

УДК 621.791.92:620.03

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ\*

**Баранникова С.А.**<sup>1,2,3</sup>, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, профессор кафедры механики деформируемого твердого тела и строительной механики (bsa@ispms.tsc.ru)

**Шляхова Г.В.**<sup>2</sup>, к.т.н., научный сотрудник (shgv@ispms.tsc.ru)

**Зернин Е.А.**<sup>4</sup>, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой сварочного производства (yuti\_sp@bk.ru)

**Кузнецов М.А.**<sup>4</sup>, старший преподаватель кафедры сварочного производства (kuznechik\_85@mail.ru)

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
(634034, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

<sup>3</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет  
(634003, Россия, Томск, пл. Соляная, 2)

<sup>4</sup> Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского  
Томского политехнического университета  
(652055, Россия, Кемеровская обл., Юрга, ул. Ленинградская, 26)

**Аннотация.** Проведены теоретические и экспериментальные исследования по определению оптимальной концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе. Задача настоящего исследования – разработка методики по определению оптимальной концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе при сварке плавящимся электродом в среде аргона. В экспериментальных исследованиях для подтверждения расчетов использовали нанопорошок молибдена, введение которого в сварочную ванну осуществляли через специальное устройство. Наплавку образцов проводили на экспериментальной установке, в состав которой входили сварочная головка ГСП-2, укомплектованная разработанным устройством, источник питания ВС-300Б. Для наплавки образцов из стали 12Х18Н10Т применяли сварочную проволоку 12Х18Н9Т diam. 1,2 мм. Для обеспечения качественного сварного соединения при сварке размеры дендритов должны стремиться к минимуму. Стабильный процесс сварки обуславливается переходом капле электродного металла с торца сварочной проволоки в сварочную ванну, следовательно, объем капли электродного металла также должен стремиться к минимуму. До начала оптимизации концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе было установлено влияние параметров режима сварки плавящимся электродом в среде аргона на микроструктуру наплавленного металла. Результаты исследований показали, что минимальный размер зерен наблюдается при силе тока 240 – 260 А и напряжении дуги 28 – 30 В. При этих режимах были проведены исследования по выбору оптимальной концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе. Установлено, что оптимальная концентрация наноструктурированных порошков-модификаторов в защитном газе составляет 20 мг/м сварного шва. Установлено, что применение разной концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе позволяет получать различную микроструктуру наплавленного металла. Наиболее слабоветвленные дендриты и равновесная структура по размеру дендритов достигается при концентрации наноструктурированного порошка в защитном газе 20 мг/м сварного шва. При добавлении наноструктурированных порошков-модификаторов в жидкую сварочную ванну происходит увеличение механических свойств сварных соединений по сравнению с процессом сварки без добавления напорошков-модификаторов при +20 °С на 7,5 %, при +500 °С на 6,5 %.

**Ключевые слова:** наноструктурированные порошки, оптимальная концентрация, защитный газ, многофакторное планирование, кристаллизация, сварочная ванна.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-292-297

В настоящее время широкое применение в металлургическом производстве нашли элементы-модификаторы [1 – 11], которые служат для изменения структуры и свойств обработанного ими металла или сплава.

Основную роль при формировании сварного соединения играют металлургические процессы, протекающие в расплавленном металле сварочной ванны, поэтому становится актуальным вопрос о применении модификаторов в сварочном производстве с целью

управления структурой и свойствами наплавленного металла [12].

При традиционных методах постановки эксперимента предусматривается фиксирование на принятых уровнях всех переменных факторов, кроме одного, значения которого определенным образом изменяются в заданном диапазоне его варьирования (однофакторный эксперимент). Это требует постановки очень большого числа опытов, многие из которых впоследствии оказываются ненужными, так как выполняются в далекой от оптимальной области. При этом считается, что тематические методы следует использовать только на

\* Исследования проведены в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук России на 2017 – 2020 гг.

последней стадии исследования при математической обработке их результатов [13].

При многофакторном оптимальном планировании экспериментов математические методы используются на всех стадиях научного исследования, в том числе при постановке задачи и построении плана выполнения совокупности экспериментов [14].

Одним из достоинств математического планирования многофакторных экспериментов является достаточно четкое последовательное распределение выполняемых операций [14].

