

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АДАПТИВНОЙ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ МАРКИ 09Г2С*

*Ю.Н. САРАЕВ¹, доктор техн. наук
Н.И. ГОЛИКОВ², канд. техн. наук
В.В. ДМИТРИЕВ², инженер
И.И. САННИКОВ², аспирант
В.П. БЕЗБОРОДОВ¹, канд. техн. наук
А.А. ГРИГОРЬЕВА¹, инженер
¹(ИФПМ СО РАН, г. Томск)
²(ИФТПС СО РАН, г. Якутск)*

Поступила 10 августа 2013 года
Рецензирование 26 августа 2013 года
Принята к печати 5 сентября 2013 года

Сараев Ю.Н. – 634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4,
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
e-mail: litsin@ispms.tsc.ru

Голиков Н. И. – 677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1,
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
e-mail: n.i.golikov@mail.ru

Исследуется влияние режимов адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и распределение остаточных напряжений сварных соединений пластин низколегированной стали 09Г2С. Определены оптимальные режимы сварки указанной стали. Рентгеновским методом установлено, что при адаптивном импульсно-дуговом режиме сварки формируется более благоприятное распределение остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях. Уровень растягивающих напряжений в таких сварных соединениях не превышает 50 МПа. После импульсного режима сварки установлено повышение в 1,85 раза ударной вязкости металла шва при снижении температуры испытаний образцов до – 60 °С по сравнению со швом, полученным на стационарном режиме.

Ключевые слова: сварка, импульсный, низколегированная сталь, механические свойства, ударная вязкость, остаточные сварочные напряжения.

Введение

Проблема повышения прочности и эксплуатационной надежности сварных соединений из низколегированных сталей связана с необходимостью обеспечения комплекса физико-механических свойств и равнопрочности зон соединения, предотвращения образования холодных трещин, а также структур, снижающих сопротивляемость соединений замед-

ленному и хрупкому разрушению, определяемой характером микрометаллургических процессов на этапе их формирования.

Одним из наиболее эффективных направлений управления характером протекания микрометаллургических процессов является применение адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки. Эти технологии через программируемый ввод тепла в

* Работа выполнена в соответствии с заданиями и частичном финансировании работы за счет средств проекта СО РАН № 27, 2012 – 2014 гг. «Разработка научных основ повышения конструкционной прочности сварных металлоконструкций, эксплуатирующихся при низких климатических температурах» и проекта РФФИ № 13-08-90406 Укр_ф_а «Управление микрометаллургическими процессами на этапах плавления, переноса и кристаллизации металла при формировании сварных соединений в условиях импульсных изменений энергетических параметров и регулируемого тепло-массопереноса».

зону сварного соединения, управление процессами плавления и переноса каждой капли электродного металла, создание в зонах сварных соединений технических систем мелкодисперсной структуры в металле шва и зоне термического влияния позволяют существенно уменьшить степень остаточных деформаций сварных соединений, изготавливаемых из различных марок сталей, а также повысить их эксплуатационную надежность [1, 2].

В ранее проведенных работах исследовались механические свойства сварных соединений труб, где были получены следующие результаты:

- при переходе от стационарного режима к импульсному происходит возрастание относительного удлинения образцов в среднем на 20 % для стали марки Х67 производства ФРГ [3, 4];
- установлено повышение усталостной прочности сварных соединений образцов из стали 17Г1СУ после импульсно-дуговой сварки [3, 4], а также увеличение их ударной вязкости по сравнению со стационарным методом на 8...27 % при испытаниях при температуре +20 °С и на 15...24 % при –60 °С [5];
- установлено уменьшение разброса в значениях микротвердости для теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ [6].

Во всех рассмотренных работах обнаружено, что при использовании импульсной технологии сварки происходит уменьшение размеров зерен в зоне сварного соединения по сравнению со стационарным режимом. Размер зерен в металле шва и зоне термического влияния зависит от энергетических режимов сварки, которыми можно управлять, подбирая частотные диапазоны импульсов тока и паузы [7–10].

Цель работы: исследовать качественное влияние технологии адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства и распределение остаточных напряжений сварных соединений пластин из конструкционной стали марки 09Г2С.

