

## ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКОГО МАТЕРИАЛА НА ДЛИННОМЕРНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

А.А. Бурин, А.Д. Губко, А.А. Бакиновский, А.И. Поболь

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

*Проведена электродуговая наплавка порошковой проволоки мартенситного класса на заготовку противобруса из стали 45 с применением методов предупреждения последующих деформаций. Измерены их величины на длинномерных изделиях, полученных по различным вариантам предупреждения деформаций, и оценено напряженно-деформированное состояние с использованием метода конечных элементов. Выполнены дюрOMETрические и структурные исследования, рентгеновская дефектоскопия полученных образцов.*

**Ключевые слова:** износостойкий материал, электродуговая наплавка, напряженно-деформированное состояние, противорежущий брус

## ELECTRIC ARC SURFACING OF WEAR-RESISTANT MATERIAL ON LONG-DIMENSIONAL WORKPIECES

A.A. Burin, A.D. Gubko, A.A. Bakinovsky, A.I. Pobol

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

*Electric arc surfacing of a martensitic-grade flux-cored wire on steel 45 workpieces using the methods for preventing subsequent deformations was carried out. The strain values were measured on long-length products obtained using various deformation prevention options and the stress-strain state was estimated using the finite element method. X-ray flaw detection, Hardness and microhardness tests and structural studies of the obtained samples were performed, deformations were measured.*

**Keywords:** wear-resistant material, electric arc surfacing, stressed-deformed state, opposing bar

**E-mail:** burinalexandr@gmail.com

Наплавка материалов является одним из широко применяемых вариантов получения би- и триметаллических изделий, изготовления, ремонта и восстановления изношенных деталей. Наплавка включает расплавление материала, имеющего температуру, как правило, более низкую или приблизительно равную температуре плавления.

ния материала основы. Имеется большое разнообразие комбинаций наносимого и основного материала, методов и источников нагрева наносимого материала. Для его расплавления применяют электроискровой перенос материала, пламенные, плазменные, электродуговые горелки, печной, индукционный, вибродуговой, высокочастотный, термитный, электрошлаковый нагрев, нанесение материала с использованием лазерного и электронно-лучевого нагрева и другие методы [1]. Каждый из вариантов наплавки имеет свои преимущества и недостатки. Для получения качественных слоев из высокоактивных металлов (титана, циркония и т.п.) целесообразно применение вакуумной защитной среды и электронно-лучевого источника нагрева [2]. Опыт, приобретенный при применении лазерной и электронно-лучевой наплавки, послужил основой для интенсивно развиваемых методов аддитивных технологий [3,4].

Производство инструмента для сельскохозяйственной техники является одним из важных направлений научно-практических разработок вследствие наличия в Республике Беларусь большого количества профильных предприятий (ОАО «Лидсельмаш», ОАО «Гомсельмаш», ОАО «Минский тракторный завод», ОАО «МЗШ» и т.д.). Однако некоторые детали и инструменты белорусской сельхозтехники приобретаются за рубежом.

Примером таких дорогостоящих расходных рабочих инструментов для кормоуборочных комбайнов производства ОАО «Гомсельмаш», производство которых требуется наладить в Беларуси, является противорежущий брус. Такие изделия изготавливаются из конструкционных сталей типа 45 или 65Г, на рабочие режущие кромки наплавляют износостойкие чугуны, легированными ванадием, хромом, вольфрамом и другими элементами. При этом необходимо обеспечить достаточный уровень механических и технологических свойств, а также максимально уменьшить деформации изделия при наплавке износостойкого материала.

### Цели и задачи исследования

Выполнялась отработка методов наплавки режущих кромок в предварительно изготовленную разделку заготовок противобруса. Общий вид заготовок показан на рис. 1, а. Изучение опыта зарубежных фирм [5], занимающихся операциями сварки и наплавки при производстве и ремонте инструмента показало, что применение формы разделки, отличной от U-образной, крайне не рекомендуется (рис. 1, б).