Цель настоящей работы – разработка технологических основ применения наноструктурированных материалов в качестве модифицирующих добавок, позволяющих управлять процессом кристаллизации, прогнозировать структуру и получать сварные соединения с заданными свойствами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: разработать методику по определению оптимальной концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе при сварке плавящимся электродом в среде аргона; установить влияние наноструктурированных порошков на структуру металла шва при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов; провести анализ размеров зерна металла шва при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов; получить оптимальную микроструктуру наплавленного металла при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов.

Введение нанопорошков в сварочную ванну осуществляли через специальное устройство [15], предназначенное для получения смеси аргона с нанопорошком. В этом устройстве осуществляется регулирование концентрации частиц нанопорошков в объеме защитного газа, подающегося в зону горения дуги, смесь образуется за счет инжектирования нанопорошка защитным газом.

В состав экспериментальной установки входили сварочная головка ГСП-2, укомплектованная специальным устройством [15], источник питания ВС-300Б. Для наплавки образцов из стали 12Х18Н10Т применяли сварочную проволоку 12Х18Н9Т диам. 1,2 мм.

Оптимизация концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе была проведена по следующим параметрам:  $s$  – толщина дендрита, мм;  $e$  – ширина дендрита, мм;  $v$  – объем капли электродного металла, мм<sup>3</sup>.

До начала оптимизации концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе было установлено влияние параметров режима сварки плавящимся электродом в среде аргона на микроструктуру наплавленного металла. Результаты исследований показали, что минимальный размер зерен наблюдается при силе тока 240 – 260 А и напряжении дуги 28 – 30 В (рис. 1). При этих режимах были проведены исследования по

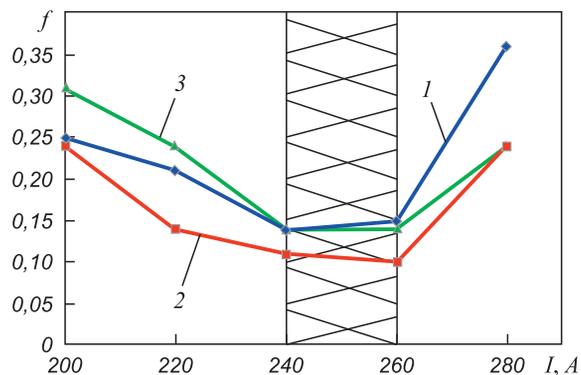


Рис. 1. Оптимальные режимы сварки при использовании наноструктурированных порошков вольфрама (1), оксида алюминия (2) и молибдена (3)

Fig. 1. Optimal welding modes using nanostructured powders of tungsten (1), aluminum oxide (2) and molybdenum (3)

выбору оптимальной концентрации наноструктурированных порошков (вольфрама (X), оксида алюминия (Y) и молибдена (Z)) в защитном газе.

Предварительно были проведены эксперименты, по которым определены границы изменения концентраций наноструктурированных порошков X, Y, Z (5 – 40 мг/м сварного шва), а также шаг изменения (5 мг/м сварного шва).

При планировании исследований была использована идея факторного планирования [16], главным условием которого является обеспечение ортогональности используемого «латинского (магического) квадрата» (факторный эксперимент) [17].

Были рассмотрены восемь значений концентраций X, Y, Z. Варианты факторов обозначены индексами 1 – 8. Варьирование факторов показано ниже:

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$	$Y_7$	$Y_8$
$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$

Далее были проведены эксперименты по влиянию концентрации наноструктурированных порошков-модификаторов на размеры дендритов и объем капли электродного металла.

Для нахождения оптимальной концентрации наноструктурированных порошков в защитном газе определяли безразмерную функцию  $f$ :

$$f = s_6 e_6 v_6,$$

где  $s_6 = \frac{s_i}{s_c}$  и  $e_6 = \frac{e_i}{e_c}$  – безразмерная толщина и ширина дендрита;  $v_6 = \frac{v_i}{v_c}$  – безразмерный объем капли электродного металла;  $s_i$  и  $e_i$  – действительное значение толщины и ширины дендрита при  $i$ -ом эксперименте;  $e_c$  и  $s_c$  – системное значение толщины и ширины дендрита

(принимая для сварки без наноструктурированных порошков 1,5 и 21 мм соответственно);  $v_i$  – действительный объем капли электродного металла при  $i$ -ом эксперименте;  $v_c$  – системное значение объема капли электродного металла (принимая для сварки без наноструктурированных порошков 3 мм<sup>3</sup>).