1. Методика исследований и результаты испытаний

Для приготовления образцов сварных соединений производилась сварка встык пластин в стационарном и импульсном режимах, с помощью созданного экс-

периментального исследовательского комплекса в составе: инверторного источника питания импульсно-дуговой сварки ФЕБ-315 «МАГМА», в котором был реализован способ адаптивной импульсно-дуговой сварки; регистратора параметров сварки AWR-224 МД; персонального ЭВМ и сварочного кондуктора. Использовались пластины размерами 100×200×6 мм. Односторонняя сварка листовых проб производилась в два слоя – корневой и облицовочный – электродами марки LB-52U. При сварке корневого шва использовался электрод диаметром 3,2 мм и для облицовочного – диаметром 4 мм. Параметры режима сварки при стационарном и импульсном режиме приведены в табл. 1 и 2. На рис. 1 и 2 показаны осциллограммы стационарного и импульсного режимов сварки.

Для определения пределов прочности, текучести и относительного удлинения при нагружении растяжением по ГОСТ 6996–66 из сварных соединений после каждого режима сварки были изготовлены по три плоских стандартных образца. Механические испытания образцов проводили при температуре 20 °С в соответствии с ГОСТ на машине «ZWICK/ROELL Z600».

Для определения ударной вязкости сварных соединений были изготовлены образцы с V-образными надрезами в областях металла шва (МШ), зоны термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ). Испытания проводили при температурах +20 °С, –20 °С, –40 °С, –60 °С, на инструментированном маятниковом копре «Amsler RKP450». Образцы на ударный изгиб изготовили поперек шва, а надрезы наносили в соответствии с ГОСТ 6996–66 по центру шва для МШ и по зоне сплавления для ЗТВ (рис. 3).

Исследование остаточных сварочных напряжений (ОСН) проводилось рентгеновским методом, который позволяет определить ОСН с тонкого приповерхностного слоя. Измерение остаточных напряжений проводилось с облицовочной и корневой стороны пластины в продольном и поперечном направлении на различном удалении от центра шва. Перед измерением ОСН производится подготовка поверхности образца, которая состоит из следующих этапов:

- снятие усиления шва механическим способом;

