

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.1.04

УДК 621.791.75

Е.А. Кривоносова, Д.С. Белинин, Е.К. КривоносоваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ТРАНСФОРМАЦИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В СТАЛЯХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА
НАГРЕВА**

Статья посвящена актуальной проблеме, связанной с изучением морфологии неметаллических включений, находящихся в рабочем поверхностном слое при модифицировании поверхностного слоя энергией плазменной струи. Исследуется состояние неметаллических включений до и после плазменной обработки методами количественной металлографии и фрактальной параметризации, а также перераспределение неметаллических включений по зоне плазменного воздействия. Количественный металлографический анализ проводили на автоматизированном комплексе анализа изображений и моделирования структур «Видеотест-металл». Для исследования фазообразования при плазменной обработке реализовывали клеточный вариант фрактального алгоритма с помощью программных средств MathCAD, MATLAB. Модель распределения напряжений в металлической матрице с включениями разрабатывали в программе COMSOL Multiphysic.

Зафиксировано существенное различие между объемными долями неметаллических включений в зоне оплавления и зоне перегрева при плазменной обработке стали 16Г2АФ. В 100 % исследованных образцов в зоне перегрева суммарное количество неметаллических включений на 20–30 % превышает количество включений в зоне оплавления, причем эта разница увеличивается с ростом погонной энергии. Установлено, что при смене полярности плазменной обработки с прямой на обратную наблюдается увеличение объемной доли включений как в зоне оплавления, так и в зоне перегрева. Использование азота в качестве защитного газа при плазменной обработке стали приводит к образованию структуры с равномерным распределением неметаллических включений; наплавки, полученные с использованием углекислого газа в качестве защитного, имеют структуру с фрактальной размерностью включений на 20 % меньше в каждой сравнимой зоне, что говорит о менее равномерном распределении включений. Зоны оплавления для всех образцов характеризуются малым значением фрактальной размерности, независимо от типа защитного газа.

Оценен уровень напряжений вблизи неметаллического включения, который возникает в металлической матрице при деформации. Установлено, что неметаллические включения размером более 10 мкм могут являться серьезными концентраторами напряжений: уровень напряжений вблизи включения может превышать предел текучести стали и даже достигать предела прочности.

Ключевые слова: наплавленные слои, плазменная обработка, прямая полярность, обратная полярность, неметаллические включения, зона плазменного воздействия, структура, фрактальная размерность, сталь 16Г2АФ, уровень напряжения.

E.A. Krivonosova, D.S. Belinin, E.K. Krivonosova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

TRANSFORMATION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STEELS BY THE ACTION OF THE PLASMA HEAT SOURCE

The article is devoted to an actual problem associated with the study of the morphology of non-metallic inclusions (НВ) located in the working surface layer at the surface layer of the modification of the plasma jet energy. We investigate the condition of non-metallic inclusions before and after plasma treatment methods of quantitative metallography and fractal parameterization, as well as the redistribution of non-metallic inclusions on the area of the plasma exposure. Quantitative metallographic analysis was performed on an automated complex image analysis and modeling of structures Videotest metal. For the study of phase formation during plasma processing implemented cellular variant of fractal algorithm using Mathcad, MATLAB software. stress distribution model in a metal matrix with inclusions developed in COMSOL Multiphysics program.

Fixed a significant difference between the volume fraction of nonmetallic inclusions in the fusion zone and heat zone at the plasma-treated steel 16G2AF. 100% of the investigated samples overheating zone the total amount of non-metallic inclusions is 20-30% higher than the number of inclusions in the melting zone, and this difference increases with increasing heat input. It is found that by changing the polarity of the direct plasma treatment to increase the reverse volume fraction of inclusions observed in the melting zone, and the overheating zone. The use of nitrogen as a protective gas during plasma processing of steel results in the formation of a structure with a uniform distribution of nonmetallic inclusions, welding, obtained using carbon dioxide as the shielding have a structure with a fractal dimension of the inclusions is 20% less in every comparable area, indicating that less a uniform distribution of inclusions. reflow zones for all samples are characterized by small values of the fractal dimension, regardless of the type of shielding gas.

Assess the level of stresses near the non-metallic inclusions, which occurs in the metal matrix during deformation. It was found that the non-metallic inclusions larger than 10 microns may yavlyatsya severe stress concentrators - the stress level near an inclusion can exceed the yield strength of steel, and even as high tensile strength.

Keywords: deposited layers, plasma treatment, straight polarity, keverse polarity, non-metallic inclusions, plasma exposure zone, structure, fractal dimension, steel 16G2AF, level of stresses.

Введение

Одним из эффективных путей повышения эксплуатационных характеристик изделия является возможность изменения структуры и свойств материала изделия путем модифицирования поверхностного слоя энергией плазменной струи, дуги или электронного луча. В многочисленных публикациях, посвященных различным аспектам применения высококонцентрированного излучения для решения технологических и материаловедческих задач, остаются невыясненными многие вопросы, относящиеся к природе взаимодействия излучения с металлическими материалами и процессам в зоне обработки. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, связанные с изучением морфологии неметаллических включений (НВ), находящихся

в рабочем поверхностном слое. Влияние неметаллических включений на свойства металла чаще всего негативное: снижаются вязкопластические свойства, появляется склонность к хладноломкости, старению. Исключения составляют мелкодисперсные включения карбонитридных фаз, действие которых заключается в модифицировании структуры и повышении комплекса специальных свойств. Устранить отрицательное и усилить положительное влияние неметаллических включений с помощью варьирования технологических параметров плазменной и дуговой обработки – это путь повышения работоспособности и долговечности изделия.

Современное решение вопроса по назначению технологических процессов плазменного упрочнения поверхностного слоя изделия связано с получением требуемой структуры зоны обработки на заданном участке за счет регулирования скоростей нагрева и охлаждения изделия, времени пребывания его при высоких температурах. Технологические возможности плазменной обработки позволяют использовать этот процесс в качестве заключительной операции без последующей механической обработки. Однако выбор технологических параметров плазменного излучения для получения требуемых свойств поверхностного слоя изделия связывают только с получением соответствующих структур в зоне плазменного воздействия (ЗПВ). При этом практически не исследуется состояние неметаллических включений до и после обработки, а также перераспределение легирующих элементов по ЗПВ. Также существует необходимость оценить уровень напряжений вблизи неметаллического включения, который возникает в металлической матрице при деформации [1–12].