Для обеспечения качественного сварного соединения при сварке значения параметров  $s$  и  $e$  должны стремиться к минимуму. Стабильный процесс сварки обуславливается переходом капель электродного металла с торца сварочной проволоки в сварочную ванну, следовательно, значение параметра  $v$  также должно стремиться к минимуму.

Таким образом, оптимальная концентрация наноструктурированных порошков в защитном газе будет при выполнении условия, что безразмерная функция  $f$  имеет минимальное значение (рис. 2):

$$F = s_6 e_6 v_6 \rightarrow \min.$$

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований влияния введенных в сварочную ванну наноструктурированных элементов-модификаторов на микроструктуру наплавленного металла при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов.

В качестве элементов-модификаторов использовали наноструктурированные порошки оксида алюминия, вольфрама и молибдена, изготовленные в Институте физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета. Порошки получены по электровзрывной технологии, разработанной и реализованной в этом институте. Варианты наплавки образцов: 1 – наплавка в среде аргона проволокой сплошного сечения; 2 – наплавка в среде аргона проволокой сплошного сечения с добавлением молибдена в защитный газ; 3 – наплавка в среде аргона проволокой сплошного сечения с добавлением воль-

фрама в защитный газ; 4 – наплавка в среде аргона проволокой сплошного сечения с добавлением оксида алюминия  $Al_2O_3$  в защитный газ. Режимы сварки для всех вариантов одинаковы.

Для исследования микроструктуры были изготовлены поперечные шлифы. Применяли механическую шлифовку, механическую полировку на алмазной пасте АСМ 10/7 НВЛ, химическое травление в концентрированной «царской водке» (75 % HCl + 25 % HNO<sub>3</sub>). Исследования проводили методом оптической металлографии на микроскопе Neophot-21 с записью изображений при помощи цифровой камеры Genius VileCam.

Анализ результатов исследований показал, что наплавленный металл состоит из трех слоев, структура которых существенно различается [18]. Толщина слоев различна при разных вариантах наплавки.

Зона термического влияния во всех образцах четко не выявляется, но имеет одинаковую ширину. На границе сплавления происходит плавный переход от дендритной структуры наплавленного металла к полиэдрической зеренной структуре зоны термического влияния.

Непосредственно примыкающий к свободной поверхности слой можно охарактеризовать как слой с полиэдрической зеренной структурой, наряду с хаотически расположенными (неориентированными) дендритами наблюдаются полиэдрические зерна аустенита. Этот слой слабо выражен в образце 1, его толщина составляет 15 % от общей толщины наплавленного металла.

Наиболее ярко зеренный слой выражен в образцах 2 и 3: хорошо видны зерна полиэдрической морфологии, которые чередуются с островками коротких неориентированных дендритов. Толщина рассматриваемого слоя составляет более 30 % общей толщины наплавленного металла. В образце 4 полиэдрическая зеренная структура также наблюдается достаточно четко. Однако особенностью является то, что в зернах располагаются короткие и сильно разветвленные дендриты. Толщина слоя составляет 20 % от общей толщины.

Основной микроструктурной составляющей слоя являются сравнительно короткие, сильно разветвленные и не имеющие преимущественной ориентации дендриты. Этот слой слабо выражен в образце 1: его толщина составляет 28 % от общей. Такая же толщина такого слоя и в образце 3, но составляет она 26 %. Наиболее ярко слой неориентированных дендритов выражен в образцах 2 и 4. Следует отметить, что в образцах 1 и 3 дендриты образуют практически непрерывную сетку, а в образце 4 наблюдаются островки свободной поверхности, где выделить границы зерен не удастся. Толщина слоя неориентированных дендритов в образце 4 составляет 32 % от общей. Этот слой плавно переходит в слой ориентированных дендритов.

Ориентация длинных осей дендритов в рассматриваемом слое нормальна к границе сплавления: вдоль направления теплового потока в основной металл.

