

Новые материалы и технологии

УДК 621.791



ЛИННИК
Антон Александрович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
LINNIK
Anton Alexandrovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ПАНКРАТОВ
Александр Сергеевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
PANKRATOV
Alexander Sergeevich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



КОБЕРНИК
Николай Владимирович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
KOBERNIK
Nikolay Vladimirovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)

Влияние наноразмерных порошков карбида вольфрама на структуру и свойства металла шва

А.А. Линник, А.С. Панкратов, Н.В. Коберник

Сварка под флюсом — один из самых производительных процессов соединения металлических конструкций, особенно большой толщины. Однако при сварке с минимальным количеством слоев сварочная ванна характеризуется достаточно большими размерами, что, в свою очередь, снижает ударную вязкость шва. Добиться изменений в этом случае возможно путем добавления модификаторов в металл шва.

Рассмотрено влияние наноразмерных порошков карбида вольфрама на структуру и свойства металла сварного шва, выполненного дуговой сваркой под флюсом. Проведенные экспериментальные исследования показали, что введение в расплав сварочной ванны наноразмерных частиц позволяет увеличить значения ударной вязкости на 21 % при температуре испытаний —20 °С. Установлено, что наноразмерные модификаторы благоприятно влияют на ударную вязкость и структуру шва, выполненного сваркой под флюсом.

Ключевые слова: сварка под флюсом, карбид вольфрама, никель, наноразмерные порошки, наномодификаторы, ударная вязкость.

Effect of Nanoscale Tungsten Carbide Powders on the Structure and Properties of Weld Metal

A.A. Linnik, A.S. Pankratov, N.V. Kobernik

Submerged arc welding is one of the most productive joining processes of metal constructions, especially of great thickness. However, when welding with a minimum of layers the weld pool gets a sufficiently large size that, in turn, reduces the toughness of the weld. To achieve changes in this case is possible by adding modifiers in the weld metal. In the article there was examined the effect of nanoscale tungsten carbide powders on the structure and properties of the weld metal, performed by submerged arc welding. The experimental results showed that the introduction of nanoparticles to the molten weld pool allows increasing

the toughness for 21% at a test temperature of 20 °C. It was defined that nanoscale modifiers have a beneficial effect on toughness and structure of weld metal, performed by submerged arc welding.

Keywords: submerged arc welding, tungsten carbide, nickel, nanoscale powders, nanomodifiers, toughness.

При строительстве опасных производственных объектов (например, магистральных трубопроводов) сварные соединения должны отвечать ряду требований, регламентируемых нормативно-технической документацией (НТД). При этом большое значение имеет соблюдение требований к ударной вязкости сварного шва и околосшовной зоны. Согласно НТД [1–3] на сварку при строительстве и капитальном ремонте магистральных трубопроводов испытанию на ударный изгиб подвергаются сварные соединения труб диаметром свыше 377 мм с толщиной стенки более 10 мм.

Для обеспечения необходимых и стабильных значений ударной вязкости применяют комплексное легирование марганцем, кремнием и никелем. Легирование металла шва никелем можно осуществлять через стержень электрода (проволоку) или через покрытие электрода (при сварке покрытыми электродами). В работе [4] никель вводили в металл шва сварного соединения через покрытие электрода. Авторами этой работы показано, что увеличение содержания никеля в металле шва существенно повышает ударную вязкость. Так, например, увеличение содержания никеля от 0 до 1 мас.% приводит к росту ударной вязкости металла шва почти в 2 раза (при температуре испытаний — 40 °С). Такое влияние никеля на ударную вязкость металла шва обусловлено тем, что никель смещает область γ — α -превращения в сторону более низких температур, способствуя тем самым образованию достаточно мелкодисперсной и однородной структуры нижнего бейнита, который является более прочной структурной составляющей по сравнению с ферритом и перлитом в структуре низкоуглеродистых сталей, с минимальной шириной доэвтектоидной ферритной оторочки [4].

