

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.05

УДК 621.791.725.051.4:669.14.08.262

**А.И. Лазарева, Н.В. Копцева, Д.А. Горленко, Ю.Ю. Ефимова,
О.А. Никитенко, Э.М. Голубчик**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
Магнитогорск, Россия

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ АГРЕГАТОВ ВТОРОЙ ОЧЕРЕДИ
ЛИСТОПРОКАТНОГО ЦЕХА № 11 ОАО «МАГНИТОГОРСКИЙ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»**

На одном из ведущих предприятий металлургической отрасли России ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО ММК) в последние годы освоена новейшая технология производства современных и перспективных видов холоднокатаной продукции. В листопрокатном цехе № 11 (ЛПЦ-11) ОАО ММК в головных частях агрегатов второй очереди проводят укрупнение рулонов методом лазерной сварки для производства продукции для автомобильной и строительной отраслей промышленности, а также для изготовления товаров широкого потребления. В статье рассмотрено влияние мощности предварительного и окончательного нагрева на микроструктуру и твердость сварных соединений при укрупнении холоднокатаных рулонов полосы из стали марки 10пс методом лазерной сварки на стыкосварочных машинах фирмы Miebach в условиях агрегатов второй очереди ЛПЦ-11. Описаны особенности проведения предварительного и окончательного нагревов на стыкосварочных машинах фирмы Miebach. Дается описание методик исследований сварных соединений, выполненных методом лазерной сварки, проводимых в рамках данной работы. Представлены опытные режимы для сварки концов холоднокатаных полос. Проанализированы результаты металлографических исследований зоны сварного шва в металлпрокате из низкоуглеродистой марки стали. На основе сравнения экспериментальных данных выявлены закономерности изменения длин структурных зон сварных соединений в зависимости от проводимой термической обработки. Установлено, что при увеличении мощности предварительного или окончательного нагрева происходит увеличение длины зоны разупрочнения.

При этом при увеличении мощности окончательного нагрева свыше 4,5 кВт резко увеличивается длина зоны рекристаллизации и протяженность зоны разупрочнения, что приводит к ухудшению качества сварного соединения.

Ключевые слова: низкоуглеродистая сталь, холоднокатаная полоса, совмещенные технологические агрегаты, лазерная сварка, мощность предварительного нагрева, мощность окончательного нагрева, мощность лазера, микроструктура, микротвердость, разупрочнение сварного соединения.

**A.I. Lazareva, N.V. Kopceva, D.A. Gorlenko, J.J. Efimova,
O.A. Nikitenko, E.M. Golubchik**

Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russian Federation

**THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON QUALITY
OF WELDED JOINTS IN THE SECOND STAGE
OF UNITS IN THE ROLLING SHOP NO. 11
OJSC "MAGNITOGORSK IRON AND STEEL WORKS"**

In recent years on the OJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" the leading enterprises of the Russia metallurgical industry the latest technology of production of modern and advanced types of cold-rolled products has been mastered. In rolling shop No. 11 in the head of the units of the second stage the consolidation of the rolls by laser welding method are carried out for the production of products for the automotive and construction industries, as well as for the production of consumer goods. The influence of the power of preheating and the final heating on microstructure and microhardness of welded joints at the integration of cold rolled products grade 10nc obtained by laser welding on Miebach laser machines in an environment of continuous process units in the new cold rolling complex are investigated. The description of the preheating and final heating are given. The features of these operations on the Miebach company welding machines are described. The description of research methods of welded joints made by laser welding are carried out in the framework of this work. Presented experimental welding modes for the welding of the cold-rolled stripes ends. The metallographic analysis results of the welded zone in the rolled low-carbon steel grade are shown. Based on a comparison of the experimental data revealed patterns of change in length of the welded joints structural zones according to the conducted heat treatment. Established that with increasing power of preheating and final heating the length of softening zone increases. Moreover by increasing the final heating power above 4,5 kW abruptly increases the recrystallization zone length and the length of softening zone, which leads to deterioration of the welded joints.