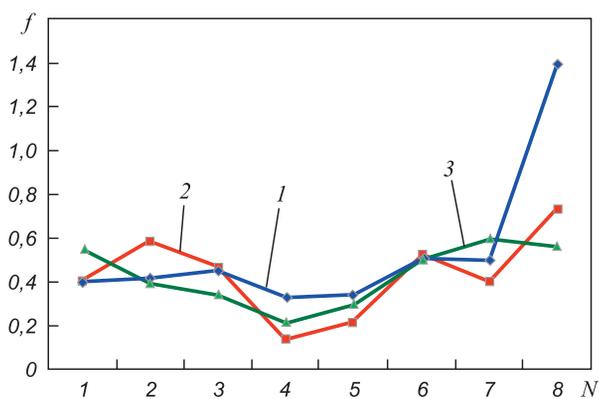


Рис. 2. Определение оптимальной концентрации наноструктурированных порошков-модификаторов вольфрама (1), оксида алюминия (2) и молибдена (3) в защитном газе ( $N$  – номер эксперимента)

Fig. 2. Determination of the optimal concentration of nanostructured powder-modifiers of tungsten (1), aluminum oxide (2) and molybdenum (3) in the shielding gas ( $N$  is the number of the experiment)

Слой ориентированных дендритов в образце 1 составляет 57 %, в образцах 2 и 3 – 43 %, в образце 4 – 45 % от общей толщины. Непосредственно перед границей сплавления строгая ориентация длинных осей дендритов снова нарушается и образуется еще один тонкий слой неориентированных дендритов толщиной около 20 мкм. Наиболее разветвленные дендриты наблюдаются в образце 1. Наиболее слабоветвленные дендриты наблюдаются в образце 4. Разность между дендритами по ширине и толщине составляет до 8 мкм.

Для подтверждения расчетов, описанных выше, в экспериментальных исследованиях использовали наноструктурированный порошок молибдена.

Образцы наплавляли по четырем различным вариантам: наплавка в среде аргона проволокой сплошного сечения с концентрацией порошка молибдена в защитном газе 10, 20, 30 и 40 мг/м сварного шва. Режимы сварки для всех вариантов одинаковы.

Исследование микроструктур проводили по методике, описанной в работах [18 – 20]. Микроструктура всех образцов состоит из разветвленных, не имеющих преимущественной ориентации дендритов. Этот слой слабо выражен в образце 4 (рис. 3, з). Наиболее ярко слой неориентированных дендритов выражен в образце 2 (рис. 3, в).

Наиболее разветвленные дендриты наблюдаются в образце 1 (рис. 3, а). Наиболее слабоветвленные дендриты наблюдаются в образце 2 (рис. 3, б).

**Выводы.** Установлено, что применение наноструктурированных порошков позволяет влиять на состав, свойства и структуру сварных соединений. На основе проведенного многофакторного эксперимента по влиянию различной концентрации наноструктурированных порошков-модификаторов в защитном газе на качество сварных соединений получена оптимальная концентрация  $X_4$ ,  $Y_4$  и  $Z_4$ . Минимальное значение безразмерной функции  $f$  получено при  $N = 4$ . Оптимальная концентрация различных наноструктурированных порошков-модификаторов в защитном газе составила 20 мг/м сварного шва. Микроструктура наплавленного металла изменяется, что доказывает влияние наноструктурированных элементов-модификаторов. В образце при концентрации наноструктурированного порошка молибдена 20 мг/м сварного шва наблюдаются слабоветвленные дендриты. Наиболее равновесная структура по размеру дендрита достигается при концентрации наноструктурированного порошка в защитном газе 20 мг/м сварного шва.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kivinema E.I., Olson D.L., Maltock D.K. Particulate-reinforced metal matrix composite as a weld deposit // *Welding J.* 1995. No. 3. P. 83 – 92.
2. Wu P., Du H.M., Chen X.L. etc. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings // *Wear.* 2004. Vol. 257. No. 1-2. P. 142 – 147.

