ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ MATERIAL PROCESS ENGINEERING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ШТОКА ГИДРОЦИЛИНДРА АДДИТИВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В данной работе приведены результаты исследования упрочняющей поверхностной обработки штока гидроцилиндра методами аддитивных технологий. Рассмотрены три метода упрочняющей обработки поверхностного рабочего слоя: поверхностная закалка лазером, детонационное напыление и лазерная наплавка порошкового сплава. Поверхностная термическая обработка не позволила получить требуемую твердость, что связано с недостаточной скоростью охлаждения, которая достигается при охлаждении металла на воздухе. Детонационное напыление обеспечило получение упрочненного слоя толщиной около 0,25 мм и твердостью более 61 HRC. Лазерная наплавка порошкового материала Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V на рабочую поверхность штока позволила получить функциональный поверхностный слой с твердостью 52–54 HRC толщиной более 1,0 мм, который при необходимости можно существенно увеличить. Этот метод упрочнения показал перспективность применения не только для повышения износостойкости рабочей поверхности, но и для восстановления геометрических размеров изношенных в процессе эксплуатации деталей.

Ключевые слова: аддитивные технологии, лазерная наплавка, шток гидроцилиндра, детонационное напыление, прямое лазерное сплавление.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор № FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).

© Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В., 2020

Для цитирования

Повышение эксплуатационных свойств поверхности штока гидроцилиндра аддитивными технологиями / Радионова Л.В., Самодурова М.Н., Быков В.А., Глебов Л.А., Брык А.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т.18. №3. С. 34–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41>

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVING THE HYDRAULIC CYLINDER ROD SURFACE PERFORMANCE PROPERTIES BY APPLYING ADDITIVE TECHNOLOGIES

Radionova L.V., Samodurova M.N., Bykov V.A., Glebov L.A., Bryk A.V.

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. This paper presents the results of studies on a hydraulic cylinder rod hardening surface treatment using additive technologies. The authors analyzed three surface working layer hardening processing methods: surface hardening by a laser, detonation spraying, and laser cladding of a powder alloy. Surface heat treatment did not contribute to achieving the required hardness; the reason is an insufficient cooling rate, which is achieved by cooling the metal in air. Detonation spraying provided a hardened layer with a height of about 0.25 mm and a hardness of over 61 HRC. Laser cladding of the Fe-4.5Cr-4.5Mo-5.5W-4V powder material on the rod working surface allowed us to obtain a functional surface layer with a hardness of 52–54 HRC and a height of over 1.0 mm, which could be significantly increased, if necessary. This hardening method showed the potential application not only to increase the working surface wear resistance, but also to restore the geometry of parts worn during their operation.

Keywords: additive technologies, laser cladding, hydraulic cylinder rod, detonation spraying, direct laser fusion.

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the grant for fulfilling the state task (basic scientific research), Contract No. FENU-2020-0020 (2020071GZ).

For citation

Radionova L.V., Samodurova M.N., Bykov V.A., Glebov L.A., Bryk A.V. Improving the Hydraulic Cylinder Rod Surface Performance Properties by Applying Additive Technologies. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 3, pp. 34–41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-3-34-41>

Введение

Гидроцилиндр (гидравлический цилиндр) представляет собой гидродвигатель с возвратно-поступательным принципом работы. Простота и компактные размеры конструкции гидравлических цилиндров, а также разнообразие их моделей позволяют применять гидроцилиндры во многих сферах промышленности и строительства [1]. В металлургии гидроцилиндры применяются в механизмах печей, заслонок, прокатных станов, металлообрабатывающих станках, транспортирующих устройствах и т.д. [2]. Металлургическое оборудование постоянно подвергается воздействию тяжелых эксплуатационных условий, что конечно сказывается на работе гидравлических цилиндров. Эти сложные условия включают высокую и низкую температуры, пыль, ударные нагрузки. Номенклатура гидроцилиндров (рис.1), применяемых в металлургической промышленности, обширна [3]. Основной рабочей деталью гидроцилиндра является шток (рис. 2), диаметр которого может быть от 40 до 1200 мм. В процессе работы он испытывает не только давление со стороны поднимаемого груза, но и износ в результате трения о другие детали, насаженные на него. Поэтому для повышения эксплуатационных свойств гидроцилин-

дра применяется упрочняющая обработка поверхности штока до твердости 48–50 HRC [4]. На сегодняшний день достаточно широко для этого используется закалка ТВЧ, нанесение защитных покрытий (никелирование, хромирование) [5–7]. Однако появление технологий и расширение оборудования для нанесения функциональных покрытий аддитивными методами ставит вопрос о возможности и целесообразности их применения при разработке ответственных деталей металлургического оборудования, а также для восстановления изношенных.

