

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.791:539.4.014.13

DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-4-12

Ю.Н. Сараев, Н.И. Голиков, М.М. Сидоров

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ
В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР**

Проведено исследование распределения остаточных напряжений в стыковом сварном соединении пластин из стали Ст3сп, выполненном при комнатных и отрицательных температурах окружающего воздуха. Подобраны и выполнены два режима сварки: импульсно-дуговая сварка на модулированном токе с частотой 1,67 Гц и сварка постоянным током. Остаточные напряжения опре-

делены рентгеновским методом, основанным на измерении микродеформаций кристаллической решетки материала, вызванных их действием.

Ключевые слова: остаточные сварочные напряжения, импульсно-дуговая сварка, сварное соединение, погонная энергия, конструкционная сталь, низкие климатические температуры, рентгеновский метод.

Yu.N. Saraev, N.I. Golikov, M.M. Sidorov

**RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION DURING WELDING UNDER CONDITIONS
OF LOW CLIMATIC TEERATURES**

The investigation of residual welding stresses is extremely essential for the choice of efficient structural forms of designed welded structures and for the correct choice of technological welding methods for manufacturing welded structures. In spite of the substantial data amount obtained as a result of the investigations carried out earlier the distributions of residual stresses and their impact upon working capacity of welded joints carried out during welding under conditions of low climatic temperatures is studied insufficiently. Actually there are no works on experimental investigations of residual stresses of welding under cold climatic conditions.

The purpose of the work consists in the investigation of the character of residual stress distribution in end welded joints of structural steel St3sp after welding under low climatic temperature conditions by power sources with pulse and constant parameter measurements.

To investigate residual stresses there was carried out plate welding at room and negative air temperatures. There were chosen and carried out two welding modes: pulse-arc welding with modulated current with

the frequency of 1.67Hz and direct current welding. The definition of residual stresses was carried out with the use of X-ray method based on the measurement of material lattice micro-deformations caused by their effect.

On the basis of the investigation results it was revealed that a welding temperature affects a value and a character of weld stresses. At air temperature decrease up to -45°C irrespective of the welding mode chosen the increase of a tensile residual welding stress level in welded joints by 40...50% is observed. In comparison with dc welding during welding with modulated current there are formed residual stresses with a lower level of mean values both at room ($+20^{\circ}\text{C}$) temperature, and at negative one (-45°C). The increase of a tensile residual stress level during welding under cold air conditions is connected with the necessity to increase the rate of energy input at welding, and also with the increase of steel strength properties at temperature decrease.

Key words: residual welding stresses, pulse-arc welding, weld joint, energy input, structural steel, low climatic temperatures, X-ray method.

Введение

В результате нелинейной деформации в процессе сварки или фазового превращения при охлаждении расплавленного металла в зоне сварного соединения создаются остаточные сварочные напряжения (ОСН). Они оказывают различное влияние на прочность сварного соединения в зависимости от их величины и характера

распределения. В тех случаях, когда металл сохраняет способность пластически деформироваться при статической нагрузке, остаточные напряжения не оказывают влияния на прочность сварных конструкций. Их влияние на прочность проявляется в условиях, способствующих возникновению хрупкого разрушения сварного со-

единения. Как известно, при отрицательных температурах происходит охрупчивание материала. Неблагоприятное сочетание низких климатических температур, концентрации напряжений и высоких остаточных напряжений приводит к хрупкому разрушению [1].

Существенное значение имеет тип остаточных напряжений, создающих сжатие или растяжение области материала. Наведение сжимающих остаточных напряжений положительно влияет на коррозионную стойкость, повышает циклическую долговечность сварных соединений. Растягивающие напряжения, наоборот, усиливают процессы коррозии и снижают усталостную прочность. Исследования ОСН в настоящее время ведутся как в России, так и за рубежом. Многие работы связаны с изучением формирования ОСН при разных методах сварки и послесварочной обработки, а также их учета при прогнозировании роста усталостной трещины [2-9].