Большинство разупрочняющих оксидных включений в ЗПВ в низколегированной стали 16Г2АФ относятся к системе $Fe_xMn_{1-x}O-SiO_2-Al_2O_3$. Кроме того, часто встречаются включения сульфидов и окисульфидов. Для характеристики включений руководствовались идентификационными признаками – такими, как форма, цвет, прозрачность, степень анизотропии, деформируемость, микротвердость, взаимодействие с определенными химическими реактивами и др. [1–3]. К группе модифицирующих включений относятся карбиды, нитриды, оксикарбонитриды. Образование нитридов зависит от соотношения азота, растворенного в жидкой сварочной ванне, и нитридообразующего элемента (ванадия), попадающего в шов в результате плавления

основного материала. Размер включений нитрида ванадия, определенный при моделировании кинетики роста включения, не превышает 0,3–0,5 мкм, что согласуется с выводами работы [13], в которой приводится значение 0,2 мкм, и с результатами металлографических исследований наиболее крупных из нитридов. Карбидные включения имеют более крупный размер – 0,5–3 мкм.

Технологии обработки и материалы исследования

Плазменная обработка стали производилась на установке, схема которой показана на рис. 1.

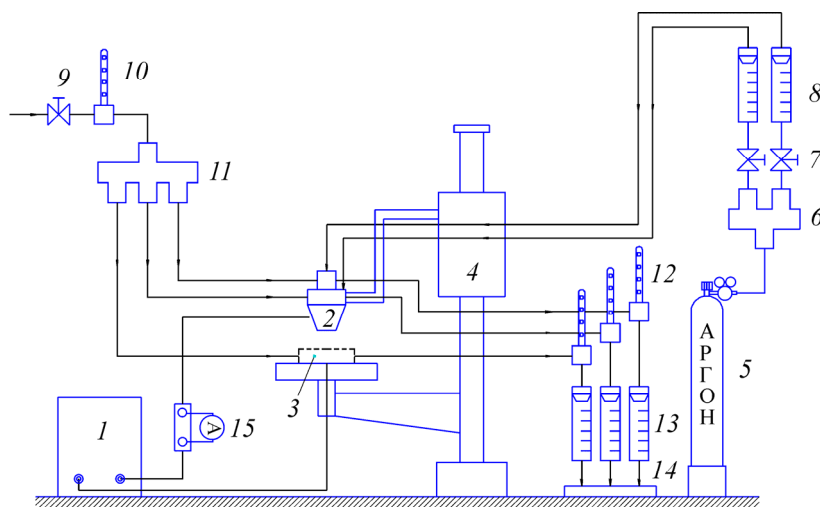


Рис. 1. Плазменная установка: 1 – источник питания; 2 – плазмотрон; 3 – изделие; 4 – сварочный манипулятор; 5 – баллон с аргонem; 6 – коллектор газовый; 7 – вентиль газовый; 8 – ротаметр газовый; 9 – вентиль водяной; 10, 12 – термометр ртутный; 11 – коллектор водяной; 13 – ротаметр водяной; 14 – слив; 15 – амперметр

Варьировались следующие параметры режима:

- 1) сила тока (100; 150; 200; 240 А);
- 2) напряжение (18; 20; 22; 24 В);
- 3) защитный газ (CO_2 и N_2);
- 4) полярность (прямая и обратная);
- 5) скорость перемещения плазмотрона не изменялась – 20 см/мин.

Плазменной обработке подвергали низколегированную сталь 16Г2АФ, химический состав которой приведен ниже.

Химический состав 16Г2АФ, мас. % (ГОСТ 19281–89)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	V	N	Cu	As
0,14– 0,2	0,3– 0,6	1,3– 1,7	до 0,3	до 0,04	до 0,035	до 0,4	0,08– 0,14	0,015– 0,025	до 0,3	до 0,08

**Количественный анализ уровня загрязненности
неметаллическими включениями зоны оплавления
и зоны плазменного воздействия**

Количественный металлографический анализ проводили на автоматизированном комплексе анализа изображений и моделирования структур «Видеотест-металл».

Количественный состав неметаллических включений определялся отношением темных участков (пятен), создаваемых ими на нетравленном шлифе, к общей площади зоны плазменного воздействия, поле зрения составляло 0,765 мм².

В табл. 1, 2 приведены режимы плазменной обработки всех серий эксперимента.

Таблица 1

Обозначения серий образцов при плазменной обработке стали 16Г2АФ

Номер серии швов	Защитный газ	Полярность
Серия 1 (шов 1)	Углекислый (CO ₂)	Прямая
Серия 2 (шов 2)	Углекислый CO ₂)	Обратная
Серия 3 (шов 3)	Азот (N ₂)	Прямая
Серия 4 (шов 4)	Азот (N ₂)	Обратная

В каждой серии испытывалось в среднем по восемь образцов.

Зона плазменного воздействия включает в себя зону оплавления (ЗО) и зону перегрева (ЗП).

Металл в зоне оплавления перегревается свыше температуры плавления под действием плазменного источника нагрева и кристаллизуется с образованием литой структуры. Металл в зоне перегрева

не переходит в жидкое состояние, однако перегревается до высоких температур, что приводит к усилению фазообразования и форсированию структурных превращений.

Таблица 2

Параметры режима плазменной обработки стали 16Г2АФ

Номер образца	Защитный газ							
	Углекислый (CO ₂)				Азот (N ₂)			
	Прямая полярность		Обратная полярность		Прямая полярность		Обратная полярность	
	Сила тока I, А	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Напряжение U, В
1	100	18	100	18	100	18	100	18
2	100	18	100	18	150	20	150	20
3	150	20	150	20	200	22	200	22
4	150	20	150	20	200	22	240	24
5	200	22	200	22	240	24	240	24
6	200	22	200	22	240	24	–	–
7	240	24	240	24	240	24	–	–
8	240	24	240	24	–	–	–	–

На рис. 2–4 показаны наиболее характерные результаты количественного металлографического анализа включений для зоны оплавления и зоны перегрева при плазменном воздействии – распределение включений по размерным группам (ГОСТ 1778). В табл. 3–6 сведены данные об объемной доле включений в этих зонах на единицу площади в зависимости от погонной энергии.