Keywords: low carbon steel, cold-rolled strip, combined technological units, laser welding, preheating power, laser power final heating, laser power, microstructure, microhardness, softening of welded joint.

В настоящее время в мировой практике прокатного производства существует устойчивая тенденция совмещения технологических агрегатов в единую линию в цехах холодной прокатки и нанесения покрытий [1]. На одном из ведущих предприятий металлургической отрасли России ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в листопркатном цехе № 11 в 2012 г. была запущена вторая очередь, включающая агрегат непрерывного отжига, совмещенный с агрегатом непрерывного горячего цинкования (АНО/АГЦ), новый агрегат непрерывного горячего цинкования холоднокатаных полос (АНГЦ-3) и линию инспекции (АИ). Особенностью технологий, осваиваемых в этом комплексе холодной прокатки, явилось применение в головных

частях всех линий укрупнения рулонов методом лазерной сварки на сварочных машинах лазерного типа CSLH19 фирмы Miebach [2–4]. Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, значительно превосходящую концентрацию других источников энергии, используемых для сварки [5–10]. Такой вид технологической операции впервые применен на отечественном прокатном производстве [11].

Огромное влияние на устойчивость технологического процесса в этом случае будет оказывать качество сварного соединения. Если сваренную полосу с некачественным сварным соединением отправить в линию агрегата, может произойти обрыв в зоне сварного шва и полная остановка линии до тех пор, пока полоса не будет извлечена [12]. В связи с этим необходима такая технология лазерной сварки, которая обеспечивала бы в достаточно широком диапазоне режимов гарантированно стабильное качество сварного соединения [13, 14].

На качество сварных швов при лазерной сварке большое влияние оказывает термическая обработка, а именно – предварительный и окончательный нагревы. Операция предварительного нагрева заключается в повышении температуры основного металла непосредственно перед лазерной сваркой. Окончательный нагрев сварного соединения полосы проводится сразу после завершения процесса лазерной сварки. При этом особенностью индукционных нагревателей машин лазерного типа фирмы Miebach является возможность повышения температуры свариваемого металла только в зоне проведения сварочного процесса по мере передвижения сварочной тележки.

Предварительный нагрев сварных соединений проводится для уменьшения скорости теплоотвода при лазерной сварке в область основного металла, что позволяет повысить пластические свойства сварного соединения. Окончательный нагрев проводится с целью снизить скорость охлаждения сварного соединения, для уменьшения остаточных напряжений в зоне термического влияния (ЗТВ), которые также являются одной из основных причин обрывов сваренных полос в линиях агрегатов.

Целью данной работы явилось исследование кристаллических зон и распределения микротвердости в сварных соединениях, полученных при различных мощностях предварительного и окончательного нагрева при лазерной сварке полос из низкоуглеродистой марки стали 10пс в условиях агрегатов второй очереди ЛПЦ-11 в ОАО ММК.

Работа выполнялась в условиях НИИ наносталей МГТУ им. Г.И. Носова на образцах сварных соединений полос из стали марки 10пс толщиной от 0,4 до 0,99 мм, прошедших обработку на стыкосварочных машинах лазерного типа CSLH19 фирмы Miebach.

Комплекс металлографических исследований был проведен с использованием светового микроскопа Meiji Techno при увеличении от 50 до 1000 крат с помощью программного обеспечения и алгоритмов обработки металлографических изображений «Thixomet PRO. Стандартные методы оценки структуры стали и сплавов». При этом использовались возможности этого программного продукта строить панорамные изображения, которые позволяют увидеть всю площадь сварного соединения в целом [15].