В настоящее время с развитием нанотехнологий появилась возможность модифицирования

метала шва сварного соединения наноразмерными тугоплавкими частицами. Так, например, при ручной дуговой сварке наноразмерные частицы вводят в металл шва с помощью композиционных гранул, предварительно нанесенных на покрытие плавящегося электрода [5]. Композиционные гранулы представляют собой механическую смесь порошка носителя — никель (99,9%) и наноразмерных частиц карбида вольфрама [5]. Модифицирование металла шва наноразмерными частицами способствует диспергированию структуры и увеличению механических свойств. Например, в работах [5, 6] показано, что введение 3 мас.% композиционных гранул, содержащих 30 мас.% наноразмерных частиц карбида вольфрама, в сварной шов увеличивает его ударную вязкость на 20% и 60% при температуре испытаний +20 °С и –60 °С соответственно [5, 6].

При строительстве опасных производственных объектов предпочтение отдают механизированным и автоматическим способам сварки. В этих условиях легирование никелем производят через проволоку, что обеспечивает более высокий коэффициент перехода никеля в сварочную ванну, но существенно увеличивает себестоимость изготовления проволоки. Кроме того, нерешенной остается задача введения наноразмерных модификаторов в сварочную ванну.

Одним из перспективных способов введения наноразмерных модификаторов может стать предварительная засыпка композиционных гранул в зазор между свариваемыми поверхностями, по аналогии с применением порошкообразного присадочного материала (ППМ) при сварке под слоем флюса [7]. Преимуществом такого способа введения модифицирующих компонентов является исключение непосредственного контакта композиционных гранул и высокотемпературной зоны дуги. При этом наноразмерные частицы подвергаются воздействию расплавленного металла сварочной ванны, что защищает их от непосредственного воздействия дугового разряда. Применение предварительной засыпки композиционных гранул в разделку не требует создания специально легированной проволоки, что является экономически целесообразным. Однако

работ в этом направлении до настоящего времени проведено не было.

В данной работе определено влияние наноразмерных модификаторов, введенных предварительной засыпкой композиционных гранул, на структуру и свойства металла шва сварного соединения, полученного методом автоматической дуговой сварки под флюсом.

Методика проведения исследований. Исследования проводили при выполнении сварного соединения пластин из низкоуглеродистой стали СтЗсп по ГОСТ 380—2005, толщиной 10 мм, с V-образной разделкой кромок. Угол разделки кромок составлял $35^\circ_{-5^\circ}$, а притупление кромок — $(1,8 \pm 0,8)$ мм.

Сварку производили на подкладной ленте марки ЛМС по ТУ 6-48-00204961-12—90 за один проход автоматической дуговой сваркой под флюсом двумя проволочными электродами. Параметры режима сварки: первая дуга — постоянный ток обратная полярность, $I_1 = 550$ А, $U_{д1} = 29$ В, угол наклона электрода $\alpha_1 = 90^\circ$; вторая дуга — переменный ток с балансом 75%, $I_2 = 550$ А, $U_{д2} = 29$ В, угол наклона электрода $\alpha_2 = 65^\circ$ (схема углом вперед). Расстояние между электродами составляло 27 мм, а скорость сварки — 26 м/ч.

Указанные параметры режима являются достаточными для формирования сварочной ванны большого размера (площадь поперечного сечения 128 мм^2), что является дополнительным фактором, уменьшающим ударную вязкость металла шва сварного соединения [8].

В качестве присадочных материалов применяли проволоку сварочную сплошного сечения марки L60 (0,05...0,15 % С, 0,8...1,25 % Мn, 0,1...0,35 % Si), диаметром 4 мм и флюс марки 761 (производства Lincoln Electric).

Перед проведением процесса сварки композиционные гранулы равномерно наносили в зону сварки на всей длине шва.

Композиционные гранулы были предоставлены Лабораторией плазменных процессов в металлургии и обработке металлов (№ 16) ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. Для оценки влияния модифицирующих компонентов на структуру и свойства металла шва сварного соединения дополнительно проводили сварку со-

единений без засыпки композиционных гранул, а также с засыпкой порошка никеля.

Структуру наплавленных покрытий исследовали на оптическом микроскопе Leica DMILM с использованием программы Qwin для анализа изображений, а также на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 3D FEG, оснащенный приставкой для микрорентгеноспектрального анализа.