Из рисунков и таблиц видно, что наибольшее количество включений сосредоточено в зоне плазменного воздействия, там же формируются более крупные НВ (рис. 2). Объемная доля включений в металле шва № 1 (защитный газ CO₂, прямая полярность) на единицу площади меньше, чем в зоне перегрева. Количество включений в ЗП значительно выше, чем в ЗО. Эта разница увеличивается с ростом погонной энергии, как видно из табл. 3.

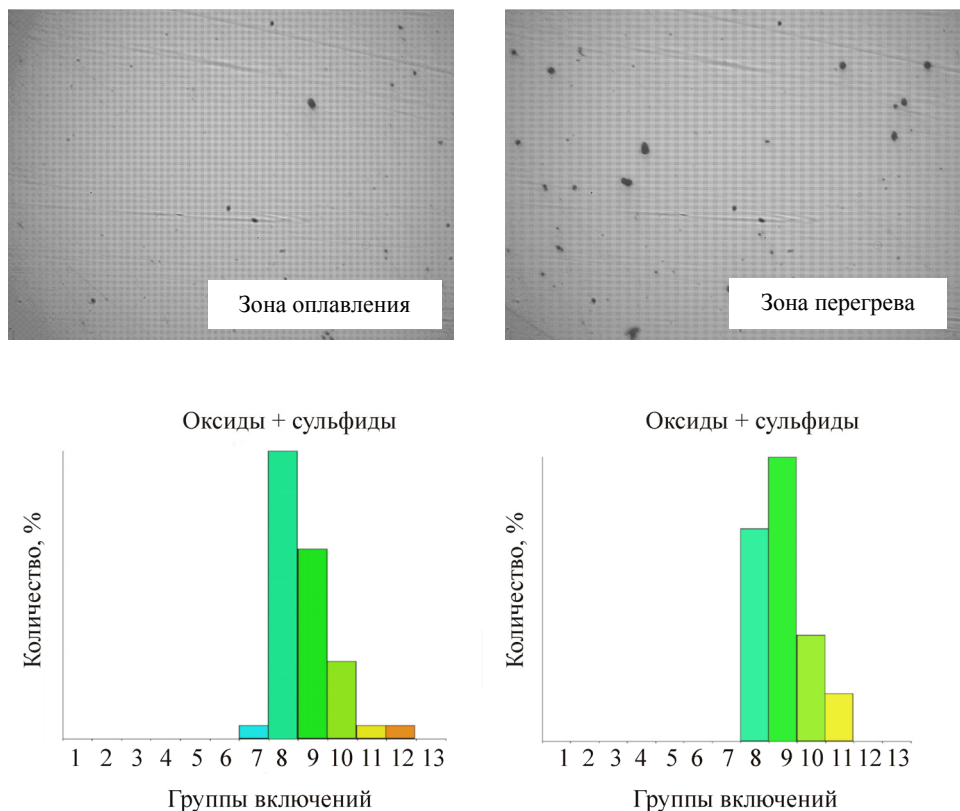


Рис. 2. Распределение включений по группам в зонах оплавления и перегрева. Образец № 1 (100 А), шов 1 (CO₂, прямая полярность), ×500

Рис. 3 и анализ сводных данных табл. 4 по шву № 2 (защитный газ CO₂, обратная полярность) показывают, что при смене полярности при плазменной обработке тенденция миграции неметаллических включений от центра ванны сохраняется. Однако во всех случаях наблюдается увеличение объемной доли включений в поле зрения по сравнению образцами, выполненными на прямой полярности. Это может происходить по причине того, что тепловой поток на единицу площади меньше, т.е. каждое НВ медленнее совершает переход из твердой фазы в газожидкостную. С ростом погонной энергии эта разница становится менее заметна, так как НВ будут получать достаточное количество теплоты для мгновенного трансформирования и перераспределения. Форма включений здесь, так же как и в шве № 1, преимущественно глобулярная.

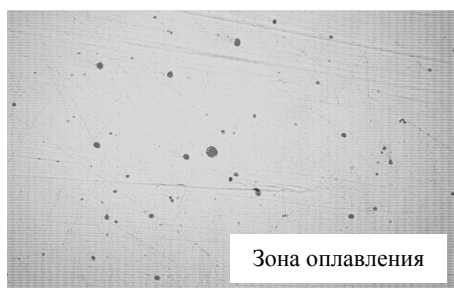
Таблица 3

Объемная доля включений в зоне плазменного воздействия на единицу площади и количество включений.
Шов № 1 (защитный газ CO₂, прямая полярность)

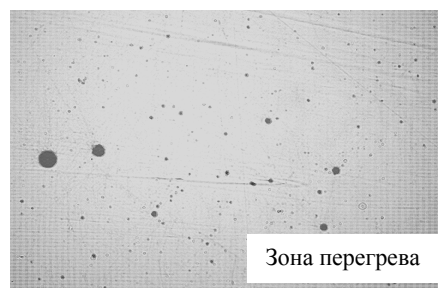
Зоны плазменного воздействия	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
	Доля включений, об. % (количество включений*, шт.)							
ЗО	0,41 (43)	0,49 (47)	0,27 (46)	0,35 (44)	0,28 (82)	0,15 (41)	0,31 (57)	0,27 (44)
ЗП	0,64 (53)	0,70 (56)	0,40 (66)	0,90 (87)	0,44 (81)	0,33 (37)	0,38 (71)	0,61 (80)
Разница**, %	36	30	32,5	62	37	55	19	56

* Количество включений в поле зрения, площадь поля, 0,765 мм²; доля включений на единицу площади.