Целью настоящей работы является получение и исследование функционального поверхностного слоя штока гидроцилиндра аддитивными технологиями.

Рис. 1. Общий вид типового поршневого гидроцилиндра

Fig. 1. Overview of a typical piston hydraulic cylinder

Рис. 2. Трехмерная модель штока
Fig. 2. 3D model of the rod

Экспериментальные исследования

Работы по получению функционального поверхностного слоя штока проводились в лаборатории механики, лазерных процессов и цифровых производственных технологий ЮУрГУ. Комплекс КЛС на базе LaserClad 4 C R120, оснащенный иттербиевым волоконным лазером ЛС-4 и промышленным робот-манипулятором KUKA KR-120, предназначен для реализации технологий прямого лазерного сплавления из порошковых и проволоочных материалов, а также позволяет осуществлять поверхностную термическую обработку (рис. 3) [8–10].

Рис. 3. Робот-манипулятор KUKA KR-120
Fig. 3. Robotic manipulator KUKA KR-120

Детонационный комплекс CCDS2000 (рис. 4) основан на технологии нанесения покрытий, в которой для разогрева и разгона порошкообразного материала используется энергия газового взрыва [11–14].

Для изготовления штока могут быть использованы следующие марки стали: 40Х, 30ХГСА,

12Х18Н10Т, 42CrMo4 [15]. Поэтому для разработки технологии упрочняющей обработки в качестве исследуемого материала была выбрана сталь 40ХН с исходной ферритно-пелитной структурой (рис. 5) и твердостью 20 HRC. Поверхность образцов (подложки) перед нанесением упрочняющего слоя подвергалась зачистке в абразивоструйной кабине.

Рис. 4. Детонационный комплекс CCDS2000
Fig. 4. Detonation complex CCDS2000

Рис. 5. Микроструктура заготовки из стали марки 40ХН (x100)
Fig. 5. Microstructure of the 40KhN steel sample (x100)

Для получения функционального поверхностного слоя было рассмотрено четыре метода упрочнения поверхности: поверхностная закалка лазером (вариант №1), детонационное напыление (вариант №2), лазерная наплавка порошкового материала (вариант №3).

Для детонационного напыления был выбран порошок компании Castoline под номером 55586С (WC-10Co-4Cr). Порошок на основе карбида вольфрама (WC-10Co-4Cr) применяется для защиты от износа и коррозии при температуре ниже 480°C. Для прямого лазерного сплавления

порошок EuTroLoy® 16606 (Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V). Порошок Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V обладает отличной износостойкостью при работе до 500°C.

Для исследования микроструктуры и определения микротвердости изготавливались металлографические шлифы. Травление образцов осуществлялось 3% раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя оценивались посредством измерения твердости. Определение микротвердости осуществлялось с помощью стационарного твердомера HV-1000.

Вариант №1. Поверхностная закалка лазером
Поверхностную лазерную закалку осуществляли по режимам, указанным в **табл. 1**. Схема движения лазера и натурный образец приведены на **рис. 6**. Микроструктура термически обработанного слоя приведена на **рис. 7**. Закалка во всех режимах проводилась с последующим охлаждением на воздухе. Поскольку скорость охлаждения на воздухе ниже, чем в масле и ещё ниже, чем в воде, то твердость, полученная после такой закалки, не превышает 30 HRC (**табл. 2**). Для рабочего слоя штока гидроцилиндра такая твердость не допустима.

Рис. 6. Образец после поверхностной лазерной закалки
Fig. 6. The sample after surface laser hardening

Вариант №2. Детонационное напыление

При упрочнении детонационным методом с последующим проплавлением на подложку было сделано 35 выстрелов порошком на основе карбида вольфрама WC-10Co-4Cr. Полученное покрытие было равномерным. Металлографическое исследование показало, что толщина покрытия составляет около 0,25 мм (см. **рис. 8**), трещины в покрытии отсутствуют. Пористость покрытия не превышает 1%. Зона сцепления покрытия с основным металлом приведена на **рис. 8,б**. Эксплуатационные свойства поверхностного слоя оценивались через твердость. Результаты замера и перевод полученных значений в единицы HRC приведены в **табл. 3**. Среднее значение твердости составляет 764 HV или 62 HRC. Термическое воздействие на микроструктуру основного металла отсутствует.