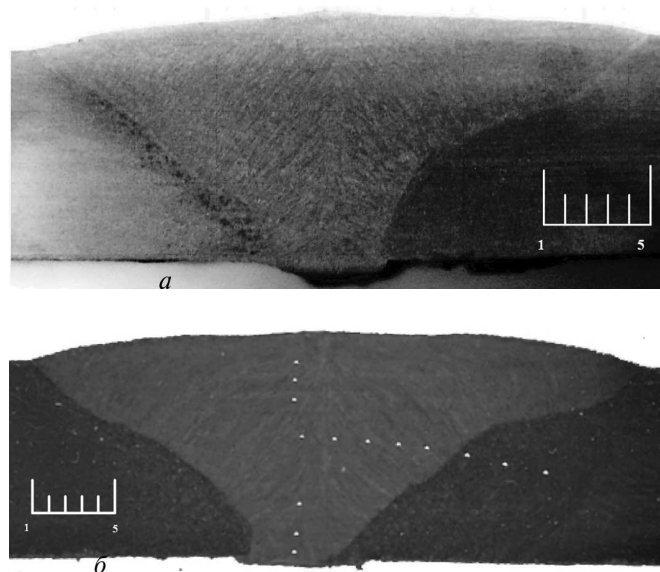


Рис. 1. Макроструктура шва, выполненного двухдуговой сваркой под флюсом, без предварительной засыпки порошков (а) и с предварительной засыпкой порошков (б)

После сварки проводили измерения твердости по Виккерсу (5НV) сварного шва и околошовной зоны на универсальном приборе Wilson Wolpert 930 N вдавливанием индентора при нагрузке 50 Н.

Ударную вязкость металла шва сварных соединений определяли испытаниями по методу Шарпи (KCV) на образцах типа Х (ГОСТ 6996—66) при температуре -20°C .

Результаты и анализ проведенных исследований. На выбранных режимах с использованием подкладных лент удалось получить сварные соединения с удовлетворительным формированием лицевой и обратной сторон. На рисунке 1 представлена макроструктура полученных соединений, площадь сварного шва составила 185 мм^2 .

В общем случае при автоматической дуговой сварке под флюсом низкоуглеродистых сталей с применением низколегированной присадоч-

ной проволоки микроструктуру металла шва характеризуют как состоящую из лучистых кристаллов бейнита, окруженных полосами феррита и перлита [9]. Структура металла шва имеет строгую столбчатую направленность кристаллов, характерную для сварного шва (рис. 2). В ней присутствуют бейнитная, ферритная и перлитная составляющие. Кристаллы бейнита, декорированные ферритно-перлитной смесью, при отсутствии модификаторов имеют средний размер 400...600 мкм (рис. 2, а). Феррит состоит из полиэдрических зерен средним размером 80...100 мкм.

Предварительное введение композиционных гранул в зону сварки не вносит существенных изменений в набор морфологических форм структурно-фазовых составляющих металла шва. Однако, вследствие уменьшения размера кристаллов бейнита и ферритных зерен до 200...300 мкм и 50...70 мкм соответственно, структура становится более равномерной (рис. 2, б).

Твердость металла шва после введения в расплав сварочной ванны композиционных гра-

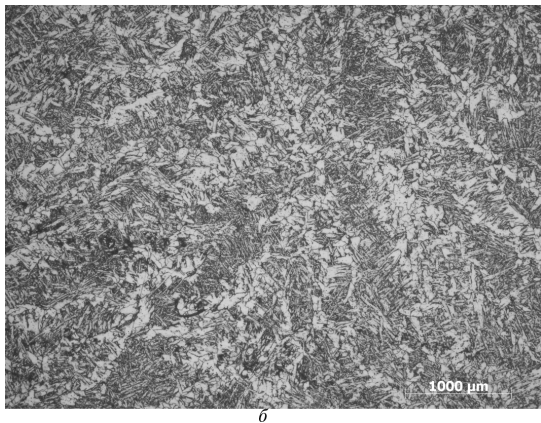
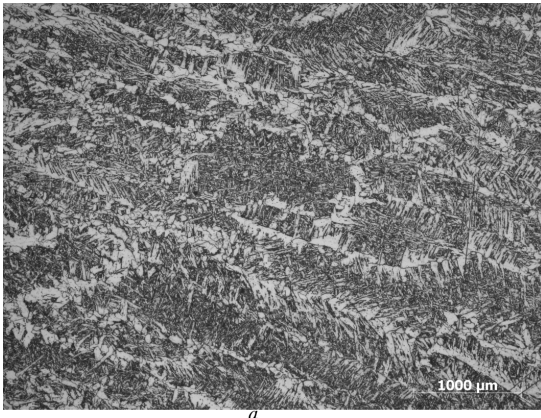


