. *Saraev Y.* Adaptive pulse-arc welding methods for construction and repair of the main pipelines // Welding – HIGH-TECH Technology in 21st century: 2nd South-East European IIW International Congress, Sofia, Bulgaria, October 21st–24th 2010: proceedings. – Sofia, 2010. – P. 174–177.

15. *Saraev Y.N., Bezborodov V.P.* Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and

properties of welded joints in low-alloy steels // Welding International. – 2013. – Vol. 27, iss. 9. – P. 678–680. – doi: 10.1080/09507116.2012.753276.

16. Improving the reliability of metallic structures in service in the conditions with low climatic temperatures by efficient application of advanced methods of modification of the zone of the welded joint / Yu.N. Saraev, V.P. Bezborodov, S.V. Gladkovskiy, N.I. Golikov // Welding International. – 2017. – Vol. 31, iss. 8. – P. 631–636. – doi: 10.1080/09507116.2017.1307512.

17. *Ларионов В.П.* Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. – Новосибирск: Наука, 1986. – 256 с.

18. *Аммосов А.П.* Термодеформационные процессы и разрушение сварных соединений. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. – 136 с.

19. Сварка в машиностроении. В 4 т. Т. 3: справочник / под ред. В.А. Винокурова. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.

20. *Леонов В.П., Мизецкий А.В.* Влияние локальных остаточных сварочных напряжений на начальную стадию развития трещин в сварных соединениях // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 4 (56). – С. 54–65.

21. Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads / S. Murugan, S.K. Rai, P.V. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj, M.S.C. Bose // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2001. – Vol. 78, iss. 4. – P. 307–317. – doi: 10.1016/S0308-0161(01)00047-3.

22. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / под ред. В.И. Труфякова. – Киев: Наукова думка, 1990. – 256 с. – ISBN 5-12-009392-2.

23. *Матохин Г.В., Воробьев А.Ю. Игуменов А.А.* Оценка влияния остаточных сварочных напряжений на предел выносливости различных зон сварных соединений феррито-перлитных сталей // Сварка и диагностика. – 2015. – № 1. – С. 32–34.

24. *Terada H.* Stress intensity factor analysis and fatigue behavior of a crack in the residual stress field of welding // Journal of ASTM International. – 2005. – Vol. 2, iss. 5. – P. 1–11. – doi: 10.1520/JAI12558.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2017 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2017 no. 4(77) pp. 30–42
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2017-4-30-42

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Exploratory Research of Reliability Improvement of High-duty Welded Metal Constructions Operated under the Conditions of the North

Yury Sarayev [1, a, *], *Nikolay Golikov* [2,b, *], *Mikhail Sidorov* [2, c], *Ekaterina Maksimova* [2, d], *Sergey Semyonov* [2, e], *Marina Perovskaya* [1, f]

[1] Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation
[2] Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russian Federation

[a] http://orcid.org/0000-0002-9457-4309, litsin@ispms.tsc.ru, [b] http://orcid.org/0000-0001-9209-1592, n.i.golikov@mail.ru,
[c] http://orcid.org/0000-0001-7490-2777, sidorovmm@bk.ru, [d] http://orcid.org/0000-0001-6556-1659, nikiforova_em@mail.ru,
[e] http://orcid.org/0000-0002-6639-9195, s1789@mail.ru, [f] http://orcid.org/0000-0003-2780-6023, mv_perovskaya@inbox.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 19 September 2017
Revised: 16 October 2017
Accepted: 3 November 2017
Available online: 15 December 2017

Keywords:
Welded joints
Weld metal
Pulse-arc welding
Coated electrodes
Low climatic temperatures
Mechanical properties
Structure
Impact strength
Rat of energy input

Funding:
The research is executed with financial support of RSF, the project No. 16-19-10010.