Таблица 1. Технологические режимы при поверхностной лазерной закалке

T a b l e 1. Technological modes for surface laser hardening

Режим закалки	Скорость перемещения лазера, мм/мин	Шаг, мм	Мощность лазера, Вт	Положение каллибратора	Фокусное расстояние, мм
1	12	4	2600	+5	175
2	14		2200		
3	16		2200		

Таблица 2. Результаты измерения твердости после поверхностной закалки

T a b l e 2. Measurement results of hardness after surface hardening

Режим закалки	Значение твердости по Роквеллу, HRC					
	1	2	3	4	5	Среднее
1	21,5	23	21,5	30	29	24
2	22	22,5	24,5	26	26	23
3	33	30	29	31	28	30

Рис. 7. Микроструктура после поверхностной лазерной закалки: а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3
Fig. 7. Microstructure after surface laser hardening: а is mode No. 1; б is mode No. 2; в is mode No. 3

Рис. 8. Микроструктура детонационно напыленного слоя: а – x100; б – x500
Fig. 8. Microstructure of the detonation sprayed layer: a is (x100); b is (x500)

Таблица 3. Результаты измерения твердости поверхностного слоя, полученного детонационным напылением
Table 3. Measurement results of surface layer hardness obtained by detonation spraying

Единицы измерения	Значение твердости					Среднее
	1	2	3	4	5	
HV	840	730	760	760	730	764
HRC	65	61	62	62	61	62

Вариант №3. Лазерная наплавка порошкового материала

Для третьего метода упрочнения использовалось прямое лазерное сплавление порошкового материала. На подложку наплавлялся металлический порошок Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V с помощью отработанного ранее [5] режима (табл. 4).

Результаты металлографических исследований полученного слоя показали, что в структуре отсутствуют трещины и микротрещины, а также пористость наплавленного слоя не превышает 3% (рис. 9,а). Толщина наплавленного слоя находится в пределах 1,00 мм (рис. 9,а). При необходимости толщину наплавленного слоя

можно увеличивать, так как технологических препятствий для этого нет. Микроструктура наплавленного слоя приведена на рис. 9,б.

Под наплавленным слоем образуется слой основного материала стали марки 40ХН, подвергнутый термическому воздействию в ходе наплавки. Микроструктура этого участка приведена на рис. 9,в,г. Толщина зоны термического влияния составляет более 1 мм. При этом под наплавленным слоем образуется мартенситная зона толщиной около 0,5 мм. Следовательно, упрочненный слой в общей сложности составляет более 1,5 мм. Результаты измерения твердости наплавленного слоя приведены в табл. 5.

Таблица 4. Режим наплавки порошкового сплава Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V
Table 4. Surfacing mode of Fe-4.5Cr-4.5Mo-5.5W-4V powder alloy

Скорость наплавки, мм/мин	Шаг, мм	Мощность лазера, Вт	Подача порошка, %	Положение каллибратора	Фокусное расстояние, мм
12	1,4	1200	12	0	43

Таблица 5. Результаты измерения твердости поверхностного слоя, полученного лазерной наплавкой порошкового сплава Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V

Table 5. Measurement results of surface layer hardness obtained by laser cladding of Fe-4.5Cr-4.5Mo-5.5W-4V powder alloy

Единицы измерения	Значение твердости					Среднее
	1	2	3	4	5	
HV	580	560	560	560	560	564
HRC	54	52	52	52	52	52

Рис. 9. Микроструктура наплавленного порошковым слоем: а – наплавленный слой до травления (x100); б – наплавленный слой после травления (x100); в – зона термического влияния (x100); г – зона термического влияния (x500)

Fig. 9. Microstructure of the powder surfaced layer: а is a surfaced layer before etching (x100); б is a surfaced layer after etching (x100); в is a heat-affected zone (x100); г is a heat-affected zone (x500)

Заключение

В работе исследованы три метода упрочнения поверхностного слоя штока гидроцилиндра аддитивными технологиями.

Твёрдость при поверхностной закалке лазером по трем разным режимам составила от 23 до 30 HRC. Это гораздо меньше, чем требуется для рабочей поверхности штока, поэтому данный способ упрочнения гидроцилиндра при рассмотренных технологических условиях на практике применяться не может. Причиной пониженной твердости является низкая скорость охлаждения, не обеспечивающая получения мартенситной структуры необходимой морфологии.

Твёрдость при детонационном напылении порошкового сплава WC-10Co-4Cr оказалась довольно высокой и составила 62 HRC. Это очень перспективный способ упрочнения рабо-

чей поверхности таких высоконагруженных деталей металлургического оборудования, как шток гидравлического цилиндра.