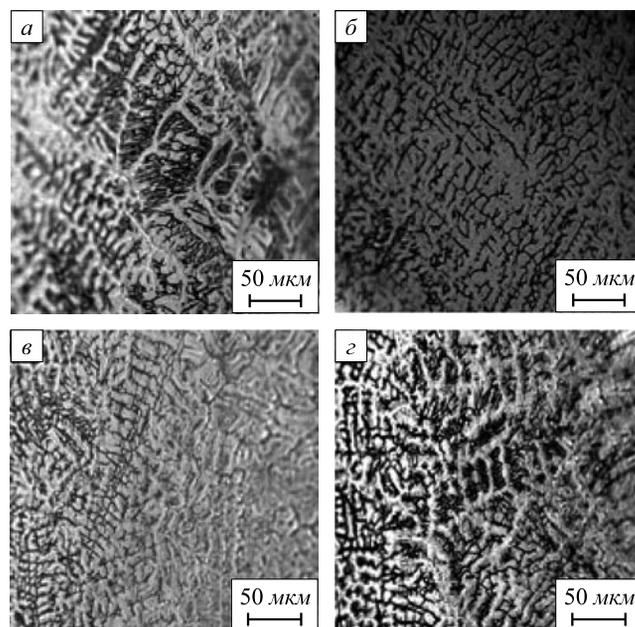


Рис. 3. Микроструктура слоя неориентированных дендритов образцов 1 – 4 (а – з)

Fig. 3. Microstructure of the layer of undirected dendrites in the samples 1 – 4 (a – z)

3. Комшуков В.П., Черепанов А.Н., Протопопов Е.В. и др. Исследование модифицирования металла нанопорошковыми инкуляторами в кристаллизаторе сортовой машины непрерывного литья заготовок. Теоретическое обоснование // *Изв. вуз. Черная металлургия.* 2008. № 8. С. 10 – 12.
4. Протопопов Е.В., Селезнев Ю.А., Черепанов А.Н. и др. Модифицирование металла нанопорошковыми материалами для повышения качества слябовой непрерывнолитой заготовки // *Изв. вуз. Черная металлургия.* 2013. № 12. С. 8 – 11.
5. Shariff S.M., Pal T.K., Padmanabham G., Joshi S.V. Sliding wear behaviour of laser surface modified pearlitic rail steel // *Surf. Eng.* 2010. Vol. 26. P. 199 – 208.
6. Kaysser W. Surface modifications in aerospace applications // *Surf. Eng.* 2001. Vol. 17. P. 305 – 312.
7. Morks M.F., Fahim N.F., Kobayashi A. Microstructure, corrosion behavior, and microhardness of plasma-sprayed WNi composite coatings // *J. Manuf. Process.* 2008. Vol. 10. P. 6 – 11.
8. Vayena O., Doumanidis C., Ranganathan R., Ando T. Welding methods for production of MMC coatings using particulate-cored wire precursors // *J. Manuf. Process.* 2005. Vol. 7. P. 130 – 139.
9. Wu Z.H. Empirical modeling for processing parameters' effects on coating properties in plasma spraying process // *J. Manuf. Process.* 2015. Vol. 19. P. 1 – 13.
10. Tong X., Li F.H., Kuang M. etc. Effects of WC particle size on the wear resistance of laser surface alloyed medium carbon steel // *Appl. Surf. Sci.* 2012. Vol. 258. P. 3214 – 3220.
11. Kou S. *Welding metallurgy.* – New Jersey: John Wiley & Sons. 2003. – 480 p.
12. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S. etc. Modification of weld metal structure by WC nanoparticles // *Metal Science and Heat Treatment.* 2009. No. 6. P. 41 – 47.
13. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. В 7 т. Том 1. Математическое моделирование и информационные технологии, модели сварочной дуги и формирования шва. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2002. – 85 с.
14. Pavlov N.V., Krukov A.V., Zernin E.A. Determinate-statistical model of weld configuration // *Welding and diagnostics.* 2011. No. 6. P. 31 – 35.