Испытания микротвердости осуществляли на твердомере Buehler Micromet методом вдавливания алмазной пирамиды с углом между противоположными гранями 136° в соответствии с ГОСТ 9450–76. Микротвердость измерялась в поперечном сечении нетравленных шлифов в направлении от оси сварного шва к основному металлу в трех зонах по толщине листа: на периферии вблизи каждой из поверхности листа со стороны широкой части шва (ряд 1) и со стороны узкой части шва (ряд 3), а также по центральной линии сечения (ряд 2), как показано на рис. 1. Замеры твердости выполнялись до тех пор, пока значения измеренных величин не достигали значений твердости свариваемого металла.

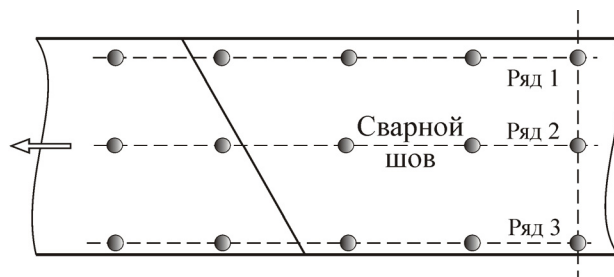


Рис. 1. Схема расположения точек измерения микротвердости

Типичную микроструктуру сварного шва и ЗТВ после осуществления лазерной сварки полосы из стали 10пс иллюстрирует рис. 2. Были выявлены следующие структурные зоны: зона кристаллизации сварного шва, зона перегрева, зона нормализации, зона рекристаллизации и зона основного металла (рис. 3).

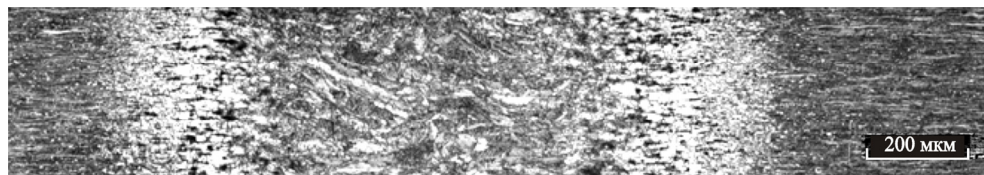


Рис. 2. Типичная микроструктура сварного шва и ЗТВ после осуществления лазерной сварки полосы из стали 10пс