При лазерной порошковой наплавке сплавом Fe-4,5Cr-4,5Mo-5,5W-4V значения твердости получены в пределах 52-54 HRC. Это выше требуемого нормативно-технической документацией значения – 48–50 HRC. Пористость при этом не превышает 3%, трещины и микротрещины отсутствуют. Толщина наплавленного слоя составила около 1 мм, которую при необходимости можно значительно увеличить. Следовательно, данный способ применим не только для упрочнения поверхности, но и может быть использован для восстановления размеров изношенных деталей металлургического оборудования с высокими требованиями к износостойкости рабочей поверхности.

Список литературы

1. Ивановский Ю.К., Моргунов К.П. Основы теории гидропривода. Санкт-Петербург: Лань, 2018. 200 с. ISBN 978-5-8114-2955-4. Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/102590> (дата обращения: 11.07.2020). Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Марутов В.А., Павловский С.А. Гидроцилиндры: Конструкции и расчет. М.: Книга по Требованию, 2012. 172 с.
3. Пневматические и гидравлические цилиндры [Электронный ресурс]: Уральский инжиниринговый центр: официальный интернет-сайт. URL: <http://www.cheltec.ru/> (дата обращения: 09.04.2020)
4. Новроцкий К.Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов: учеб. для студентов вузов по спец. «Гидравлические машины, гидроприводы и гидроавтоматика». М.: Машиностроение, 1991. 384 с.
5. Повышение эксплуатационных свойств штоков плунжерных насосов с использованием токов высокой частоты / С.И. Богодухов, Е.С. Козик, С.А. Лобода // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 6. С. 36–39.
6. Токарева И.А., Шалимов Ю.Н. Особенности технологических процессов хромирования из электролитов на основе низковалентных соединений хрома. Технология машиностроения. 2014. №1. С. 35–41.
7. Композиционные электрохимические покрытия на основе никеля / Р. Е. Фомина [и др.] // Вестник Казан. технолог. ун-та. 2018. Т. 21, № 2. С. 70–73.
8. Быков В.А., Радионova Л.В., Самодурова М.Н. Восстановление изношенной поверхности шеек прокатных валков методом прямого лазерного сплавления. MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019: Материалы IV международной молодежной научно-практической конференции / под ред. А.Г. Корчунова. Магнитогорск, 2019. С. 120–122.
9. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods // Materials. 2019. Vol. 12. № 19. <https://doi.org/10.3390/ma12193269>
10. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A Study of Characteristics of Aluminum Bronze Coatings Applied to Steel Using Additive Technologies // Materials. 2020. Vol. 13. № 461. doi.org/10.3390/ma13020461
11. Быков В.А., Радионova Л.В., Самодурова М.Н. Восстановление плунжерной пары путем детонационного напыления функционального покрытия // Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов: сборник докладов. 2020. С. 200–203.
12. Борисов Ю.С., Петров С.В. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автомат. сварка. 1995. № 1. С. 41–44.
13. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко и др. Киев: Наук. Думка, 1987. 544 с.
14. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC–Co Coatings Deposited by Warm Spray Process // J. of Thermal Spray Technology. 2008. V. 17, Iss. 5–6. P. 750–756.
15. Плесовских А.Ю., Крылова С.Е., Оплеснин С.П. Импортозамещающая технология изготовления деталей нефтегазодобывающей отрасли с нанесением износостойких покрытий на основе вольфрама // Вестник современных технологий. 2019. № 2 (14). С. 9–14.