В регионах холодного климата России среднегодовые температуры окружающего воздуха составляют около $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, поэтому значительный объем сварочных работ во время строительства, монтажа и ремонта конструкций производится в условиях отрицательных температур. При сварке в условиях низких климатических температур (ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) изменяются условия горения дуги, увеличивается теплоотдача от свариваемых элементов в воздух, уменьшается диффузия водорода, увеличивается скорость охлаждения расплавленного металла и зоны термического влияния [10]. Данные обстоятельства существенно снижают работоспособность сварных конструкций, эксплуатирующихся в условиях Севера и Арктики, при этом одной из возможных причин разрушения сварных соединений являются ОСН.

В то же время, несмотря на значительный объем данных, накопленных в ре-

зультате ранее выполненных исследований другими авторами, мало изучены распределения остаточных напряжений и их влияние на работоспособность сварных соединений, выполненных при сварке в условиях низких климатических температур. Практически отсутствуют работы по экспериментальным исследованиям ОСН при сварке на холоде.

При производстве и ремонте технических систем ответственного назначения, эксплуатирующихся в условиях холодного климата, в качестве инструмента повышения свойств неразъемных соединений эффективными могут стать импульсные технологические процессы сварки [11; 12]. Преимуществами импульсно-дуговой сварки являются регулируемое тепловложение и управление формированием швов и околошовной зоны за счет периодического изменения сварочного тока. Таким образом, создается быстрый нагрев зоны соединения и такое же быстрое ее охлаждение, что способствуют минимальным структурным изменениям, а следовательно, и минимальным напряжениям и деформациям. Ранее в работах нами показано, что при рациональном выборе режимов импульсно-дуговой сварки обеспечивается формирование благоприятного распределения остаточных сварочных напряжений. При этом в сварных соединениях, полученных сваркой модулированным током, в основном формируются сжимающие напряжения, а уровень растягивающих напряжений ниже, чем при сварке на постоянном токе [13; 14].

Цель данной работы заключается в исследовании характера распределения остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях конструкционной стали СтЗсп после сварки в условиях низких климатических температур источниками питания с импульсным и постоянным изменением параметров.

Материалы и методы исследования

Для исследований были взяты пластины размерами $300 \times 500 \times 6$ мм из конструкционной стали СтЗсп со следующими механическими характеристиками: временное сопротивление ($\sigma_{\text{в}}$) – 425 МПа;

предел текучести (σ_{T}) – 283 МПа; относительное удлинение (δ) – $34,9$ %. На пластины были нанесены фаски с углом скоса кромок $(25 \pm 2)^{\circ}$, притуплением 2 мм и с зазором $1,6$ мм под дуговую сварку стыко-

вого соединения согласно ГОСТ 5264-80. Односторонняя сварка пластин производилась в два слоя (корневой и облицовочный) при комнатных (+20 °С) и отрицательных (-45 °С) температурах с применением электродов ЛБ-52TRU. После сварки корневого слоя выполнялась выдержка 1 ч в естественных условиях воздуха с целью его полного остывания. Затем производилась сварка облицовочного слоя. Таким образом осуществлялась имитация случая, когда при сварочных работах на больших объектах после сварки первого слоя сварка второго выполняется не сразу.

Были подобраны и выполнены два режима сварки:

- импульсно-дуговая сварка модулированным током с частотой 1,67 Гц (СМТ);
- сварка постоянным током (СПТ).

Для проведения сварочных работ использовались сварочные источники:

- ФЕБ-315 «МАГМА» (СМТ);
- NEON ВД-315 (СПТ).

В табл. 1 приведены режимы и условия сварки проб с указанием маркировки пластин.

Таблица 1

Режимы и условия сварки проб

Режим	Порядок сварки	Температура воздуха	
		+20 °С	-45 °С
		Маркировка сварных проб, №	
Сварка модулированным током (СМТ)	Сварка облицовочного слоя после полного остывания корневого	1	3
Сварка постоянным током (СПТ)		2	4

Измерение остаточных напряжений проводилось рентгеновским методом [15]. Остаточные напряжения определяли в поперечном (σ_y) и продольном (σ_x) направлениях относительно оси шва пластины в точках, расположенных на различном рас-

стоянии от центра шва. Схема измерения представлена на рис. 1. Определение остаточных напряжений было выполнено с двух сторон для всех пластин (облицовочный и корневой слой).