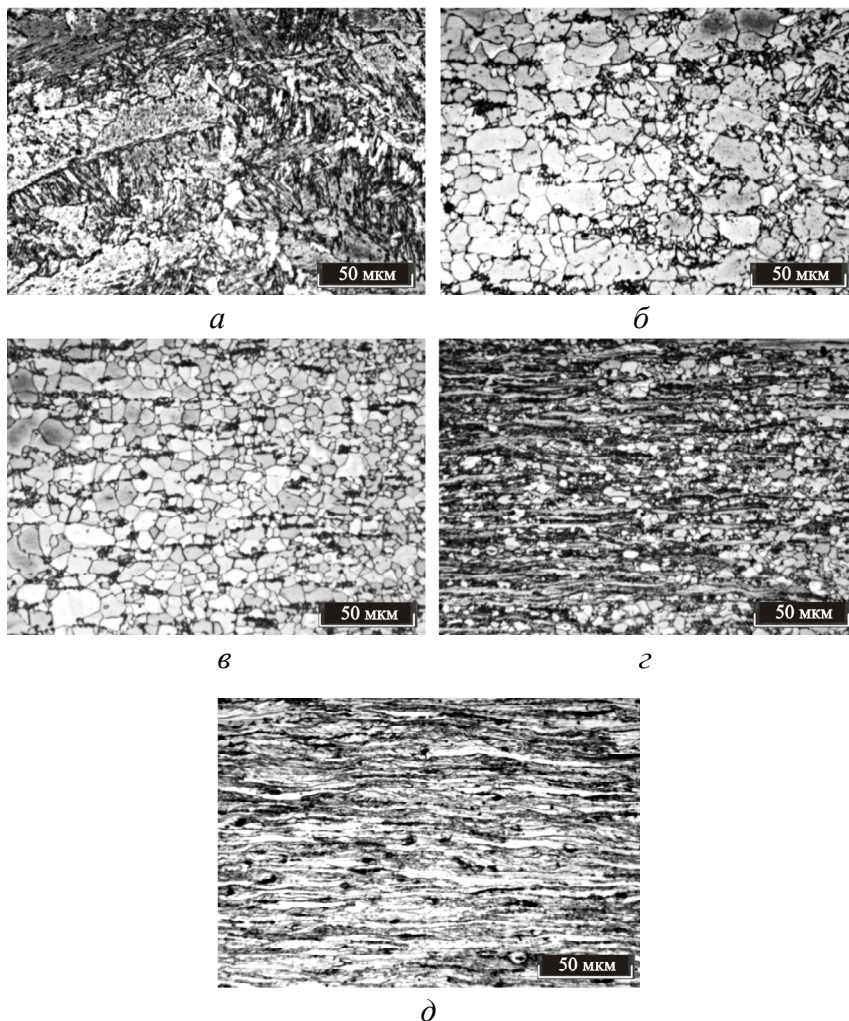


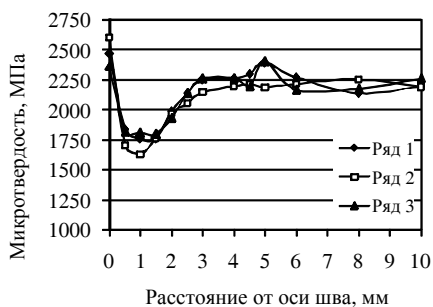
Рис. 3. Микроструктура кристаллических зон по средней линии сварного соединения, полученной лазерной сваркой полосы из стали 10пс: *а* – зона кристаллизации сварного шва; *б* – зона перегрева; *в* – зона нормализации; *г* – зона рекристаллизации; *д* – зона основного металла

Влияние мощности предварительного нагрева на формирование сварного соединения при реализации опытных режимов лазерной сварки продемонстрировано в табл. 1. При этом остальные параметры сварки были выбраны приблизительно одинаковыми. Распределение микротвердости по толщине сварных соединений представлено на рис. 4.

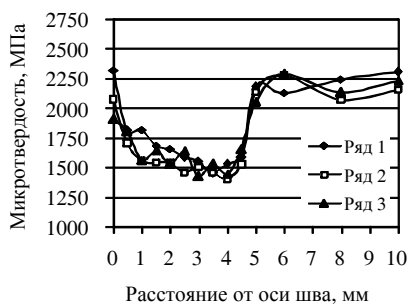
Таблица 1

Влияние параметров предварительного нагрева на характеристики твердости

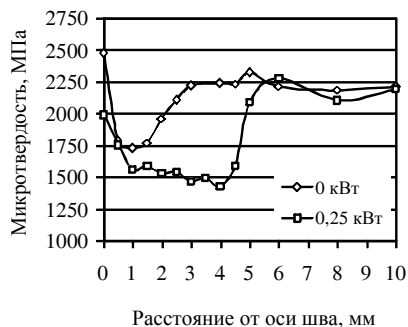
Марка стали	Толщина, мм	Скорость, м/мин	Мощность лазера, кВт	Заглубление фокальной плоскости, мм	Нагрев, кВт		Микротвердость, МПа	
					Предварительный	Окончательный	Макс. твердость шва	Твердость основного металла
10пс	0,45	6	2,3	6	0	5,3	2598	2211
	0,45	5	2,1	6	0,25	5,5	2317	2169



а



б



в

Рис. 4. Распределение микротвердости в различных зонах по толщине лазерного сварного соединения полосы из стали марки 10пс при мощности предварительного нагрева 0 (а), 0,25 кВт (б) и средние значения микротвердости (в)

Результаты исследований показали, что характер изменения микротвердости по мере удаления от оси сварного шва соответствует расположению структурных зон и их протяженности, причем распределение микротвердости по толщине листа (т.е. в рядах 1, 2 и 3) во всех случаях было практически одинаковым (рис. 4, а, б).