** Разница (%) = Количество включений в ЗП – Количество включений в ЗО.



Оксиды + сульфиды



Оксиды + сульфиды

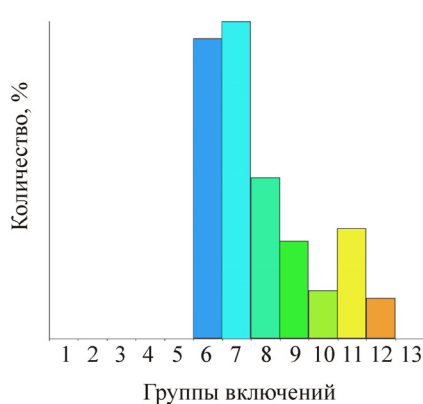
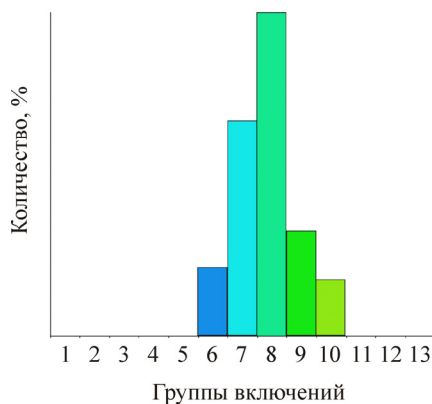


Рис. 3. Распределение включений по размерным группам в зонах оплавления и перегрева. Образец № 8 (240 А), шов № 2 (CO₂, обратная полярность), ×500

Таблица 4

Объемная доля включений в зоне плазменного воздействия на единицу площади и количество включений.
Сварной шов № 2 (защитный газ CO₂, полярность обратная)

Зоны плазменного воздействия	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
	Доля включений, об. % (количество включений, шт.)							
Сварной шов	0,49 (84)	0,55 (92)	0,43 (49)	0,69 (103)	0,39 (37)	0,38 (47)	0,47 (50)	0,50 (48)
ЗТВ	0,89 (95)	1,32 (109)	0,49 (53)	0,94 (122)	0,70 (88)	0,56 (58)	0,36 (62)	0,48 (80)
Разница, %	45	59	13	27	45	33	30	104

В сварном шве № 3 (защитный газ N₂, прямая полярность) наблюдается меньшее количество включений, чем в зоне перегрева (табл. 5). В зоне термического воздействия, как и в швах № 1 и № 2, зафиксирован рост среднего размера НВ по сравнению с зоной расплавления. Также в сварном шве зарегистрировано увеличение доли остроугольных включений сложной формы, предположительно нитридов и карбонитридов (рис. 4).

Таблица 5

Объемная доля включений в зоне плазменного воздействия на единицу площади и количество включений.
Шов № 3 (защитный газ N₂, полярность прямая)

Зоны плазменного воздействия	Сила тока, А							
	100	100	150	150	200	200	240	240
	Доля включений, об. % (количество включений, шт.)							
Сварной шов	0,32 (52)	0,39 (63)	0,40 (35)	0,29 (46)	0,31 (40)	0,34 (30)	0,21 (35)	
ЗТВ	0,70 (85)	0,85 (94)	0,59 (74)	0,74 (88)	0,35 (63)	0,30 (49)	0,45 (90)	
Разница, %	55	55	33	61	12	13	54	

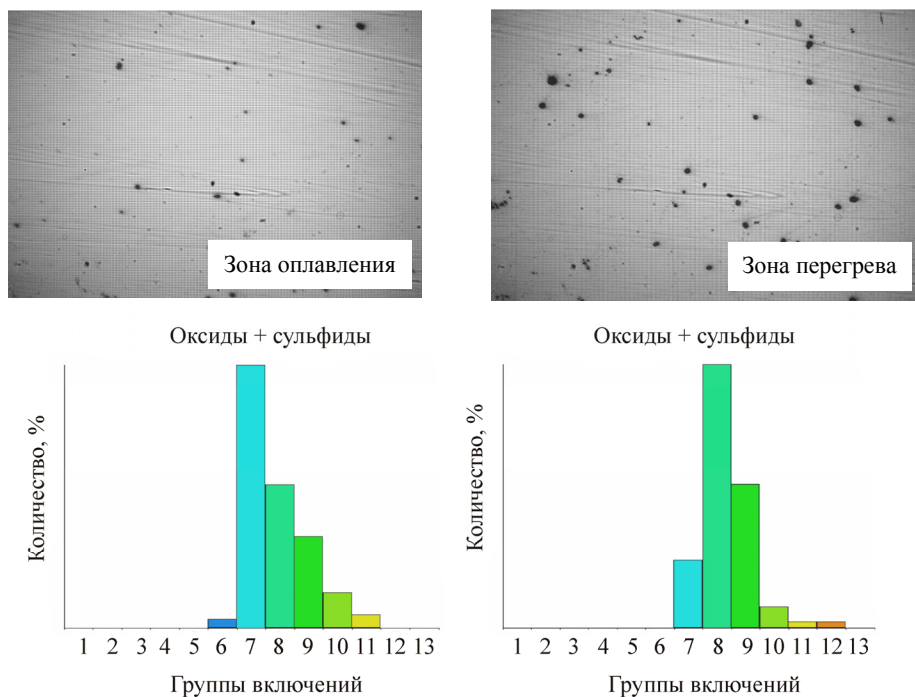


Рис. 4. Распределение включений по размерным группам в зонах расплавления и перегрева. Образец № 4 (150 А), шов № 3 (N₂, прямая полярность), ×500

В сварном шве № 4 (защитный газ N₂, обратная полярность) результаты аналогичны шву № 2, при смене полярности зафиксировано увеличение объемной доли включений в зоне плазменного воздействия (рис. 5, табл. 6). Но общая закономерность сохраняется: в зоне расплавления при плазменной обработке включений зарегистрировано

Таблица 6

Объемная доля включений в зоне плазменного воздействия на единицу площади и количество включений.
Шов № 4 (защитный газ N₂, обратная полярность)

Зоны плазменного воздействия	Сила тока, А				
	100	100	150	150	200
	Доля включений, об. % (количество включений, шт.)				
Сварной шов	0,56 (89)	0,63 (97)	0,36 (46)	0,48 (55)	–
ЗТВ	0,97 (115)	1,08 (130)	0,66 (86)	0,86 (96)	0,36 (41)
Разница, %	43	42	46	45	–

меньше, чем в зоне перегрева. Средний размер включений увеличивается по мере удаления от центра ванны. Растет доля остроугольных включений сложной формы.