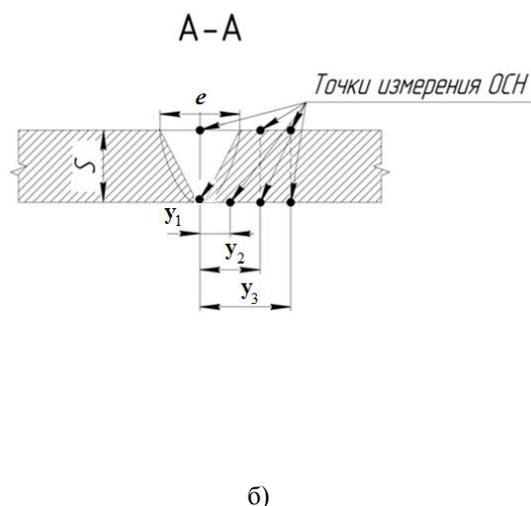
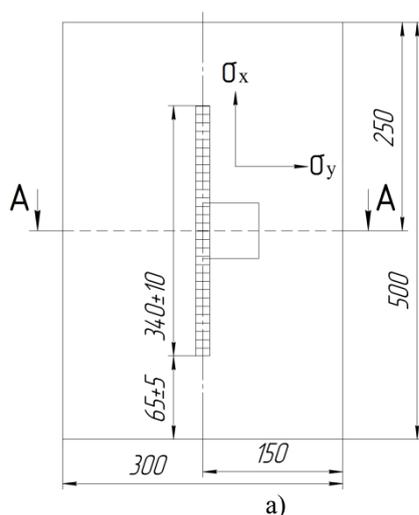


Рис. 1. Стыковое сварное соединение для исследования остаточных напряжений: а – пластина с указанием размеров и расположения шва (вид сверху); б – точки измерения остаточных напряжений

Обсуждение результатов исследования

На рис. 2 приведены распределения остаточных напряжений в сварном соединении после импульсно-дуговой сварки (СМТ) в условиях комнатных температур.

Из рис. 2а видно, что после СМТ со стороны облицовочного слоя в зоне металла шва (МШ) образованы остаточные напряжения сжимающего типа, равные -118 МПа в поперечном направлении и -50

МПа в продольном направлении. На удалении от центра МШ до 17 мм наблюдается распределение остаточных напряжений растягивающего типа. Интервал распределений поперечных ОСН составил 90...120 МПа, продольных – 95...160 МПа.

Со стороны корневого слоя сформированы остаточные напряжения только растягивающего типа. В зоне МШ поперечные ОСН составили 45 МПа, продольные – 80 МПа. На удалении от центра МШ до 17 мм интервал распределений поперечных напряжений составил 195...250 МПа, продольных – 90...200 МПа (рис. 2б).

На рис. 3 приведены распределения остаточных напряжений в сварных соединениях после сварки постоянным током в условиях комнатных температур.

После СПТ с двух сторон пластины наблюдается образование остаточных напряжений только растягивающего типа (рис. 3). Со стороны облицовочного слоя в зоне МШ ОСН равны 225 МПа в поперечном направлении и 190 МПа в продольном направлении. На удалении от шва до 17 мм интервал поперечных напряжений составил 70...165 МПа, продольных – 80...140 МПа (рис. 3а).

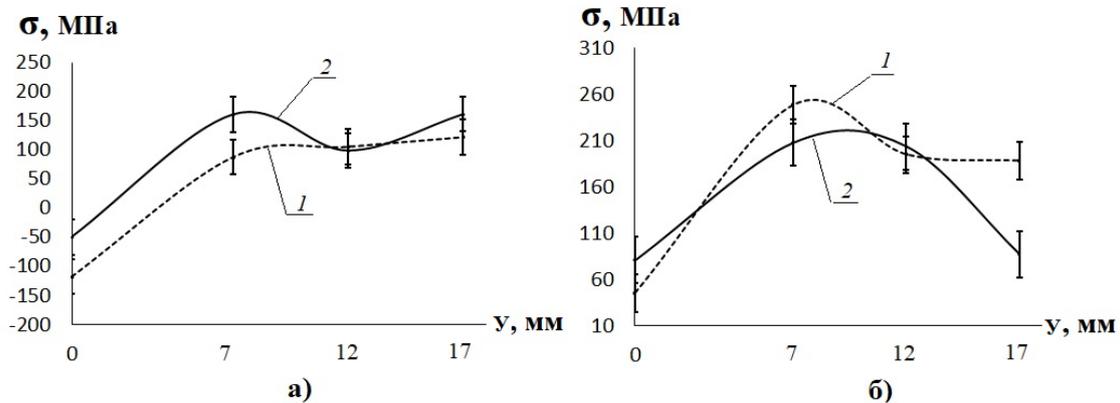


Рис. 2. Распределение поперечных (1) и продольных (2) остаточных напряжений в сварном соединении, выполненном СМТ в условиях комнатных температур: а – облицовочная сторона; б – корневая сторона