Средние значения микротвердости стали марки 10пс при мощности предварительного нагрева 0 и 0,25 кВт сопоставлены на рис. 4, в. При меньшей мощности предварительного нагрева наблюдается более равномерное распределение микротвердости в зоне кристаллизации шва и в ЗТВ.

По мере увеличения мощности предварительного нагрева происходит резкое увеличение длины зоны разупрочнения: при отсутствии предварительного нагрева длина зоны разупрочнения сварного соединения составляла 3 мм, а при увеличении мощности до 0,25 кВт она возросла до 5,5 мм. При этом происходит снижение уровня микротвердости как в зоне кристаллизации сварного соединения, так и в ЗТВ.

Влияние окончательного нагрева при лазерной сварке нагартованного металлопроката в условиях агрегата АНО/АГЦ проиллюстрировано в табл. 2.

Таблица 2

Влияние параметров окончательного нагрева
на характеристики твердости

Марка стали	Толщина, мм	Скорость, м/с	Мощность лазера, кВт	Заглубление фокальной плоскости, мм	Нагрев, кВт		Микротвердость, МПа	
					Предварительный	Окончательный	Макс. твердость шва	Твердость основного металла
10пс	0,45	6,6	2,5	6	0	0	2538	2292
	0,45	6	2,1	6	0	4	2394	1729
	0,45	6	2,1	6	0	4,5	2664	1757
	0,45	6	2,3	6	0	5,5	2441	1393

Значения мощности предварительного нагрева стали марки 10пс были выбраны равными нулю, а мощность окончательного нагрева составила от 0 до 5,5 кВт. Характер изменения микротвердости по мере удаления от оси сварного шва (рис. 5) соответствует расположению структурных зон и их протяженности. Как показал комплекс металлографических исследований, протяженность кристаллических зон, определенная по средней линии сварных соединений, оказалась различной при различных мощностях окончательного нагрева лазера (рис. 6).