15. Статистические методы в инженерных исследованиях / Под ред. Г.К. Круга. – М.: Высшая школа, 1983. – 216 с.
16. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
17. Brunov O.G., Fed'ko V.T., Solodskii S.A. Transfer of electrode metal in welding with the pulsed feed of welding wire // *Welding International*. 2007. Vol. 21. No. 1. P. 50 – 54.
18. Kuznetsov M.A., Zhuravkov S.P., Zernin E.A. etc. Influence of nanostructured powder modifiers on the structure of a welding bead // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 872. P. 118 – 122.
19. Kuznetsov M.A., Barannikova S.A., Zernin E.A. etc. Methods for defining the concentration of nanostructured powders in protective gas and its effect on the microstructure of deposit metal // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 770. P. 28 – 33.
20. Кузнецов М.А., Шляхова Г.В., Лунев А.Г. и др. Влияние на микроструктуру наплавленного металла наноструктурированных порошков  $Al_2O_3$  в защитном газе // *Изв. вуз. Физика*. 2015. Т. 58. № 6-2. С. 163 – 167.

Поступила 9 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 4, pp. 292–297.

## METHOD OF DETERMINING THE OPTIMAL CONCENTRATION OF NANOSTRUCTURED POWDERS IN SHIELDING GAS

S.A. Barannikova<sup>1,2,3</sup>, G.V. Shlyakhova<sup>2</sup>, E.A. Zernin<sup>4</sup>,  
M.A. Kuznetsov<sup>4</sup>

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-292-297

### REFERENCES

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

<sup>4</sup>Yurga Technological Institute of National Research Tomsk Polytechnical University, Yurga, Russia

**Abstract.** The paper presents the theoretical and experimental studies to determine the optimal concentration of nanostructured powders in the shielding gas. The objective of this study is the development of a definition technique for optimal concentration of nanostructured powders in the shielding gas during welding by consumable electrode in the argon medium. Molybdenum nanopowder (NP Mo) was used to confirm the calculations used in the experimental studies. The injection of the powder into the weld bath was carried out through the special device. The surfacing of samples was carried out in a pilot plant, which consisted of a welding head GSP-2 with the developed device, the power supply had rated current of 300 A. For surfacing of steel samples (austenitic steel with chemical composition: C – 0.12 %, Cr – 18 %, Ni – 10 %, Ti – 1 %) the welding wire with diameter of 1.2 mm was used (chemical composition: C – 0.12 %, Cr – 18 %, Ni – 9 %, Ti – 1 %). To ensure the quality of the welded joint during welding, the dimension parameters of dendrites should tend to a minimum. A stable welding process is caused by the transition of electrode metal droplets from the end of the welding wire into the weld bath. Therefore, the volume of the electrode metal droplet should also tend to a minimum. Before the start of the optimization of nanostructured powders concentration in the shielding gas, the effect of welding mode parameters by consumable electrode in the argon medium on the microstructure of the weld metal was established. The results of the investigations have shown that the minimum grain size is observed at a current strength of 240 – 260 A and arc voltage of 28 – 30 V. In these modes, the studies were conducted to select the optimum concentration of nanostructured powders in the shielding gas. It was found that the optimum concentration of nanostructured powders-modifiers in the shielding gas is 20 mg/m of the welded joint. It was established that the use of different concentrations of nanostructured powders in the shielding gas makes it possible to obtain a different microstructure of the weld metal. The most lightly branched dendrites and the equilibrium structure according to the dendrites size are achieved at a concentration of nanostructured powder in the shielding gas of 20 mg/m of the weld. When adding nanostructured powders-modifiers to a liquid weld bath, the mechanical properties of the welded joints increase as compared to the welding process, without the addition of a powder-modifier at +20 °C by 7.5 %, at +500 °C by 6.5 %.

**Keywords:** nanostructured powders, optimal concentration, shielding gas, multifactorial planning, crystallization, weld bath.