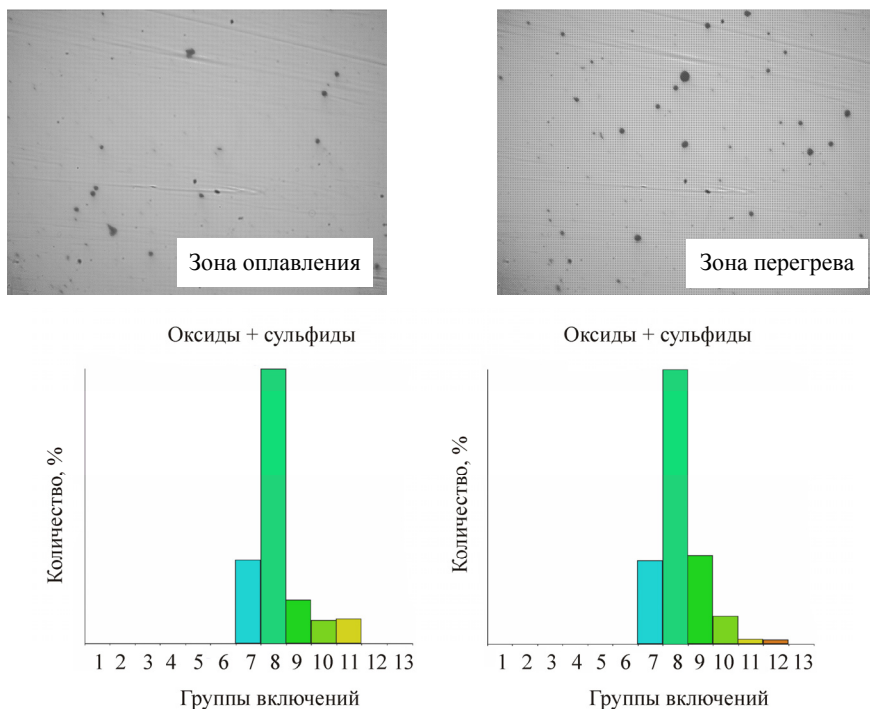


Рис. 5. Распределение включений по размерным группам в зонах расплавления и перегрева. Образец № 3 (150 А), шов № 4 (N₂, обратная полярность), ×500

Исследование фазообразования неметаллических включений в зоне плазменной обработки на стали 16Г2АФ методом фрактальной параметризации

В данной работе мы применили фрактальный подход к анализу структурных особенностей при фазообразовании неметаллических включений в зоне плазменной обработки на стали 16Г2АФ для прогнозирования влияния плазменной дуги на их образование, трансформацию и перераспределение.

Более подробно фрактальный подход описан в работах [14, 15] для структур металла сварных швов, пористых сред, поверхностей излома и др.

Суть фрактального подхода к анализу структурообразования заключается в обработке масштабированием фрактальной структуры

и описании распределения какой-либо структурной характеристики, или меры $P(L_i)$, при этом масштабировании. Геометрическим носителем при масштабировании является сетка с квадратными ячейками различного размера L_i . Для данного объекта предложено в качестве меры принять плотность распределения неметаллических включений (темной фазы на нетравленном шлифе) на условной прямоугольной сетке, покрывающей поле шлифа.

Для исследования фазообразования при плазменной обработке реализовывали клеточный вариант фрактального алгоритма с помощью программных средств MathCAD, MATLAB.

На рис. 6 показаны наиболее характерные результаты фрактального анализа зоны плазменного воздействия при использовании азота в качестве защитного газа, а на рис. 7 – то же для углекислого газа.

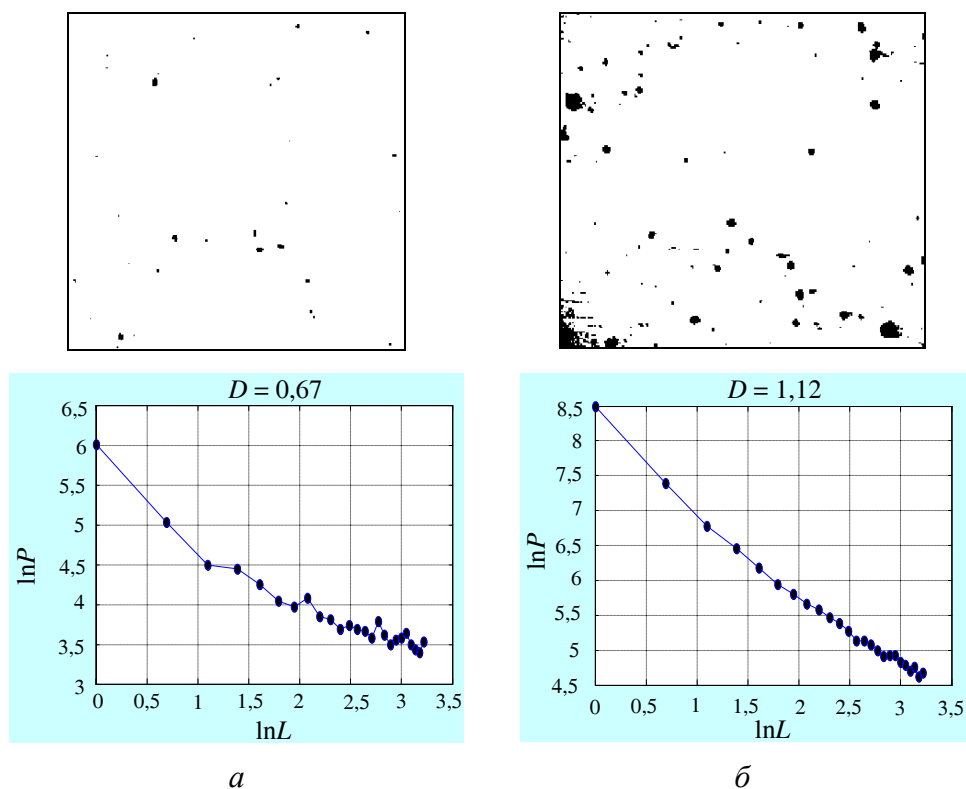


Рис. 6. Результаты фрактального анализа неметаллических включений зоны оплавления (а) и зоны перегрева (б) при плазменной обработке стали 16Г2АФ: сверху – равномерное распределение включений по полю шлифа (бинарное изображение, плазмообразующий газ N_2); внизу – реализация фрактального анализа и определение фрактальной размерности ($\times 550$)