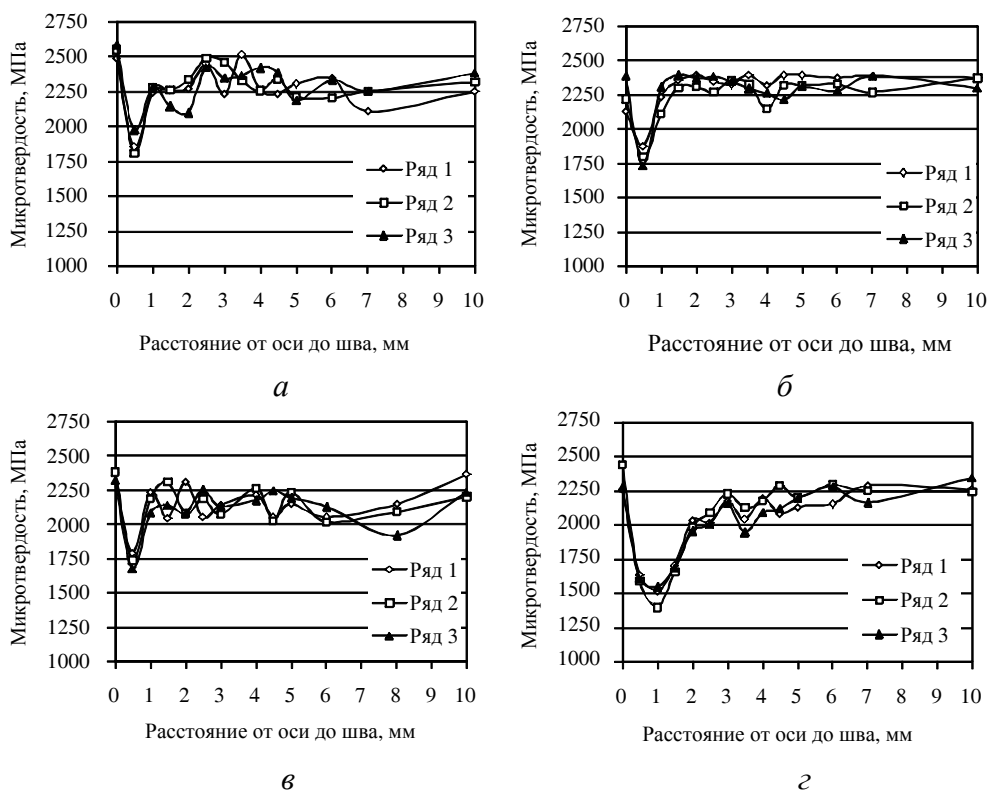


Рис. 5. Распределение микротвердости в различных зонах по толщине лазерного сварного соединения полосы из стали 10пс при мощности окончательного нагрева 0 (а); 4 (б); 4,5 (в); 5,5 (г)

При увеличении мощности окончательного нагрева наибольшее изменение претерпевает зона рекристаллизации, от которой в первую очередь зависит величина зоны разупрочнения сварного соединения. Исследования показали, что при увеличении мощности окончательного

нагрева длина зоны разупрочнения изменилась от 0,56 до 3,1 мм. При этом при увеличении мощности окончательного нагрева до значений выше 4,5 кВт происходит резкое увеличение длины зоны рекристаллизации и зоны разупрочнения. Это ухудшает качество сварного соединения, о чем свидетельствует появление трещины в зоне разупрочнения при специальных испытаниях на выдавливание сферической лунки в сварном шве и околошовной зоне.



Рис. 6. Влияние мощности окончательного нагрева на протяженность структурных зон сварного соединения: —◆— кристаллизации шва; —■— перегрева; —▲— нормализации; —×— рекристаллизации; —□— разупрочнения

Таким образом, при увеличении мощности предварительного и окончательного нагрева происходит увеличение длины зоны разупрочнения. При этом при увеличении мощности окончательного нагрева свыше 4,5 кВт резко увеличивается длина зоны рекристаллизации и протяженность зоны разупрочнения, что приводит к ухудшению качества сварного соединения.

Работа проведена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (№ 11.1525.2014К от 18.07.2014 г.), базовой части государственного задания в сфере научной деятельности «Обеспечение проведения научных исследований».

Список литературы

1. Development of high power pipe welding process / M. Ono, T. Shinozaki, Y. Shinbo, Y. Sekine, K. Iwasaki, M. Takahashi // *Quarterly J. Japan Welding Society*. – 2001. – № 19. – P. 233–240.

2. Влияние отжига на формирование микроструктуры и свойств сварных соединений, полученных при лазерной сварке полос из низкоуглеродистых сталей / Э.М. Голубчик, Н.В. Копцева, А.И. Мешкова, Ю.Ю. Ефимова // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2013. – № 2(42). – С. 56–59.

3. Исследование режимов лазерной сварки на формирование микроструктуры и свойств сварного соединения листовой стали 08пс и 10пс в условиях комплекса холодной прокатки ОАО «ММК» / Э.М. Голубчик, Н.В. Копцева, А.И. Мешкова, Ю.Ю. Ефимова, О.А. Никитенко // *Прокатное производство*. – 2013. – № 7. – С. 13–17.

4. Влияние пространственно-энергетических параметров лазерной сварки на структуру и микротвердость сварного соединения полосы из стали 10пс / А.И. Лазарева, Н.В. Копцева, Ю.Ю. Ефимова, О.А. Никитенко, Э.М. Голубчик // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 13–17.