Со стороны корневого слоя в зоне МШ поперечные напряжения составили 220 МПа, продольные – 180 МПа. На удалении от центра шва до 17 мм интервал поперечных напряжений составил 70...165 МПа, продольных – 80...140 МПа (рис. 3б).

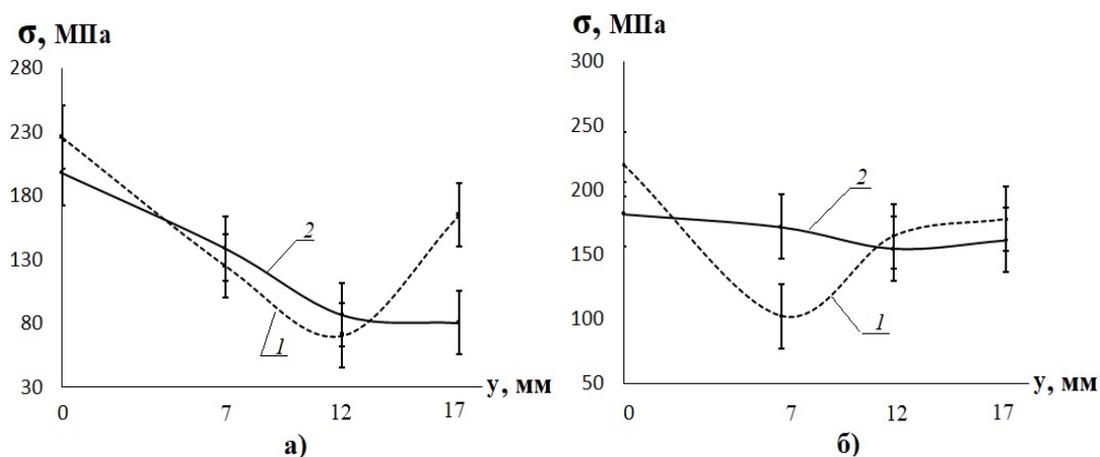


Рис. 3. Распределение поперечных (1) и продольных (2) остаточных напряжений в сварном соединении, выполненном СПТ в условиях комнатных температур: а – облицовочная сторона; б – корневая сторона

Таблица 2

Погонная энергия и уровень ОСН в случае сварки при комнатной температуре (+20 °С)

Режим	№ св. пробы	№ слоя / слой		Погонная энергия, кДж/м	Сред. знач. погонной энергии, кДж/м	Средние значения напряжений, МПа		Макс. значения напряжений, МПа	
						σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
СМТ	1	1	Корневой	707	1091	144	169	200	250
		2	Облицовочный	1475		93	50	160	120
СПТ	2	1	Корневой	719	986	167	166	170	180
		2	Облицовочный	1253		126	147	140	165

На величину и характер сварочных напряжений влияют погонная энергия и режим сварки. В табл. 2 представлены значения погонной энергии сварки при вариации режимов. Среднее значение погонной энергии при СМТ выше на 10 %, чем при СПТ. Уровень средних значений ОСН с облицовочной стороны при СМТ существенно ниже, чем при СПТ. С корневой стороны средний уровень ОСН при обоих режимах примерно одинаков. С облицо-

вочной стороны в зоне металла шва при СМТ наблюдается возникновение сжимающих ОСН. В целом средний уровень растягивающих ОСН на участке измерения составил $0,5...0,6\sigma_T$, а максимальных напряжений - $0,7...0,88\sigma_T$.

На рис. 4 приведены распределения остаточных напряжений в сварном соединении, полученном СМТ в условиях отрицательных температур (-45 °С).