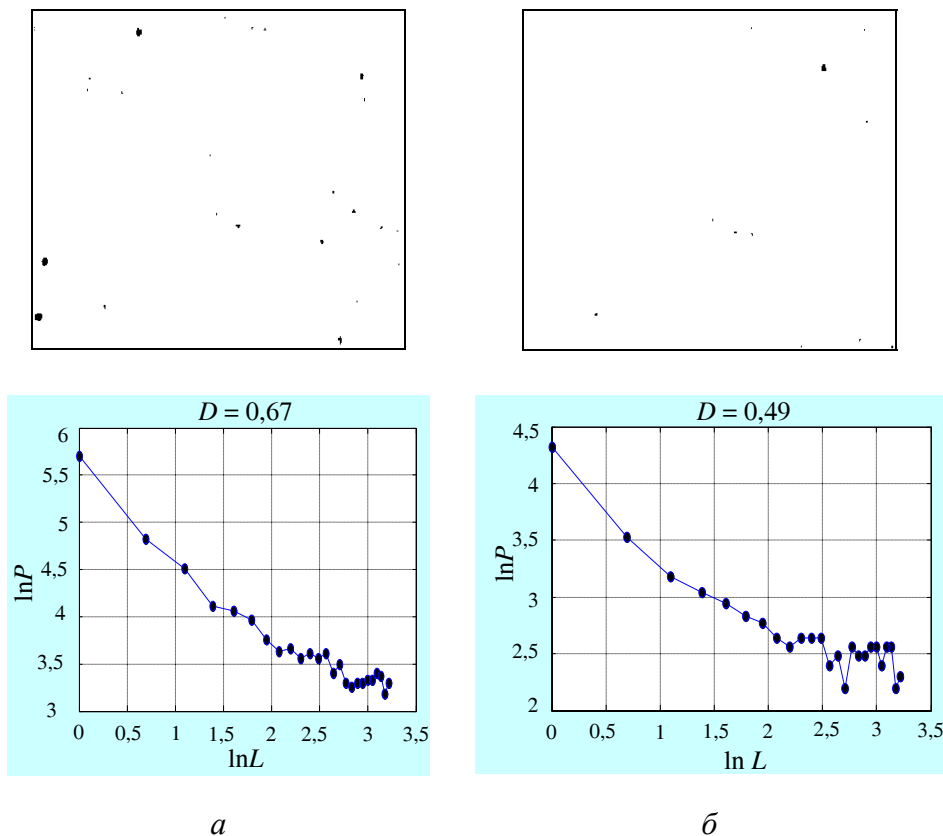


Рис. 7. Результаты фрактального анализа неметаллических включений зоны оплавления (а) и зоны перегрева (б) при плазменной обработке стали 16Г2АФ: сверху – неравномерное распределение включений по полю шлифа (бинарное изображение включений в ЗО, плазмообразующий газ – CO_2); внизу – реализация фрактального анализа и определение фрактальной размерности ($\times 550$)

На фрагментах *a* – бинарное изображение включений в соответствующих зонах плазменного воздействия: в ЗО – зоне оплавления и ЗП – зоне перегрева по двум полям зрения; на фрагментах *б* – реализация фрактального анализа и определение фрактальной размерности по угловому коэффициенту наклона прямой $\ln P - \ln L$ при обработке методом наименьших квадратов.

В табл. 7 приведены обобщающие результаты взаимосвязи характера распределения и формы включений и фрактальной размерности.

Таблица 7

Обобщающие результаты взаимосвязи характера распределения и формы включений и фрактальной размерности при плазменной обработке стали

Зона плазменного воздействия	Плазмообразующий газ N ₂			Плазмообразующий газ CO ₂		
	Характер распределения включений, форма	Количество включений, шт. в поле зрения	Фрактальная размерность D_f	Характер распределения включений, форма	Количество включений, шт. в поле зрения	Фрактальная размерность D_f
Зона оплавления	Округлые равномерно распределенные	40–50	0,63–0,65	Граненые неравномерно распределенные	35–42	0,40–0,49
Зона перегрева (1)	Округлые равномерно распределенные	60–80	1,10–1,20	Округлые и граненые равномерно распределенные	100–170	0,65–0,68
Зона перегрева (2)	Округлые равномерно распределенные	90–100	0,80–0,85	Округлые и граненые равномерно распределенные	70–80	0,64–0,69

Таким образом, получены дополнительные результаты, свидетельствующие о характере распределения и форме включений при плазменной обработке стали по критерию фрактальной размерности.

Использование азота в качестве защитного газа при плазменной обработке стали приводит к образованию структуры с равномерным распределением неметаллических включений, при этом значение фрактальной размерности распределения неметаллических включений на всех исследованных полях зрения меняется от минимального 0,67 в зоне оплавления до максимального 1,12 в зоне перегрева. Наплавки,

полученные с использованием углекислого газа в качестве защитного, имеют структуру с фрактальной размерностью включений на 20 % меньше в каждой сравнимой зоне (минимальное значение 0,45 в зоне оплавления, максимальное – 0,70 в зоне термовлияния), что говорит о менее равномерном распределении включений. Зоны оплавления для всех образцов характеризуются малым значением фрактальной размерности, независимо от типа защитного газа.

При плазменной обработке стали с использованием CO_2 основными неметаллическими включениями являются комплексные оксисульфиды, химический состав, форма и размеры которых идентичны включениям, образующимся при дуговой сварке. Однако характер распределения в этом случае иной. В зоне оплавления наблюдается сравнительно чистая область с фрактальной размерностью включений 0,45–0,49. В зоне термовлияния включения расположены равномерно, общее содержание их выше и фрактальная размерность находится в пределах 0,65–0,70.

Влияние неметаллических включений на развитие деформации образцов

Модель распределения напряжений в металлической матрице с включениями разрабатывали в программе COMSOL Multiphysic. При моделировании в качестве металла шва использовалась низколегированная сталь, в качестве включений – несжимаемая твердая и прочная материя. Такие параметры соответствуют реальным физическим свойствам основного материала и включений, например, значение модуля упругости SiO_2 , Al_2O_3 и других оксидов на несколько порядков превосходит его значения для металлов. Внешняя распределенная нагрузка составляла 1000 Н/м^2 . Правая шкала – напряжение внутри шва, левая – общая деформация (рис. 8).