Рис. 2. Микроструктура металла шва без модификаторов (а) и с введением композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы (б)

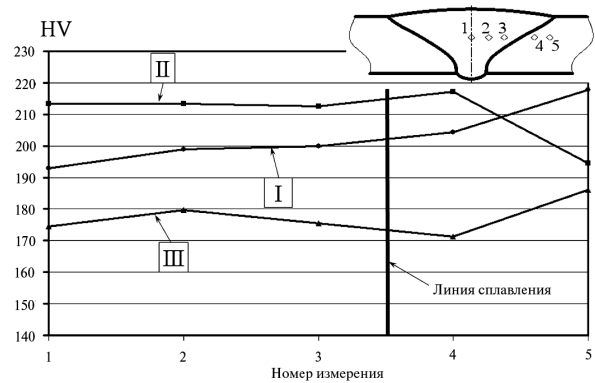


Рис. 3. Твердость металла шва:

I — без модификаторов; II — с введением порошка Ni; III — с введением композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы

нул уменьшается в среднем на 26 HV или на 13% по сравнению с вариантом без применения гранул (рис. 3). Это может свидетельствовать о некотором повышении пластичности металла шва [10]. Следует отметить, что введение, в том же количестве порошка никеля, привело к незначительному (до 7%) увеличению твердости металла шва.

Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы, способствует увеличению ударной вязкости металла шва на 21% при температуре испытания -20°C (рис. 4). В то время как металл шва сварных соединений, модифицированных порошком никеля, характеризуется снижением ударной вязкости на 58%.

Поверхности разрушения после испытаний на ударную вязкость показаны на рис. 5. Наличие фасеток квазискола, размеры которых сопоставимы с размерами кристаллов бейнита,

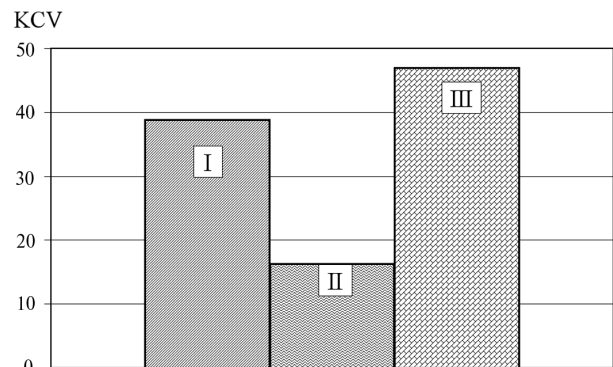


Рис. 4. Ударная вязкость (KCV) металла шва:

I — без засыпки порошков; II — с введением порошка Ni; III — с введением композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы

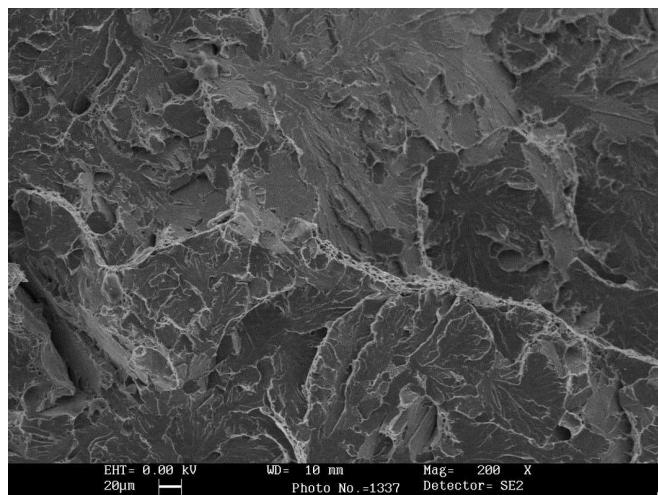
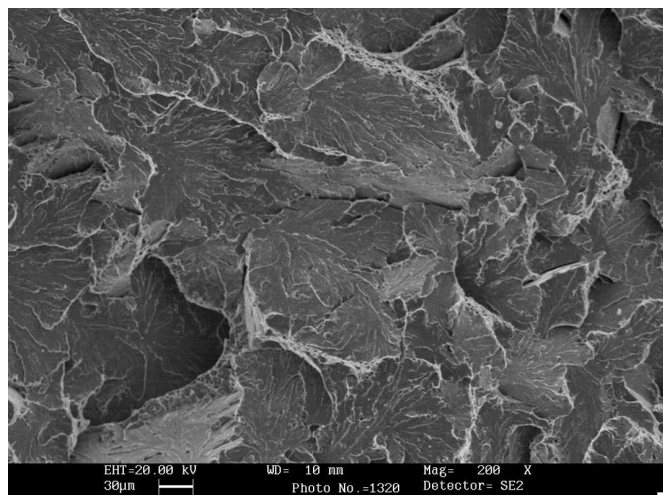


Рис. 5. Поверхности разрушения после испытаний на ударный изгиб:

а — с введением никелевого порошка; б — с введением композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы

свидетельствует о преобладании хрупкой составляющей в механизме разрушения.

Полученные результаты оценки механических свойств (ударной вязкости и твердости) металла шва сварного соединения, модифицированного порошком никеля, существенно отличаются от существующих представлений влияния этого легирующего элемента на свойства сталей [4]. Поэтому был проведен химический анализ применяемого порошка, показавший присутствие в его составе до 1,5 мас.% В и до 2,0 мас.% Si. Как известно, данные легирующие элементы также оказывают негативное влияние на пластические свойства сталей. Бор не влияет на длительность инкубационного периода распада аустенита, но существенно замедляет ферритообразование [11].

Выводы

1. Предварительное введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы карбида вольфрама, в зону сварки не вносит существенных изменений в набор морфологических форм структурно-фазовых составляющих металла шва. Однако, вследствие уменьшения размера кристаллов бейнита и ферритных зерен в 1,5—2 раза, она становится более равномерной.

2. Введение композиционных гранул, содержащих наноразмерные частицы, способствует увеличению ударной вязкости металла шва на 21% при температуре испытания -20°C .

Литература

1. РД-25.160.00-КТН-011—10. Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов. М.: Транснефть, 2010.
2. ВСН 006—89. Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка. М.: Миннефтегазстрой, 1989.
3. СТО Газпром 2-2.2—136—2007. Инструкция по технологиям сварки при строительстве и ремонте промышленных и магистральных газопроводов. М.: Газпром, 2007.
4. Походня И.К., Макаренко В.Д., Карсун А.О., Милеченко С.С. Влияние никеля на структуру и механические свойства шва, выполненного электродами с основным покрытием // Автоматическая сварка. 1986. № 2. С. 1—5.
5. Влияние нанодисперсных карбидов WC и никеля на структуру и свойства наплавленного металла / Г.Н. Соколов, А.С. Трошков, В.И. Лысак и др. // Сварка и Диагностика. 2011. № 3. С. 36—38.
6. Модифицирование структуры наплавленного металла нанодисперсными карбидами вольфрама / Г.Н. Соколов, А.С. Трошков, В.И. Лысак и др. // Физика и химия обработки материалов. 2009. № 6. С. 41—47.
7. Ивочкин И.И., Малышев Б.Д. Сварка под флюсом с дополнительной присадкой. М.: Стройиздат, 1981. 175 с.
8. Коберник Н.В., Чернышов Г.Г., Гвоздев П.П., Линник А.А. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом // Сварка и Диагностика. 2011. № 5. С. 24—27.
9. Хорн Ф. Атлас структур сварных соединений: Пер. с нем. М.: Металлургия, 1977. 288 с.
10. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: МИСИС, 1998. 400 с.
11. Гуляев А.П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