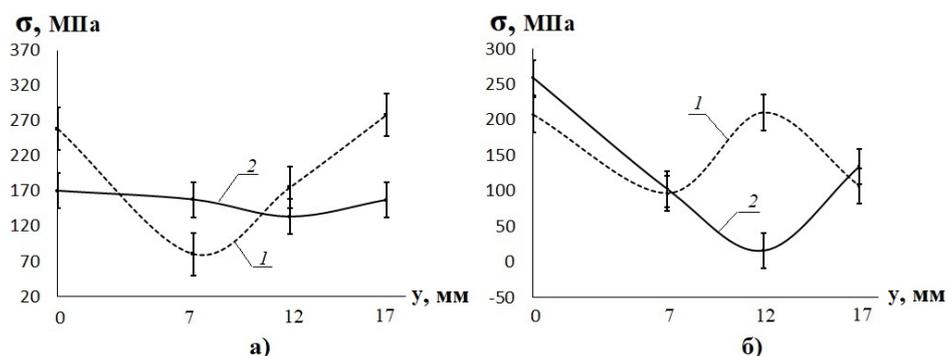


Рис. 4. Распределение поперечных (1) и продольных (2) остаточных напряжений в сварном соединении, выполненном СМТ в условиях отрицательных температур (-45 °С): а – облицовочная сторона; б – корневая сторона

Со стороны облицовочного слоя в зоне МШ значение поперечных ОСН после СМТ равно 258 МПа, а продольных – 170 МПа. На удалении от центра шва до 17 мм интервал распределений поперечных напряжений составил $80...270$ МПа, продольных – $130...160$ МПа (рис. 4а).

Со стороны корневого слоя в зоне МШ поперечные ОСН составили 200 МПа, продольные – 260 МПа. На удалении от центра шва до 17 мм интервал распределе-

ний поперечных напряжений составил $100...210$ МПа, продольных – $20...135$ МПа (рис. 4б).

После СПТ со стороны облицовочного слоя в зоне МШ значение поперечных напряжений равно 235 МПа, а продольных – 250 МПа. На удалении от центра шва до 17 мм интервал распределений поперечных ОСН составил $215...270$ МПа, продольных – $210...290$ МПа (рис. 5а).

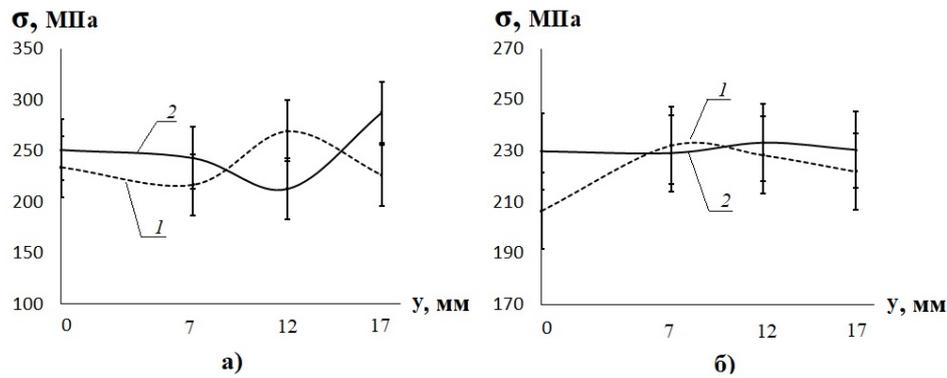


Рис. 5. Распределение поперечных (1) и продольных (2) остаточных напряжений в сварном соединении, выполненном СПТ в условиях отрицательных температур ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$): а – облицовочная сторона; б – корневая сторона

Со стороны корневой зоны в зоне МШ поперечные напряжения составили 210 МПа, продольные – 230 МПа. На удалении от центра шва до 17 мм интервал распределений поперечных напряжений составил 220...230 МПа, продольных – 230...235 МПа (рис. 5б).

В условиях отрицательных температур ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) окружающего воздуха независимо от режимов сварки в сварных соединениях наблюдается образование растягивающих остаточных напряжений. Сравнение распределений остаточных напряжений в сварных соединениях, полученных при разных режимах сварки, показывает, что при СПТ значение остаточных напряжений выше, чем при СМТ (табл. 3).