Таблица 2

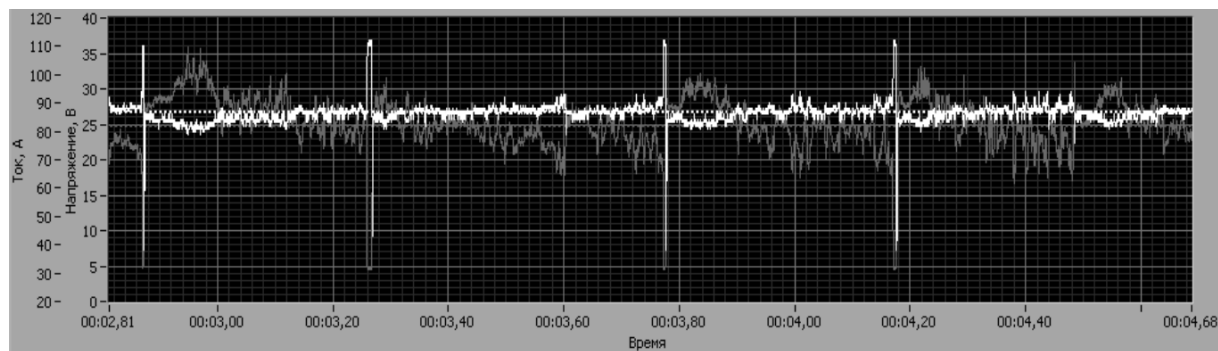
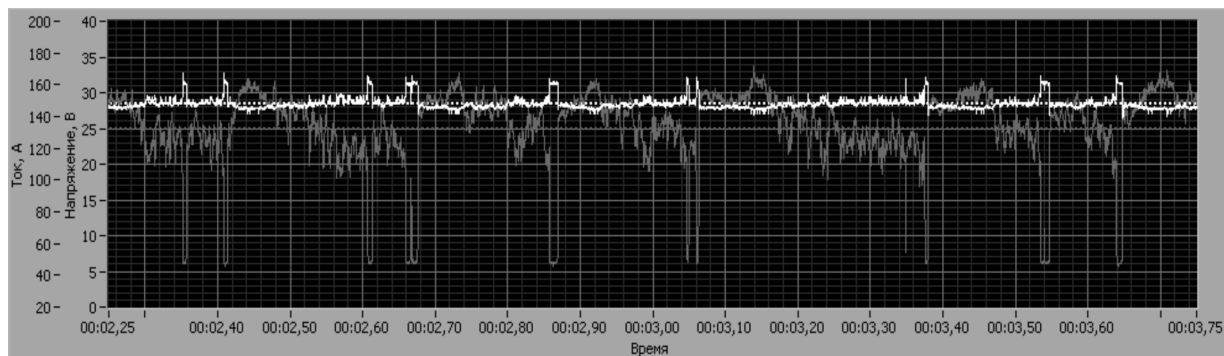
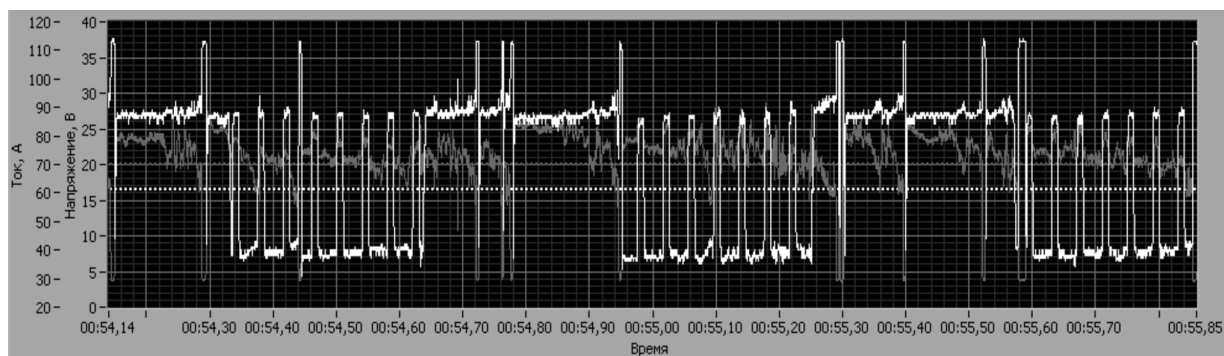
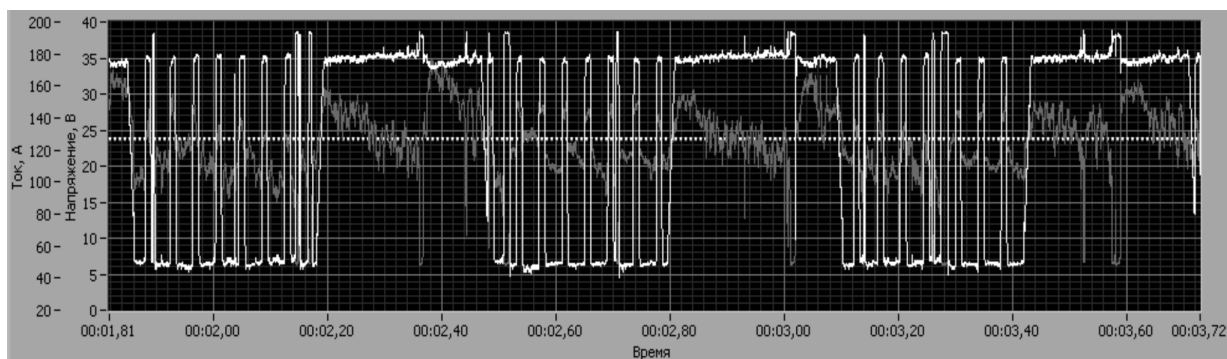
Параметры импульсного режима сварки

Слой	I_n , А	I_p , А	t_n , с	t_p , с	U , В	$V_{св}$, м/ч	Уровень погонной энергии, кДж/м
Корневой	90	40	0,3	0,3	20	4,29	1017
Облицовочный	180	50	0,3	0,3	24	6	1606

Таблица 1

Параметры стационарного режима сварки

Слой	I , А	U , В	$V_{св}$, м/ч	Уровень погонной энергии, кДж/м
Корневой	90	25	4,9	1405
Облицовочный	150	25	6,99	1642

*a**б**Рис. 1.* Осциллограммы стационарного режима сварки:*a* – корневого слоя; *б* – облицовочный слой*a**б**Рис. 2.* Осциллограммы импульсного режима сварки:*a* – корневого слоя; *б* – облицовочный слой