5. Advanced joining techniques in European shipbuilding / F. Roland, L. Manzon, P. Kujala, M. Brede, J. Weitzenbock // *J. Ship Production*. – 2004. – № 20. – P. 200–210.

6. Minamida K. High power laser applications in Nippon Steel Corporation // *Proc. SPIE*. – 2002. – Vol. 4831. – P. 402–410.

7. Development of high power welding process for pipe / T. Hayashi, Y. Inaba, Y. Matuhito, T. Yamada, T. Kudo // *Proc. ICALEO*. – 1996. – P. 132–140.

8. Katayama S. New development in laser welding in new developments in advanced welding. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2005. – P. 158–197.

9. Игнатов А. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами. Ч. 1 // *Фотоника*. – 2008. – № 6. – С. 10–17.

10. Katayama S. Understanding and improving process control in pulsed and continuous wave laser welding, in advances in laser materials processing. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2010. – P. 181–210.

11. Освоение технологий производства проката в новом комплексе холодной прокатки / Б.А. Дубровский, П.В. Шиляев, С.А. Ласьков,

А.В. Горбунов, С.А. Лукьянов, Э.М. Голубчик // *Сталь*. – 2012. – № 2. – С. 63–65.

12. Improving laser welding efficiency / N. Longfield, T. Leishout, Im. de Wit, T. Van Der Veldt, W. Stam // *Welding Journal*. – 2007. – Vol. 86, iss. 5. – P. 52.

13. Игнатов А., Криворотов В., Миргородский В. Лазерные сварные соединения из коррозионно-стойких сталей // *Фотоника*. – 2010. – № 2. – С. 18–21.

14. Лукашенко А.Г., Мельниченко Т.В., Лукашенко Д.А. Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали модулированным излучением // *Автоматическая сварка*. – 2012. – № 4. – С. 19–23.

15. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 54, № 7–8. – P. 387–392.

References

1. Ono M., Shinozaki T., Shinbo Y., Sekine Y., Iwasaki K., Takahashi M. Development of high power pipe welding process. *Quarterly J. Japan Welding Society*, 2001, no. 19, pp. 233-240.

2. Golubchik E.M., Koptseva N.V., Meshkova A.I., Efimova Iu.Iu. Vliianie otzhiga na formirovanie mikrostruktury i svoistv svarnykh soedinenii, poluchennykh pri lazernoi svarke polos iz nizkouglerodistykh stalei [Influence of annealing on formation of a microstructure and properties of the welded connections received at laser welding of strips from low-carbon by staly]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova*, 2013, no. 2(42), pp. 56-59.

3. Golubchik E.M., Koptseva N.V., Meshkova A.I., Efimova Iu.Iu., Nikitenko O.A. Issledovanie rezhimov lazernoi svarki na formirovanie mikrostruktury i svoistv svarnogo soedineniia listovoi stali 08ps i 10ps v usloviakh kompleksa kholodnoi prokatki OAO «ММК» [A research of the modes of laser welding on formation of a microstructure and properties of welded compound of sheet steel 08ps and 10ps in the conditions of a complex of cold rolling]. *Prokatnoe proizvodstvo*, 2013, no. 7, pp. 13-17.

4. Lazareva A.I., Koptseva N.V., Efimova Iu.Iu., Nikitenko O.A., Golubchik E.M. Vliianie prostranstvenno-energeticheskikh parametrov

lazernoi svarki na strukturu i mikrotverdost' svarnogo soedineniia polosy iz stali 10ps [Influence of spatial and power parameters of laser welding on structure and microfirmness of welded connection of a strip from steel 10ps]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2016, no. 3, pp. 13-17.

5. Roland F., Manzon L., Kujala P., Brede M., Weitzenbock J. Advanced joining techniques in European shipbuilding. *Journal Ship Production*, 2004, no. 20, pp. 200-210.

6. Minamida K. High power laser applications in Nippon Steel Corporation. *Proceedings SPIE*, 2002, vol. 4831, pp. 402-410.