ABSTRACT

Introduction. Welding affect fundamentally on the availability of the constructions operated under the low temperatures due to a decrease in resistance to the nucleation and propagation of cracks in the heat-affected zone and weld metal. Despite the existence of a sufficiently large number of ways to improve the reliability of welded joints, some of them have now completely exhausted its capabilities, while others have not been brought to the stage of wide practical application. Therefore, the development of the necessary special welding technology in low temperature conditions remains an urgent problem. **The purpose of the work:** to find the ways to improve the reliability of high-duty metal constructions welded at low temperatures. The welded joints of 09G2S steel obtained by welding with direct current and pulsed low-frequency current modulation under conditions of positive (+ 20 °C) and negative (–45 °C) ambient air temperatures are investigated using three new types of welding electrodes. **The methods of investigation.** Mechanical tests for static tension and impact bending of welded samples, as well as spectral analysis of the chemical composition and metallurgical studies of weld metal are undertaken. **Results and Discussion**. It is revealed that the metal constructions operational factors depend on the choice of the welding method and welding temperature, as well as the characteristics of the welding material. It is established that to increase the impact strength of samples welded at negative temperatures by the adaptive pulse-arc welding method, an increase in heat input is required, relative to the rat of energy input, realized in the process of welding at positive temperature. The effect of the weld metal structure refinement using adaptive pulse-arc welding with coated electrodes is confirmed, including in conditions of negative ambient air temperature (down to 45 °C below zero). The presented results confirm the prospects of the developed approach aimed at obtaining new classes of materials and products, intended for operation in the conditions of the North and the Arctic.

For citation: Saraev Y.N., Golikov N.I., Sidorov M.M., Maksimova E.M., Semenov S.V., Perovskaya M.V. Exploratory research of reliability improvement of high-duty welded metal constructions operated under the conditions of the North. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 4 (77), pp. 30–42. doi: 10.17212/1994-6309-2017-4-30-42. (In Russian).

*** Corresponding author**
Saraev Yury N., D.Sc. (Engineering), Chief Researcher
Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS
2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation
Tel.: 8-3822-492-942, 8-3822-286-990, **e-mail:** litsin@ispms.tsc.ru

Golikov Nikolay I., Ph.D. (Engineering), Leading researcher
Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS
1 Oktyabrskaya str., Yakutsk, 677891, Russian Federation
Tel.: 8-4112-35-88-69, **e-mail:** n.i.golikov@mail.ru

References

1. Filippov V.V., ed. *Khladostoikost' materialov i elementov konstruktsii: rezul'taty i perspektivy* [Cold resisting property of materials and elements of construction. Results and prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 290 p. ISBN 5-02-032442-6.

2. Yakovleva S.P., ed. *Povyshenie prochnosti svarnykh metallokonstruktsii, gornodobyvayushchei i transportnoi tekhniki v usloviyakh Severa* [Increasing the strength of welded metal construction, mining and transport techniques in the North]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2012. 183 p. ISBN 978-5-02-019108.

3. Solntsev Yu.P., Titova T.I. *Stali dlya Severa i Sibiri* [Steel for the North and Siberia]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2002. 352 p. ISBN 5-93808-049-5.

4. Wang J.-M., Wu S.-T. Implementation of an improved power supply with simple inverters for arc welding machine. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2015, vol. 25, iss. 6, pp. 1075–1082. doi: 10.1002/etep.1890.

5. SaraevYu.N., Chinakhov D.A., IlyashchenkoD.I., KiselevA.S., Gordynets A.S. Investigation of the stability of melting and electrode metal transfer in consumable electrode arc welding using power sources with different dynamic characteristics. *Welding International*, 2017, vol. 31, iss. 10, pp. 784–790. doi: 10.1080/09507116.2017.1343977.

6. Shin H.-S., Park K.-T., Lee C.-H., Chang K.-H., Van Do V.N. Low temperature impact toughness of structural steel welds with different welding processes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2015, vol. 19, iss. 5, pp. 1431–1437. doi: 10.1007/s12205-015-0042-8.

7. Sleptsov O.I., Mikhailov V.E., Petushkov V.G., Yakovlev G.P., Yakovleva S.P. *Povyshenie prochnosti svarnykh konstruktsii dlya Severa* [Increasing the strength of welded constructions for the North]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1989. 223 p. ISBN 5-02-028754-7.

8. Chen J., Yu X., Miller R.G., Feng Z. In situ strain and temperature measurement and modelling during arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, vol. 20, iss. 3, pp. 181–188. doi: 10.1179/1362171814Y.0000000270.

9. Cai Y.C., Liu R.P., Wei Y.H., Cheng Z.G. Influence of Y on microstructures and mechanical properties of high strength steel weld metal. *Materials & Design*, 2014, vol. 62, pp. 83–90. doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.057.