References

1. RD-25.160.00-KTN-011-10. Svarka pri stroitel'stve i remonte magistral'nykh nefteprovodov [RD-25.160.00-KTN-011-10. Welding of the construction and repair of main pipelines]. Moscow, «Transneft» publ., 2010.
2. VSN 006-89. Stroitel'stvo magistral'nykh i promyslovykh truboprovodov. Svarka [Construction of main and field pipelines. Welding]. Moscow, Minneftegazstroi, 1989.

3. *STO Gazprom 2-2.2-136-2007. Instruksiia po tekhnologiiam svarki pri stroitel'stve i remonte promyslovykh i magistral'nykh gazoprovodov* [STO Gazprom 2-2.2-136-2007. Instructions for welding technologies in the construction and repair of commercial and gas pipelines]. Moscow, Gazprom publ., 2007.

4. Pokhodnia I.K., Makarenko V.D., Karsun A.O., Milechenko S.S. Vliianie nikelia na strukturu i mekhanicheskie svoistva shva, vypolnennogo elektrodami s osnovnym pokrytiem [Effect of nickel on the structure and mechanical properties of the weld made basic coated electrode]. *Avtomaticheskaiia svarka* [The Paton Welding Journal]. 1986, no. 2, pp. 1–5.

5. Sokolov G. N., Troshkov A. S., Lysak V. I., Samokhin A. V., Blagoveshchenskii Iu. V., Alekseev N. V., Tsvetkov Iu. V. Vliianie nanodispersnykh karbidov WC i nikelia na strukturu i svoistva naplavlennogo metalla [Influence of nanodisperse tungsten and nickel carbide on structure and properties of weld metal]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2011, no. 3, pp. 36–38.

6. Sokolov G.N., Lysak I.V., Troshkov A.S., Zorin I.V., Goremykina S.S., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Tsvetkov Iu.V. Modifitsirovanie struktury naplavlennogo metalla nanodispersnyimi karbidami vol'frama [The modification of the structure of weld metal with tungsten carbide nanodispersed]. *Fizika i khimiia*

obrabotki materialov [Physics and Chemistry of Materials Treatment] 2009, no. 6, pp. 41–47.

7. Ivochkin I.I., Malyshev B.D. *Svarka pod flusom s dopolnitel'noi prisadkoi* [Submerged arc welding with an additional additive]. Moscow, Stroiizdat publ., 1981. 175 p.

8. Kobernik N.V., Chernyshov G.G., Gvozdev P.P., Linnik A.A. Vliianie roda i poliarnosti toka na plavlenie elektrodno go i osnovnogo metalla pri svarke pod flusom [Influence of current type and polarity on electrode and base metal during the hidden-arc welding]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2011, no. 5, pp. 24–27.

9. Khorn F. *Atlas struktur svarynykh soedinenii* [Atlas structures of welded joints]. Moscow, Metallurgiiia publ., 1977. 288 p.

10. Zolotorevskii V.S. *Mekhanicheskie svoistva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, MISIS publ., 1998. 400 p.

11. Guliaev A.P. *Metallovedenie* [Metal Science]. Moscow, Metallurgiiia publ., 1986. 544 p.

Статья поступила в редакцию 02.04.2013

Информация об авторах

ЛИННИК Антон Александрович (Москва) — инженер кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: lurc@list.ru).

ПАНКРАТОВ Александр Сергеевич (Москва) — аспирант кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sapsa89@gmail.com).

КОБЕРНИК Николай Владимирович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии сварки и диагностики». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: koberniknv@yandex.ru).

Information about the authors

LINNIK Anton Alexandrovich (Moscow) — Engineer of «Welding and diagnostics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: lurc@list.ru).

PANKRATOV Alexander Sergeevich (Moscow) — Post-Graduate of «Welding and diagnostics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: sapsa89@gmail.com).

KOBERNIK Nikolay Vladimirovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Welding and diagnostics» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: koberniknv@yandex.ru).