Из рис. 8 следует, что неметаллические включения размером более 10 мкм могут являться серьезными концентраторами напряжений: уровень напряжений вблизи включения может превышать предел текучести стали и даже достигать предела прочности. Модельные результаты согласуются с выводами, полученными ранее в работе [7].

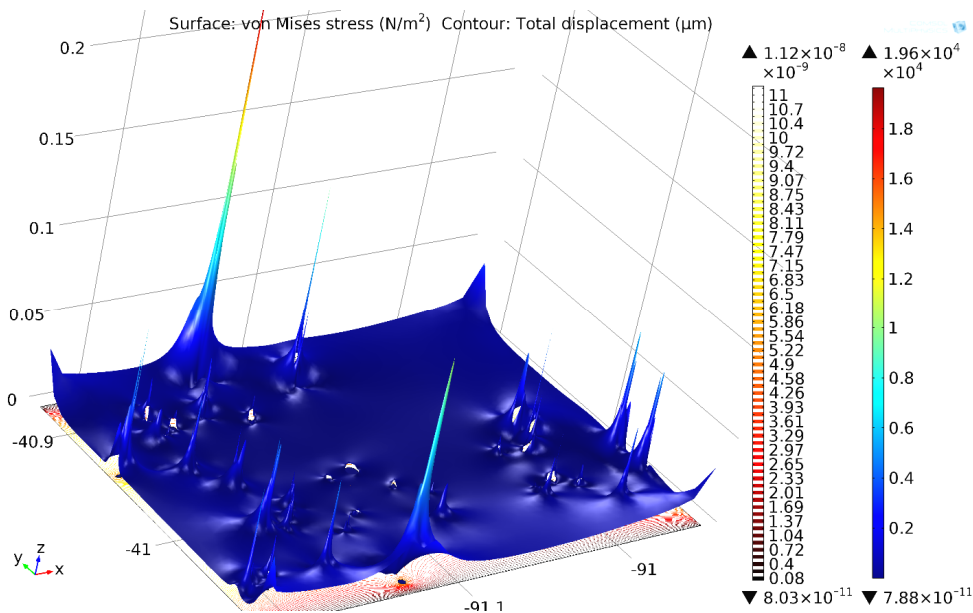


Рис. 8. Модель распределения напряжений в металлической матрице с неметаллическими включениями

Заключение

Зафиксировано существенное различие между объемной долей неметаллических включений в зоне оплавления и зоне перегрева при плазменной обработке стали 16Г2АФ. В 100 % исследованных образцов в зоне перегрева суммарное количество неметаллических включений на 20–30 % превышает количество включений в зоне оплавления, причем эта разница увеличивается с ростом погонной энергии. Это явление можно объяснить различием теплофизических свойств неметаллических включений и металлической матрицы, находящейся в перегретом твердом состоянии и в жидком состоянии. Поскольку неметаллические включения имеют более высокую теплоемкость, они поглощают большее количество энергии по сравнению с основным металлом. Это приводит к появлению дополнительного градиента температуры от центра зоны оплавления к зернам перегретого металла. Кроме того, включения находятся под воздействием высоких скоростей нагрева и турбулентности, соответствующих плазменной дуге. Средний размер включений, находящихся в зоне перегрева, больше, чем аналогичный показатель в зоне расплавления.

При смене полярности плазменной обработки с прямой на обратную наблюдается увеличение объемной доли включений как в зоне расплавления, так и в зоне перегрева. Это объясняется тем фактом, что при работе плазмотрона на токе обратной полярности тепловложение в изделие в 1,2–1,5 раза выше, чем на прямой. Увеличение тепловложения приводит к усилению физико-химических процессов с участием гетерогенных фаз, а также активизации процесса образования неметаллических включений эндогенной природы.

При использовании углекислого газа в качестве защитного наблюдается преимущественно глобулярная (округлая) форма включений, характерная для оксидов и окисульфидов. При использовании в качестве защитного газа азота в наплавленном металле наблюдается появление граненых частиц сложной формы – нитридов и карбонитридов.

Неметаллические включения размером более 10 мкм могут являться серьезными концентраторами напряжений: уровень напряжений вблизи включения может превышать предел текучести стали и даже достигать предела прочности.

Список литературы

1. Виноград М.И., Громова Г.П. Неметаллические включения в легированных сталях и сплавах. – М.: Металлургия, 1972. – 216 с.
2. Бельченко Г.И., Губенко С.И. Неметаллические включения и качество стали. – Киев: Наук. думка, 1980. – 168 с.
3. Барахтин Б.К., Немец А.М. Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Физико-аналитические методы исследования металлов и сплавов. Неметаллические включения: справочник / под ред. Б.К. Барахтина. – СПб.: Проффессионал, 2006. – 487 с.
4. Кривоносова Е.А., Рудакова О.А. Влияние структуры отдельных слоев сварных швов стали 10Г2ФБЮ на сопротивление усталостному разрушению // Сварочное производство. – 2012. – № 11. – С. 6–9.
5. Кривоносова Е.А., Язовских В.М., Вылежнева Н.В. Влияние неметаллических включений на развитие деформации сварных швов // Тяжелое машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 36–39.
6. Кривоносова Е.А., Лодягина Т.В. Влияние термического цикла сварки на трансформацию неметаллических включений в зоне термического влияния при сварке стали 16Г2АФ // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 6(2). – С. 391–394.
7. Кривоносова Е.А. Особенности влияния неметаллических фаз на развитие деформации наплавленных слоев // Вестник Пермского национального исследовательского

ского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 189–204.

8. Семенцев А.М. Массоперенос легирующих элементов в технологических процессах лазерной обработки. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 147 с

9. Термическая стабильность аустенитно-ферритных Cr–Ni–Nb-сварных швов, дополнительно легированных кремнием / С.И. Носов, П.А. Алексеенко, А.С. Гуденко, Д.А. Змиенко // Тяжелое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 22–26.