10. Liu C., Bhole S.D. Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, vol. 18, iss. 2, pp. 169–181. doi: 10.1179/1362171812Y.0000000090.

11. Sharma S.K., Maheshwari S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, vol. 38, pp. 203–217. doi: 10.1016/j.jngse.2016.12.039.

12. Poyarkova E.V. *Evolyutsiya strukturno-mekhanicheskoi neodnorodnosti materialov svarnykh elementov konstruktsii v ramkakh kontseptsii ierarkhicheskogo soglasovaniya masshtabov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Evolution of structural and mechanical heterogeneity of welded structural elements in the framework of the concept of hierarchical agreement of scales. Dr. eng. sci. diss.]. Ufa, 2015. 392 p.

13. Ostsemin A.A. Prochnost' i napryazhennoe sostoyanie nesimmetrichnykh mekhanicheski neodnorodnykh svarnykh soedinenii s neprovarom v tsentre shva pri dvukhosnom nagruzhenii [Strength and stressed state of asymmetric mechanically heterogeneous welded joints with faulty fusion in the weld center subjected to biaxial loading]. *Problemy prochnosti = Strength of Materials*, 2009, no. 5, pp. 154–168. (In Russian).

14. Saraev Y. Adaptive pulse-arc welding methods for construction and repair of the main pipelines. *Proceedings of the 2nd South-East European IIW International Congress "Welding – HIGH-TECH Technology in 21st century"*, Sofia, Bulgaria, October 21st–24th 2010, pp. 174–177.

15. Saraev Y.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels. *Welding International*, 2013, vol. 27, iss. 9, pp. 678–680. doi: 10.1080/09507116.2012.753276.

16. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Gladkovskiy S.V., Golikov N.I. Improving the reliability of metallic structures in service in the conditions with low climatic temperatures by efficient application of advanced methods of modification of the zone of the welded joint. *Welding International*, 2017, vol. 31, iss. 8, pp. 631–636. doi: 10.1080/09507116.2017.1307512.

17. Larionov V.P. *Elektrodugovaya svarka konstruktsii v severnom ispolnenii* [Electric arc welding of structures in the northern version]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 256 p.

18. Ammosov A.P. *Termodeformatsionnye protsessy i razrushenie svarnykh soedinenii* [Thermal deformation processes and failure of welded joints]. Yakutsk, SB AS the USSR Publ., 1988. 136 p.

19. Vinokurov V.A., ed. *Svarka v mashinostroenii*. V 4 t. T. 3: spravochnik [Welding in mechanical engineering. In 4 vol. Vol. 3: a handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 567 p.

20. Leonov V.P., Mizetskii A.V. Vliyanie lokal'nykh ostatochnykh svarochnykh napryazhenii na nachal'nuyu stadiyu razvitiya treshchin v svarnykh soedineniyakh [Influence of local residual welding stresses upon initial stage of evolution of cracks in welded joints]. *Voprosy materialovedeniya = Inorganic Materials: Applied Research*, 2008, no. 4 (56), pp. 54–65. (In Russian).

21. Murugan S., Rai S.K., Kumar P.V., Jayakumar T., Raj B., Bose M.S.C. Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2001, vol. 78, iss. 4, pp. 307–317. doi: 10.1016/S0308-0161(01)00047-3.

22. Trufyakov V.I., ed. *Prochnost' svarnykh soedinenii pri peremennykh nagruzkakh* [Strength of welded joints at variable loads]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 256 p. ISBN 5-12-009392-2.

23. Matokhin G.V., Vorob'ev A.Yu. Igumenov A.A. Otsenka vliyaniya ostatochnykh svarochnykh napryazhenii na predel vynoslivosti razlichnykh zon svarnykh soedinenii ferrito-perlitnykh stalei [Estimation of the influence of residual welding stresses on the endurance limit of various zones of welded joints of ferrite-pearlitic steels]. *Svarka i diagnostika = Welding and Diagnostics*, 2015, no. 1, pp. 32–34.

24. Terada H. Stress intensity factor analysis and fatigue behavior of a crack in the residual stress field of welding. *Journal of ASTM International*, 2005, vol. 2, iss. 5, pp. 1–11. doi: 10.1520/JAI12558.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2017 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).