1. Kivinema E.I., Olson D.L., Maltock D.K. Particulate-reinforced metal matrix composite as a weld deposit. *Welding J.* 1995, no. 3, pp. 83–92.
2. Wu P., Du H.M., Chen X.L., Li Z.Q., Bai H.L., Jiang E.Y. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings. *Wear*. 2004, vol. 257, no. 1-2, pp. 142–147.
3. Komshukov V.P., Cherepanov A.N., Protopopov E.V., Foigt D.B., Ganzer L.A. Investigation of metal modification by nanopowder inoculators in a mold of a continuous casting machine. Theoretical justification. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 8, pp. 10–12. (In Russ.).
4. Protopopov E.V., Seleznev Yu.A., Cherepanov A.N., Foigt D.V., Aizatulov R.S., Ganzer L.A. Metal modification with nanopowder materials for the quality of slab continuous casting improvement. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 12, pp. 8–11. (In Russ.).
5. Shariff S.M., Pal T.K., Padmanabham G., Joshi S.V. Sliding wear behavior of laser surface modified pearlitic rail steel. *Surf. Eng.* 2010, vol. 26, pp. 199–208.
6. Kaysser W. Surface modifications in aerospace applications. *Surf. Eng.* 2001, vol. 17, pp. 305–312.
7. Morks M.F., Fahim N.F., Kobayashi A. Microstructure, corrosion behavior, and microhardness of plasma-sprayed WNi composite coatings. *J. Manuf. Process*. 2008, vol. 10, pp. 6–11.
8. Vayena O., Doumanidis C., Ranganathan R., Ando T. Welding methods for production of MMC coatings using particulate-cored wire precursors. *J. Manuf. Process*. 2005. vol. 7, pp. 130–139.
9. Wu Z.H. Empirical modeling for processing parameters' effects on coating properties in plasma spraying process. *J. Manuf. Process*. 2015, vol. 19, pp. 1–13.
10. Tong X., Li F.H., Kuang M., Ma W.Y., Chen X.C., Liu M. Effects of WC particle size on the wear resistance of laser surface alloyed medium carbon steel. *Appl. Surf. Sci.* 2012, vol. 258, pp. 3214–3220.
11. Kou S. *Welding metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons. 2003, 480 p.
12. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V., Goremykina S.S., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Tsvetkov Yu.V. Modification of weld metal structure by WC nanoparticles. *Metal Science and Heat Treatment*. 2009, no. 6, pp. 41–47.
13. Berezovskii B.M. *Matematicheskie modeli dugovoi svarki. V 7 t. Tom 1. Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii, modeli svarchoi dugi i formirovaniya shva* [Mathematical models of arc welding. In 7 vols. Vol. 1. Mathematical modeling and information technologies, welding arc models and weld formation]. Chelyabinsk: izd. YuUrGU, 2002, 85 p. (In Russ.).

14. Pavlov N.V., Krukov A.V., Zernin E.A. Determinate-statistical model of weld configuration. *Welding and diagnostics*. 2011, no. 6, pp. 31–35.
15. *Statisticheskie metody v inzhenernykh issledovaniyakh* [Statistical methods in engineering research]. Krug G.K. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 1983, 216 p. (In Russ.).
16. Nalimov V.V., Chernova N.A. *Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov* [Statistical methods for planning the extreme experiments]. Moscow: Nauka, 1965, 340 p. (In Russ.).
17. Brunov O.G., Fed'ko V.T., Solodskii S.A. Transfer of electrode metal in welding with the pulsed feed of welding wire. *Welding International*. 2007, vol. 21, no. 1, pp. 50–54.
18. Kuznetsov M.A., Zhuravkov S.P., Zernin E.A., Kolmogorov D.E., Yarovskiy N.A. Influence of nanostructured powder modifiers on the structure of a welding bead. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 872, pp. 118–122.
19. Kuznetsov M.A., Barannikova S.A., Zernin E.A., Filonov A.V., Kartcev D.S. Methods for defining the concentration of nanostructured powders in protective gas and its effect on the microstructure of deposit metal. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 770, pp. 28–33.
20. Kuznetsov M.A., Shlyakhova G.V., Lunev A.G., Barannikova S.A., Zernin E.A. Effect of nanostructured  $Al_2O_3$  powders in the shielding gas on the microstructure of the weld metal of. *Izv. vuz. Fizika*. 2015, vol. 58, no. 6-2, pp. 163–167. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed within the frame of the Program of Fundamental Research of the Russian State Academies of Sciences for 2017 – 2020.

**Information about the authors:**

**S.A. Barannikova**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Professor of the Chair “Mechanics of Strained Solids and Construction Mechanics” (bsa@ispms.tsc.ru)

**G.V. Shlyakhova**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate (shgv@ispms.tsc.ru)

**E.A. Zernin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Welding Production (yuti\_sp@bk.ru)

**M.A. Kuznetsov**, Senior Lecturer of the Chair of Welding Production (kyznechik\_85@mail.ru)

Received March 9, 2017