References

1. Ivanovskiy Yu.K., Morgunov K.P. Fundamentals of the hydraulic drive theory. St. Petersburg: Lan, 2018, 200 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/102590> (Accessed July 11, 2020).
2. Marutov V.A., Pavlovskiy S.A. *Gidrotsilindry: Konstruktsii i raschet* [Hydraulic cylinders: designs and calculations]. Moscow: Book on Request, 2012, 172 p. (In Russ.)
3. Pneumatic and hydraulic cylinders. Ural Engineering Center: the official website. Available at: <http://www.cheltec.ru/> (Accessed April 9, 2020).
4. Novrotsky K.L. *Teoriya i projektirovanie gidro- i pnevmoprivodov: ucheb. dlya studentov vuzov po spets. "Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidroavtomatika"* [Theory and design of hydraulic and pneumatic drives: textbook for university students majoring in "Hydraulic machines, hydraulic drives and hydraulic automation"]. Moscow: Mechanical Engineering, 1991, 384 p. (In Russ.)
5. Bogodukhov S.I., Kozik E.S., Loboda S.A. Improving the performance of plunger pump rods using high frequency currents. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni* [Blank Production in Mechanical Engineering], 2014, no. 6, pp. 36–39. (In Russ.)
6. Tokareva I.A., Shalimov Yu.N. Special features of chromium plating technological processes from electrolytes based on low-valent chromium compounds. *Tekhnologiya mashinostroyeniya* [Engineering Technology], 2014, no. 1, pp. 35–41 (In Russ.)
7. Fomina R.E., et al. Nickel-based composite electrochemical coatings. *Vestnik Kazan. tekhnolog. un-ta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2018, vol. 21, no. 2, pp. 70–73. (In Russ.)
8. Bykov V.A., Radionova L.V., Samodurova M.N. Restoration of the worn surface of roll necks by direct laser fusion. MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019: *Materialy IV mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-*

- prakticheskoy konferentsii* [MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE 2019: Proceedings of the 4th International Youth Scientific-Practical Conference]. Ed. by A.G. Korchunov. Magnitogorsk: Novosibirsk State Technical University, 2019, vol. 1, pp. 120–122. (In Russ.)
9. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A study of the structural characteristics of titanium alloy products manufactured using additive technologies by combining the selective laser melting and direct metal deposition methods. *Materialy* [Materials], 2019, vol. 12, no. 19. doi:10.3390/ma12193269
 10. Samodurova M., Radionova L., Zakirov R. A study of characteristics of aluminum bronze coatings applied to steel using additive technologies. *Materialy* [Materials], 2020, vol. 13, no. 461. doi:10.3390/ma13020461
 11. Bykov V.A., Radionova L.V., Samodurova M.N. Recovery of a plunger pair by a detonation spraying of a functional coating. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov: sbornik dokladov* [Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students: Collection of Papers], 2020, pp. 200–203. (In Russ.)
 12. Borisov Yu.S., Petrov S.V. The use of supersonic jets in the thermal spraying technology. *Avtomat. svarka* [Automatic welding], 1995, no. 1, pp. 41–44. (In Russ.)
 13. Borisov Yu. S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L. et al. *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov: spravochnik* [Thermal Powder Coatings: A Handbook]. Kiev: Nauk. Dumka, 1987, 544 p. (In Russ.)
 14. Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S. Development of WC–Co coatings deposited by warm spray process. *J. of Thermal Spray Technology*, 2008, vol. 17, no. 5–6, pp. 750–756.
 15. Pleskovskikh A.Yu., Krylova S.E., Oplensin S.P. Import-substituting technology for manufacturing parts of the oil and gas industry with the application of tungsten based wear-resistant coatings. *Vestnik sovremennykh tekhnologiy* [Bulletin of Modern Technologies], 2019, no. 2 (14), pp. 9–14. (In Russ.)

Поступила 19.07.2020; принята к публикации 04.09.2020; опубликована 25.09.2020
Submitted 19/07/2020; revised 04/09/2020; published 25/09/2020

Радионова Людмила Владимировна – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, Россия. Email: radionovalv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

Самодурова Марина Николаевна – д-р техн. наук, доцент кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, руководитель Ресурсного центра специальной металлургии, Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, Россия. Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Быков Виталий Алексеевич – студент, Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, Россия. Email: vitaliy.bykov.97@mail.ru. ORCID 0000-0002-1036-900X

Глебов Лев Александрович – студент, Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, Россия. Email: 79193293392@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

Брык Анастасия Владимировна – студент, Южно-Уральский государственный университет. Челябинск, Россия. Email: 89193497818n@gmail.com. ORCID 0000-0003-2266-4599

Lyudmila V. Radionova – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Metal Forming Processes and Machines Department, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: radionovalv@susu.ru. ORCID 0000-0001-9587-2925

Marina N. Samodurova – DrSc (Eng.), Associate Professor, the Metal Forming Processes and Machines Department, Head of the Special Metallurgy Resource Center, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: samodurovamn@susu.ru. ORCID 0000-0002-1505-1068

Vitaliy A. Bykov – student, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: vitaliy.bykov.97@mail.ru. ORCID 0000-0002-1036-900X

Lev A. Glebov – student, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: 79193293392@yandex.ru. ORCID 0000-0001-6484-1894

Anastasia V. Bryk – student, South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. Email: 89193497818n@gmail.com. ORCID 0000-0003-2266-4599