Как видно из табл. 3, при СПТ средняя погонная энергия на 17 % выше, чем при СМТ. Также погонная энергия значительно выше при СПТ корневой зоны. Данное обстоятельство повлияло на образование более высоких средних и максимальных растягивающих остаточных напряжений при СПТ, чем при СМТ. Средний уровень растягивающих ОСН после СМТ на участке измерения составил $0,54...0,7\sigma_{\text{T}}$, а максимальных напряжений -

$0,91...0,98\sigma_{\text{T}}$. После СПТ средний уровень растягивающих ОСН на участке измерения составил $0,78...0,88\sigma_{\text{T}}$, а максимальных напряжений - $0,95...1,0\sigma_{\text{T}}$. Известно, что уровень растягивающих ОСН достигает предела текучести основного металла, а при понижении температуры окружающего воздуха увеличиваются прочностные характеристики сталей. Таким образом, увеличение уровня растягивающих ОСН при сварке на холоде может быть связано с повышением прочностных характеристик стали при понижении температуры.

Формирование высоких растягивающих остаточных сварочных напряжений при сварке в условиях низких климатических температур может существенно влиять на работоспособность сварных соединений металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Севера и Арктики. В связи с этим необходимы способы сварки в условиях низких климатических температур окружающего воздуха, обеспечивающие формирование в сварных соединениях низкого уровня растягивающих остаточных напряжений. К таким способам можно отнести методы импульсно-дуговой сварки.

Таблица 3

Погонная энергия и уровень ОСН при сварке на холоде ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Режим	№ св. пробы	№ слоя / слой		Погонная энергия, кДж/м	Средние значения погонной энергии, кДж/м	Средние значения напряжений, МПа		Макс. значения напряжений, МПа	
						σ_x	σ_y	σ_x	σ_y
СМТ-1,67	3	1	Корневой	743	1074	128	155	259	210
		2	Облицовочный	1404		155	198	170	278
СПТ	4	1	Корневой	1083	1303	230	222	230	232
		2	Облицовочный	1522		249	237	288	269

Выводы

1. На величину и характер сварочных напряжений влияют погонная энергия и режим сварки. По сравнению со сваркой на постоянном токе при импульсно-дуговой сварке формируются растягивающие остаточные напряжения с более низким уровнем средних значений как при комнатной (+20 °С), так и при отрицательной (-45 °С) температуре.

2. При снижении температуры окружающего воздуха до -45 °С независимо применяемого способа и выбранного режима сварки в сварных соединениях наблюдается повышение уровня растягивающих остаточных сварочных напряжений на 40...50 % (относительно комнатной). Повышение уровня растягивающих напряжений связано с необходимостью увеличения погонной энергии сварки, а

также с повышением прочностных характеристик стали при снижении температуры.

3. Полученные результаты позволяют обосновать необходимость разработки технологий, направленных на снижение влияния остаточных напряжений сварных соединений, выполненных в условиях низких климатических температур окружающего воздуха, с целью повышения их надежности. Одним из способов снижения уровня растягивающих остаточных сварочных напряжений являются методы импульсно-дуговой сварки. В целом проводимые исследования являются важным этапом работ, направленных на повышение работоспособности сварных металлоконструкций, эксплуатирующихся в условиях Севера и Арктики.

Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РНФ по проекту № 16-19-10010П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаев, А.В. Сопротивление усталости стыковых соединений с подрезами и остаточными напряжениями / А.В. Бабаев // Автоматическая сварка. - 1979. - № 8. - С. 9-11.
2. Golikov, N.I. Investigation of the redistribution of residual stresses in cyclic loading of welded joints / N.I. Golikov, M.M. Sidorov // Welding International. - 2014. - Т. 28. - № 12. - С. 970-972.
3. Leggatt, R.H. Residual stresses in welded structures / R.H. Leggatt // International Journal of Pressure Vessels and Piping. - 2018. - Vol. 85. - Is. 3. - P. 144-151.
4. Withers, P.J. Recent advances in residual stress measurement / P.J. Withers, M. Turskia, L. Edwards, P.J. Bouchard, D.J. Buttle // International Journal of Pressure Vessels and Piping. - 2008. - Vol. 85. - Is. 3. - P. 118-127.
5. Xu, Y. Residual stress evaluation in welded large thin-walled structures based on eigenstrain analysis and small sample residual stress measurement / Y. Xu, H. Liu, R. Bao, X. Zhang // Thin-Walled Structures. - 2018. - Vol. 131. - P. 782-791.
6. Hensel, J. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength / J. Hensel, T. Nitschke-Pagela, D. Tchhoffo Ngoula, H-Th Beier, D. Tchuindjang, U. Zerbstd // Engineering Fracture Mechanics. - 2008. - Vol. 198. - P. 123-141.
7. Shen, F. Fatigue damage evolution and lifetime prediction of welded joints with the consideration of residual stresses and porosity / F. Shen, B. Zhao, L. Lin, Ch.K. Chua, K. Zhou // International Journal of Fatigue. - 2017. - Vol. 103. - P. 272-279.
8. Wu, Ch. Analysis of welding residual stress formation behavior during circumferential TIG welding of a pipe / Ch. Wu, J.-W. Kim // Thin-Walled Structures. - 2018. - Vol. 132. - P. 421-430.
9. Pereira de Moraes, C.A. Residual stress evaluation in API 5L X65 girth welded pipes joined by friction welding and gas tungsten arc welding / C.A. Pereira de Moraes, M. Chludzinski, R.M. Nunes, G.V.B. Lemos, A. Reguly // Journal of Materials Research and Technology. - 2019. - Vol. 8. - Is. 1. - P. 988-995.
10. Ларионов, В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении / В.П. Ларионов. - Новосибирск: Наука, 1986. - 256 с.
11. Saraev, Y. Adaptive pulse-arc welding methods for construction and repair of the main pipelines / Y. Saraev // Proceedings of the 2nd South-East European IAW International Congress «Welding – HIGH-TECH Technology in 21st century». - Sofia, Bulgaria, 2010. - P. 174-177.
12. Saraev, Y.N. Properties of the welded joints of manganese steel made by low-frequency pulsed arc welding / Y.N. Saraev, V.P. Bezborodov, S.V. Gladkovskiy, N.I. Golikov // Russian Metallurgy (Metally). - 2017. - V. 2017. - № 4. - P. 287-292.
13. Saraev, Y.N. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding / Y.N. Saraev, V.P. Bezborodov, A.A. Grigoryeva, N.I. Golikov, V.V. Dmitriev, I.I. Sannikov // Welding International. - 2015. - V. 29. - № 2. - P. 131-134.
14. Сараев, Ю.Н. Влияние энергетических параметров режимов сварки на распределение остаточ-

ных напряжений в зоне неразъемного соединения / Ю.Н. Сараев, Н.И. Голиков, М.М. Сидоров, А.Г. Лунев, М.В. Перовская // Актуальные проблемы в машиностроении. - 2018. - Т. 5. - № 3-4. - С. 30-35.