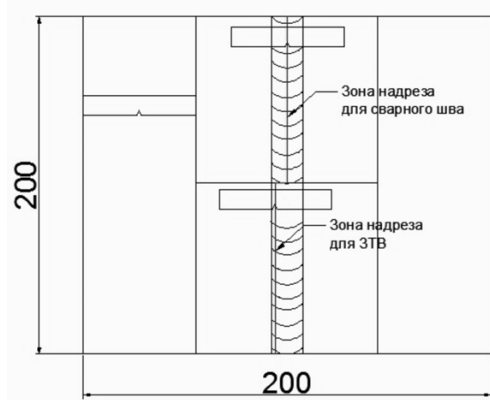


Рис. 3. Схема вырезки образцов на ударный изгиб основного металла, МШ и ЗТВ

– шлифовка мелкой наждачной бумагой участка вокруг выбранной точки рентгеносъемки от краски и окалины;

– химическое травление поверхности выбранного участка смесью азотной и соляной кислот на глубину в пределах около 100 мкм для удаления нанесенного пластически деформированного слоя в объекте съемки. Затем травленный участок обильно промывается водой и обрабатывается спиртом.

2. Результаты исследований и их обсуждение

Испытания образцов при статическом нагружении растяжением показали высокую прочность сварных швов, сформированных по обоим технологиям. Образование шейки и разрушение образцов происходило во всех случаях по основному металлу. Средние значения предела прочности (σ_B), предела текучести (σ_T) и относительного удлинения (δ) сварных соединений представлены в табл. 3. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при переходе от стационарного режима сварки к импульсному механические свойства практически не изменились при выбранном режиме сварки. Возможно, что для количественной оценки влияния процесса адаптивной импульсно-дуговой сварки на основные физико-механические и специальные свойства сварных соединений потребуются дополнительные исследования, которые позволят более точно обозначить границы оптимальных режимов адаптивной импульсно-дуговой сварки.

Ударная вязкость МШ сварных соединений при отрицательных температурах после стационарного и импульсного режимов сварки снижается по сравнению с основным металлом в среднем на 38 %, а ЗТВ – на 77 % (рис. 4). После импульсного режима сварки ударная вязкость МШ сварного соединения при температуре – 60 °С в 1,85 раза выше, чем после стационарного. Возможно, это повышение обе-

Таблица 3
Механические свойства стали марки 09Г2С после стационарного и импульсного режимов сварки

Режимы	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %
Импульсный	529	414	23,2
Стационарный	523	421	23,0

спечивается за счет получения дисперсных структур [1] в зонах сварных соединений при импульсном режиме сварки.

В сварном шве в продольном и поперечном направлениях действуют сжимающие напряжения после обоих режимов сварки. Максимальные значения сжимающих напряжений (продольные)

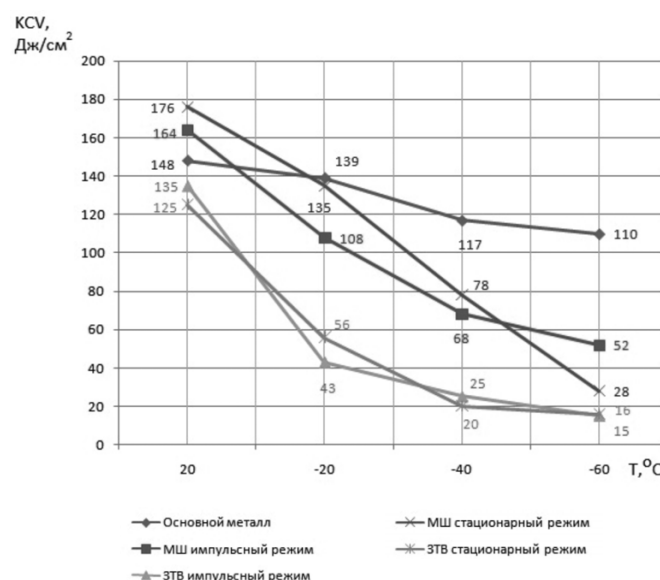


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости зон сварных соединений стали 09Г2С от температуры испытаний

приходятся на середину металла шва и составляют более 200 МПа (рис. 5). Максимальное значение растягивающих напряжений – в зоне термического влияния, и достигают они 100 МПа после стационарного режима сварки. При сварке на стационарном режиме наблюдается более высокий уровень растягивающих остаточных напряжений, чем после импульсного режима. Высокие растягивающие напряжения после стационарного режима, вероятно, объясняются тем, что уровень погонной энергии при сварке корневого слоя в импульсном режиме меньше примерно на 10 %. Это позволяет снизить уровень структурной неоднородности в металле шва и зоне термического влияния и, как следствие, обеспечить снижение уровня остаточных напряжений.