10. Головкин В.В., Походня И.К. Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей // Автоматическая сварка. – 2013. – № 6. – С. 3–11.

11. Потеева Л.И., Вахрушев О.В., Трофимова А.Н. Механические свойства сварных соединений при различном сочетании сварочных материалов для сварки судов из стали 09Г2ФБ // Сварочное производство. – 2011. – № 6. – С. 8–10.

12. Коротков В.А., Ананьев С.А., Шекуров А.В. Исследование влияния скорости охлаждения на структуру и механические свойства металла при плазменной закатке // Сварочное производство. – 2013. – № 2. – С. 26–29.

13. Krivososova Ye.A., Sinkina Ye.A. Modelling the growth kinetics of carbide phase particles in welded joints in high-alloy steels // *Welding International*. – 2014. – Vol. 28, iss. 6. – P. 461–464.

14. Krivososova E.A. Fractal analysis of the formation of structure in welded joints // *Welding International*. – 2005. – Vol. 19, № 12. – P. 976–970.

15. Krivososova E.A. Predicting the properties of the metal of welded joints on the basis of the results of quantitative parametrisation of the structure // *Welding International*. – 2016. – Vol. 30, № 6. – P. 459–462.

References

1. Vinograd M.I., Gromova G.P. Nemetallicheskie vklucheniia v legirovannykh staliakh i splavakh [Nonmetallic inclusions in alloyed the stalyakh and alloys]. Moscow, Metallurgiya, 1972, 216 p.

2. Bel'chenko G.I., Gubenko S.I. Nemetallicheskie vklucheniia i kachestvo stali [Nonmetallic inclusions and quality of steel]. Kiev, Naukova dumka, 1980, 168 p.

3. Barakhtin B.K., Nemets A.M. Metally i splavy. Analiz i issledovanie. Fiziko-analiticheskie metody issledovaniia metallov i splavov. Nemetallicheskie vklucheniia: spravochnik [Analysis and research. Fiziko-analitichesky methods of a research of metals and alloys. Nonmetallic inclusions: reference book]. Ed. B.K. Barakhtina. Saint-Petersburg, Professional, 2006, 487 p.

4. Krivososova E.A., Rudakova O.A. Vliianie struktury otdel'nykh sloev svarnykh shvov stali 10G2FB1u na soprotivlenie ustalostnomu razrusheniiu [Influence of structure of separate layers of welded seams of steel 10G2FB1u on resistance to fatigue failure]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2012, no. 11, pp. 6–9.

5. Krivososova E.A., Iazovskikh V.M., Vylezhneva N.V. Vliianie nemetallicheskiikh vkluchenii na razvitie deformatsii svarnykh shvov [Influence of nonmetallic inclusions on development of deformation of welded seams]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2003, no. 12, pp. 36–39.

6. Krivonosova E.A., Lodiagina T.V. Vliianie termicheskogo tsik-la svarki na transformatsiiu nemetallicheskih vklucheni v zone termicheskogo vliianiia pri svarke stali 16G2AF [Influence of a thermal cycle of welding on transformation of nonmetallic inclusions in a zone of thermal influence when welding steel 16G2AF]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 6(2), pp. 391–394.

7. Krivonosova E.A. Osobennosti vliianiia nemetallicheskih faz na razvitie deformatsii naplavlennykh sloev [Features of influence of nonmetallic phases on development of deformation of the built-up layers]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 189–204.

8. Sementsev A.M. Massoperenos legiruiushchikh elementov v tekhnologicheskikh protsessakh lazernoi obrabotki [Mass transfer of the alloying elements in technological processes of laser processing]. Moscow, *Mashinostroenie-1*, 2006, 147 p.

9. Nosov S.I., Alekseenok P.A., Gudenko A.S., Zmienko D.A. Termicheskaia stabil'nost' austenitno-ferritnykh Cr–Ni–Nb-svarnykh shvov, dopolnitel'no legirovannykh kremniem [Thermal stability of the austenitic and ferritic Cr-Ni-Nb-welded seams which are in addition alloyed by silicon]. *Tiazheloe mashinostroenie*, 2013, no. 3, pp. 22–26.

10. Golovko V.V., Pokhodnia I.K. Vliianie nemetallicheskih vklucheni na formirovanie struktury metalla svarnykh shvov vysoko-prochnykh nizkolegirovannykh staley [Influence of nonmetallic inclusions on formation of structure of metal of welded seams high-strength low-alloyed by staly]. *Avtomaticheskaia svarka*, 2013, no. 6, pp. 3–11.

11. Poteeva L.I., Vakhrushev O.V., Trofimova A.N. Mekhanicheskie svoistva svarnykh soedinenii pri razlichnom sochetanii svarochnykh materialov dlia svarki sudov iz stali 09G2FB [Mechanical properties of welded connections at various combination of welding materials for welding of vessels from steel 09G2FB]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2011, no. 6, pp. 8–10.

12. Korotkov V.A., Anan'ev S.A., Shekurov A.V. Issledovanie vliianiia skorosti okhlazhdeniia na strukturu i mekhanicheskie svoistva metalla pri plazmennoi zakalke [Research of influence of speed of cooling on structure and mechanical properties of metal at plasma training]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2013, no. 2, pp. 26–29.

13. Krivonosova Ye.A., Sinkina Ye.A. Modelling the growth kinetics of carbide phase particles in welded joints in high-alloy steels. *Welding International*, 2014, vol. 28, iss. 6, pp. 461–464.

14. Krivonosova E.A. Fractal analysis of the formation of structure in welded joints. *Welding International*, 2005, vol. 19, no. 12, pp. 976–970.

15. Krivonosova E.A. Predicting the properties of the metal of welded joints on the basis of the results of quantitative parametrisation of the structure. *Welding International*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 459–462.

Получено 26.01.17

Об авторах

Кривоносова Екатерина Александровна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Кривоносова Екатерина Константиновна (Пермь, Россия) – кандидат экономических наук, научный сотрудник кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: k.krivonosova@gmail.com.

About the authors

Ekaterina A. Krivonosova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: katerinakkkkk@mail.ru.

Dmitry S. Belinin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Ekatherine K. Krivonosova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Researcher, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: k.krivonosova@gmail.com.