7. Hayashi T., Inaba Y., Matuhito Y., Yamada T., Kudo T. Development of high power welding process for pipe. *Proceedings ICALEO*, 1996, pp. 132-140.

8. Katayama S. New development in laser welding in new developments in advanced welding. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005, pp. 158-197.

9. Ignatov A. Lazernaia svarka stalei moshchnymi SO₂-lazerami. Chast' 1 [Laser welding staly powerful CO₂-lasers. Part 1]. *Fotonika*, 2008, no. 6, pp. 10-17.

10. Katayama S. Understanding and improving process control in pulsed and continuous wave laser welding, in advances in laser materials processing. Cambridge: Woodhead Publishing, 2010, pp. 181-210.

11. Dubrovskii B.A., Shiliaev P.V., Las'kov S.A., Gorbunov A.V., Luk'ianov S.A., Golubchik E.M. Osvoenie tekhnologii proizvodstva prokata v novom komplekse kholodnoi prokatki [Development of production technologies of hire in a new complex of cold rolling]. *Stal'*, 2012, no. 2, pp. 63-65.

12. Longfield N., Leishout T., de Wit Im., Van Der Veldt T., Stam W. Improving laser welding efficiency. *Welding Journal*, 2007, vol. 86, iss. 5, p. 52.

13. Ignatov A., Krivorotov V., Mirgorodskii V. Lazernye svarnye soedineniia iz korrozionno-stoikikh stalei [Laser welded connections from corrosion resistant staly]. *Fotonika*, 2010, no. 2, pp. 18-21.

14. Lukashenko A.G., Mel'nichenko T.V., Lukashenko D.A. Lazernaia svarka tonkolistovoi nerzhaveiushchei stali modulirovannym izlucheniem [Laser welding of thin-sheet stainless steel the modulated radiation]. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2012, no. 4, pp. 19-23.

15. Koptseva N.V., Chukin M.V., Nikitenko O.A. Use of the Thixomet PRO software for quantitative analysis of the ultrafine-grain

structure of low-and medium-carbon steels subjected to equal channel angular pressing. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, no. 7-8, pp. 387-392.

Получено 22.06.2016

Об авторах

Лазарева Анна Ивановна (Магнитогорск, Россия) – аспирант кафедры литейного производства и материаловедения Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; e-mail: Anna_Lazareva89@bk.ru.

Кошцева Наталья Васильевна (Магнитогорск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры литейного производства и материаловедения Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; e-mail: korseva1948@mail.ru.

Горленко Дмитрий Александрович (Магнитогорск, Россия) – кандидат технических наук, ассистент кафедры литейного производства и материаловедения Магнитогорского государственного технического университета; e-mail: gorldima@yandex.ru.

Ефимова Юлия Юрьевна (Магнитогорск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; e-mail: jefimova78@mail.ru.

Никитенко Ольга Александровна (Магнитогорск, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологий обработки материалов Магнитогорского государственного технического университета; e-mail: olganikitenko@list.ru.

Голубчик Эдуард Михайлович (Магнитогорск, Россия) – доктор технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; e-mail: golub66@mail.ru.

About the authors

Anna I. Lazareva (Magnitogorsk, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Casting Production and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University; e-mail: Anna_Lazareva89@bk.ru.

Natalia V. Kopceva (Magnitogorsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Casting Production and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University; e-mail: kopceva1948@mail.ru.

Dmitry A. Gorlenko (Magnitogorsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Assistant, Department of Casting Production and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University; e-mail: gorldima@yandex.ru.

Julia J. Efimova (Magnitogorsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Material Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University; e-mail: jefimova78@mail.ru.

Olga A. Nikitenko (Magnitogorsk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Material Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University; e-mail: olganikitenko@list.ru.

Eduard M. Golubchik (Magnitogorsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Material Processing Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University; e-mail: golub66@mail.ru.