Список литературы

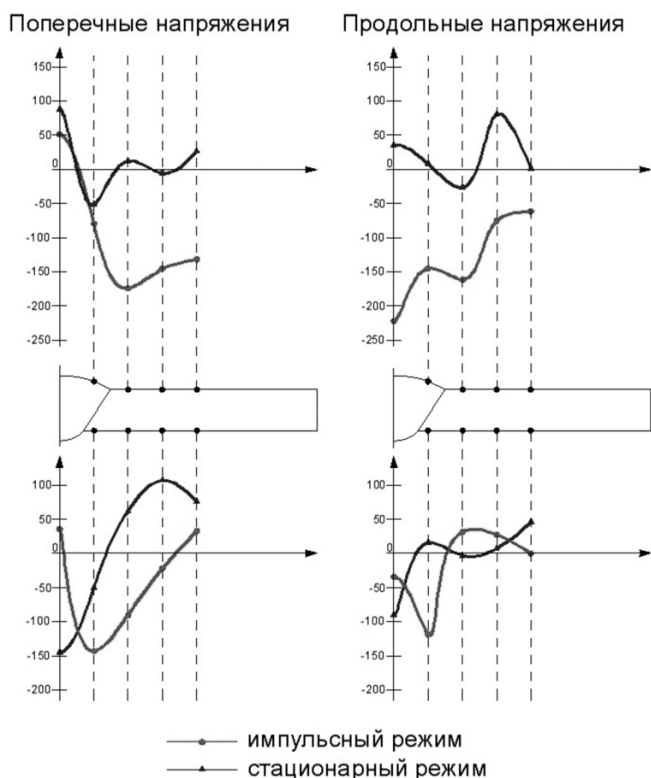


Рис. 5. Распределение продольных и поперечных остаточных сварочных напряжений с облицовочной и корневой стороны пластины

Выводы

1. Проведенные исследования позволили определить качественное влияние процесса адаптивной импульсно-дуговой сварки на механические свойства сварных соединений из стали 09Г2С, которые во всем исследуемом диапазоне остаются практически одинаковыми.

2. Установлено, что режим адаптивной импульсно-дуговой сварки по сравнению со стационарным режимом обеспечивает повышение в 1,85 раза ударной вязкости металла шва при снижении температуры испытаний образцов до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3. Выявлено, что при переходе от стационарного режима сварки к адаптивному импульсно-дуговому формируется более благоприятное распределение ОСН в сварном соединении стали 09Г2С.

1. Сараев Ю.Н. Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера. На основе применения адаптивных импульсных технологий сварки // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 8. – С. 14–19.

2. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Повышение безопасности конструкций улучшением механических и эксплуатационных свойств сварных соединений // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 11. – С. 30–32.

3. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Полетика И.М. и др. Улучшение структуры и свойств сварных соединений труб большого диаметра из низколегированной стали при импульсно-дуговой сварке // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 34–38.

4. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П., Тютев А.В., Никонова И.В. Влияние режима сварки на формирование структуры и свойства сварных соединений // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 1. – С. 25–26.

5. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Sleptsov O.I., Borisova M.Z. Physical and mechanical properties of low-alloyed steel with nanosized structure elements // Rare Metals. 2009. V.28, Spec. Issue. October, p. 906 – 908.

6. Сараев Ю.Н., Макарова Л.И., Кирилова Н.В., Николаев А.С., Козлов А.В., Хомченко Е.Г. Влияние локализации пластической деформации на кинетику разрушения образцов сварных соединений // Сварочное производство. – 2000. – № 6. – С. 20–24.

7. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Хомченко Е.Г. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – С. 137–140.

8. Dmitriev A.I., Psakhie S.G. Multi-scale study of low-density layer formation and lifting force effects under contact impact // Frontiers of Eng. Mech. Res. // 2012, Vol.1, Iss.1, Pp. 17–22.

9. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Кирилова Н.В., Никонова И.В., Перовская М.В., Екимов В.С., Салько А.Е. Формирование структуры и свойств сварных соединений при адаптивной импульсно-дуговой сварке покрытыми электродами ответственных конструкций, работающих в условиях низкочастотного термоциклирования // Сварочное производство. – 2004. – № 1. – С. 22–27.

10. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Влияние энергетических параметров процессов сварки на структуру и свойства зон сварных соединений низколегированных сталей // Сварочное производство. – 2012. – № 8. – С. 3–5.