1. Babaev, A.V. Resistance to fatigue of end joints with cuts and residual stresses / A.V. Babaev // *Automatic Welding*. – 1979. – No.8. – pp. 9-11.
2. Golikov, N.I. Investigation of the redistribution of residual stresses in cyclic loading of welded joints / N.I. Golikov, M.M. Sidorov // *Welding International*. - 2014. - Т. 28. - № 12. - С. 970-972.
3. Leggatt, R.H. Residual stresses in welded structures / R.H. Leggatt // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. - 2018. - Vol. 85. - Is. 3. - P. 144-151.
4. Withers, P.J. Recent advances in residual stress measurement / P.J. Withers, M. Turskia, L. Edwards, P.J. Bouchard, D.J. Buttle // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. - 2008. - Vol. 85. - Is. 3. - P. 118-127.
5. Xu, Y. Residual stress evaluation in welded large thin-walled structures based on eigenstrain analysis and small sample residual stress measurement / Y. Xu, H. Liu, R. Bao, X. Zhang // *Thin-Walled Structures*. - 2018. - Vol. 131. - P. 782-791.
6. Hensel, J. Welding residual stresses as needed for the prediction of fatigue crack propagation and fatigue strength / J. Hensel, T. Nitschke-Pagela, D. Tchoffo Ngoula, H-Th Beier, D. Tchuindjang, U. Zerbstd // *Engineering Fracture Mechanics*. - 2008. - Vol. 198. - P. 123-141.
7. Shen, F. Fatigue damage evolution and lifetime prediction of welded joints with the consideration of residual stresses and porosity / F. Shen, B. Zhao, L. Lin, Ch.K. Chua, K. Zhou // *International Journal of Fatigue*. - 2017. - Vol. 103. - P. 272-279.
8. Wu, Ch. Analysis of welding residual stress formation behavior during circumferential TIG welding of a pipe / Ch. Wu, J.-W. Kim // *Thin-Walled Structures*. - 2018. - Vol. 132. - P. 421-430.
9. Pereira de Moraes, C.A. Residual stress evaluation in API 5L X65 girth welded pipes joined by friction welding and gas tungsten arc welding / C.A. Pereira de Moraes, M. Chludzinski, R.M. Nunes, G.V.B. Lemos, A. Reguly // *Journal of Materials Research and Technology*. - 2019. - Vol. 8. - Is. 1. - P. 988-995.
10. Larionov, V.P. *Electric-arc Welding of Structures for Northern Use* / V.P. Larionov. – Novosibirsk: Science, 1986. – pp. 256.
11. Saraev, Y. Adaptive pulse-arc welding methods for construction and repair of the main pipelines / Y. Saraev // *Proceedings of the 2nd South-East European IIW International Congress «Welding – HIGH-TECH Technology in 21st century»*. - Sofia, Bulgaria, 2010. - P. 174-177.
12. Saraev, Y.N. Properties of the welded joints of manganese steel made by low-frequency pulsed arc welding / Y.N. Saraev, V.P. Bezborodov, S.V. Gladkovskiy, N.I. Golikov // *Russian Metallurgy (Metally)*. - 2017. - V. 2017. - № 4. - P. 287-292.
13. Saraev, Y.N. Distribution of residual stresses in welded joints in 09G2S steel produced by adaptive pulsed-arc welding / Y.N. Saraev, V.P. Bezborodov, A.A. Grigoryeva, N.I. Golikov, V.V. Dmitriev, I.I. Sannikov // *Welding International*. - 2015. - V. 29. - № 2. - P. 131-134.
14. Saraev, Yu.N. Impact of welding mode energy parameters upon residual stress distribution in area of permanent connection / Yu.N. Saraev, N.I. Golikov, M.M. Sidorov, A.G. Lunev, M.V. Perovskaya // *Urgent Problems in Mechanical Engineering*. – 2018. –Vol.5. – No.3-4. – pp. 30-35.
15. Withers, P.J. Residual Stress: Measurement by Diffraction / P.J. Withers // *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. - 2001. - P. 8158-8169.

Ссылка для цитирования:

Сараев, Ю.Н. Распределение остаточных напряжений при сварке в условиях низких климатических температур / Ю.Н. Сараев, Н.И. Голиков, М.М. Сидоров // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 11. – С. 4–12. – DOI: 10.30987/1999-8775-2019-2019-11-4-12.

Статья поступила в редакцию 01.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премий Президента и Правительства РФ, член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Степанов Ю.С.

Статья принята к публикации 06.11.19.

Сведения об авторах:

Сараев Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, гл. науч. сотрудник Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, e-mail: litsin@ispms.tsc.ru.

Голиков Николай Иннокентьевич, к.т.н., вед. науч. сотрудник Института физико-технических

Saraev Yury Nikolaevich, Dr. Sc. Tech., Prof., Chief scientific worker, Institute of Strength Physics and Material Science NB RAS, e-mail: litsin@ispms.tsc.ru.

Golikov Nikolay Innokentievich, Can. Sc. Tech., Leading scientific worker, Larionov Institute of Physi-

ческих проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, e-mail: n.i.golikov@mail.ru.

Сидоров Михаил Михайлович, к.т.н., ст. науч. сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, e-mail: sidorovmm@bk.ru.

Sidorov Mikhail Mikhailovich, Can. Sc. Tech., Senior scientific worker, Larionov Institute of Physical-Engineering Problems of North NB RAS, e-mail: n.i.golikov@mail.ru.

Sidorov Mikhail Mikhailovich, Can. Sc. Tech., Senior scientific worker, Larionov Institute of Physical-Engineering Problems of North NB RAS, e-mail: sidorovmm@bk.ru.