Obработка metallo

N 3 (60), July–September 2013, Pages 19-24

Investigation of adaptive pulse-arc welding influence on mechanical properties and residual stresses of welded joints in steel grade 09Г2С

¹Yu.N. Saraev, ²N.I. Golikov, ²V.V. Dmitriev, ²I.I. Sannikov, ¹V.P. Bezborodov, ¹A.A. Grigorieva

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk, 634021, Russia

²Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, Oktyabrskaya st., 1, Yakutsk, 677891, Russia

E-mail: litsin@ispms.tsc.ru, n.i.golikov@mail.ru

Abstract

The influence of modes of adaptive pulse-arc welding on mechanical properties and distribution of residual stress of welded connections of plates from the low-alloyed steel grade 09Г2С is investigated in this paper. The optimum modes of welding for this steel are defined. By X-ray method it is established that at the adaptive pulse-arc mode of welding more favorable distribution of residual welding tension in welded connections is formed. The level of the stretching tension in such welded connections doesn't exceed 50 MPa. After the pulse mode of welding the impact strength of seam metal is increased by 1.85 times during descent of the samples' tests temperature to – 60 °C in comparison with a seam received on a stationary mode.

Keywords: welding, pulsed, low-alloy steel, mechanical properties, impact strength, residual welding stresses

References

1. Saraev Yu.H. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 8, pp. 14-19.
2. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2010, no. 11, pp. 30-32.
3. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Poletika I. M., Tjutev A. V., Nikonova I. V., Kirilova N. V. and Sevast'janov S. P. *Uluchshenie struktury i svoystv svarnyh soedinenij nefte-, gazoprovodnyh trub bol'shogo dimetra* [Improvement of the structure and properties of welded joints in large-diameter oil and gas pipes]. *Avtomaticeskaja svarka - Paton Welding Journal*, 2004, no.12, pp. 34-38.
4. Saraev Yu.N., Bezborodov V.P., Tjutev A.V., Nikonova I.V. *Obrabotka metallov (tehnologija, oborudovanie, instrumenty)*, 2005, no. 1, pp. 25-26.
5. Yakovleva S.P., Makharova S.N., Sleptsov O.I., Borisova M.Z. Physical and mechanical properties of low-alloyed steel with nanosized structure elements. *Rare Metals*, 2009, Vol. 28, Spec. Issue, pp. 906 – 908.
6. Saraev Yu.N., Makarova L.I., Kirilova N.V., Nikolaev A.S., Kozlov A.V., Khomchenko E.G. *Vlijanie lokalizacii plasticheskoj deformacii na kinetiku razrushenija obrazcov svarnyh soedinenij* [Effect of localisation of plastic deformation on the kinetics of failure of specimens of welded joints]. *Svarochnoe proizvodstvo - Welding International*, 2000, no. 6, pp. 20-24.
7. Saraev Yu.N., Poletika I.M. Kozlov A.V., Homchenko E.G. *Formirovanie struktury i svoystv svarnyh soedinenij v uslovijah reguliruемого teplovlozhenija pri impul'sno-dugovoj svarke* [Formation of structure and properties of welds in the conditions of heat input during pulse welding]. *Fizicheskaja mezomehanika - Physical Mesomechanics*, 2005, Vol.8, Spec. Issue, pp.137-140.
8. Dmitriev A.I., Psakhie S.G. Multi-scale study of low-density layer formation and lifting force effects under contact impact. *Frontiers of Eng. Mech. Res*, 2012, Vol.1, Iss.1, pp. 17-22.
9. Saraev Yu.N., Poletika I.M. Kozlov A.V., Kirilova N.V., Nikonova I.V., Perovskaja M.V., Ekimov V.S., Sal'ko A.E. *Formirovanie struktury i svoystv svarnyh soedinenij pri adaptivnoj impul'sno-dugovoj svarke pokrytymi jelektrodami otvetstvennyh konstrukcij, rabotajushhih v uslovijah nizkochastotnogo termociklirovanija* [Formation of the structure and properties of welded joints in adaptive pulsed-arc coated electrode welding of important structures working on the conditions of low frequency thermal cycling]. *Svarochnoe proizvodstvo - Welding International*, 2004, no. 1, pp. 22-27.
10. Saraev Yu. N., Bezborodov V.P. *Vlijanie jenergeticheskikh parametrov processov svarki na strukturu i svoystva zon svarnyh soedinenij nizkolegirovannyh stalej* [Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels]. *Svarochnoe proizvodstvo - Welding International*, 2012, no. 8, pp. 3-5.