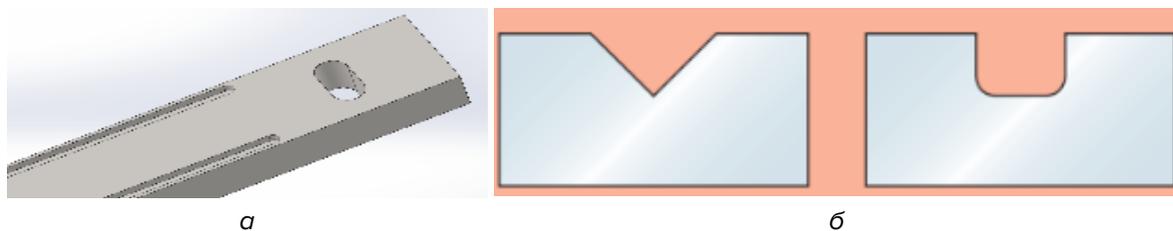


Рис. 1. 3D-модель заготовки противобруса с общим видом формы разделки (а) и не рекомендуемые виды разделки (б) [5]

**Цель работы** – разработка отдельных этапов технологии изготовления противорежущего бруса, обеспечивающей необходимый уровень твердости рабочих кромок при минимальном изменении геометрии изделия. Задачи исследования: определение факторов, влияющих на деформацию заготовки, образование макро- и микродефектов при наплавке износостойкого материала на заготовку; измерение распределения твердости в зоне наплавленного материала и разработка рекомендаций по регулированию этих факторов для частичного или полного устранения их негативного влияния на качество конечного изделия.

## Моделирование напряженно-деформированного состояния

Деформации изделий в процессе наплавки вызываются рядом процессов, связанных с нелинейностью термомеханических и теплофизических свойств материалов, а также с фазовыми превращениями. Существующие упрощенные методики расчетов позволяют оценить характер и величины напряжений и деформаций без учета всех этих факторов. К примеру, эффект уменьшения объема металла в зоне пластических деформаций в ряде случаев может быть представлен как сжимающее действие некоторой фиктивной усадочной силы  $P_{yc}$ . Это позволяет рассчитывать сварочные деформации методами сопротивления материалов [6].

Усадочная сила зависит от количества вводимой теплоты при сварке и от жесткости свариваемых элементов. Многие приближенные методы расчета разработаны специально для получения этих зависимостей расчетным путем. Общепринята следующая зависимость усадочной силы ( $P_{yc}$ , Н) от погонной энергии сварки:

$$P_{yc} = Bq/v_c,$$

где  $B$  — коэффициент пропорциональности;  $q/v_c$  — погонная энергия сварки, Дж/см. Коэффициент  $B$  не является постоянной величиной, а зависит от многих факторов, хотя в ранних исследованиях его полагали постоянным [7].

Для конечно-элементного моделирования применен пакет CAD/CAE с открытой лицензией. В рамках данной работы не проводилось расчета абсолютных значений фиктивной усадочной силы, а осуществлялся ее подбор, исходя из реальных деформаций, с целью визуализации характера распределения напряжений при различных вариантах наплавки.

## Материалы, оборудование и методики исследований

Заготовка противобруса представляет собой параллелепипед с размерами 32 × 58 × 1000 мм, изготовленный из стали 45 в отожженном состоянии. В заготовках выполнены два паза прямоугольного сечения с размерами 6 × 7 мм.

В качестве наплавочного материала применялась порошковая проволока мартенситного класса рутилового типа диаметром 1,2 мм.

Химический состав материалов указан в табл. 1,2.

Табл. 1

### Химический состав порошковой проволоки [8]

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
основа	0,45	0,7	1	0,01	0,01	5	1,5	0,45	1,3

Табл. 2

### Химический состав стали 45 [9]

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	As
основа	0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,035	до 0,04	до 0,25	до 0,3	до 0,3	до 0,08

Механизированная дуговая наплавка осуществлена в среде аргона при помощи аппарата Lincoln Electric Powertec 280C по режиму, приведенному в табл. 3. Заготовки предварительно очищены и высушены в трехступенчатой линии мойки с применением биоразлагаемого моющего средства и ультразвукового воздействия.

## Режим наплавки

Напряжение, В	Сила тока, А	Расход газа, л/мин
21–23	150–190	16

Опробованы варианты одно- и многопроходной наплавки, с механической фиксацией заготовки и без ее закрепления. Деформации заготовки измерялись при помощи щупов.

Рентгеновская дефектоскопия выполнена на установке GE X-Cube Compact с ускоряющим напряжением 225 кВ.

Данные о распределения микротвердости получены при помощи автоматического микротвердомера AFFRI DM8 Auto, измерение твердости по Роквеллу – на универсальном твердомере AFFRI VRSD 251.

## Результаты исследований

Внешний вид заготовки противобруса после наплавки представлен на рис. 2. Макрошлиф отражает характер соединения наплавленного материала с материалом основы при однопроходной (рис. 3, а) и многопроходной наплавке (рис. 3, б). Основные оси дендритов в наплавленном металле расположены вдоль направления теплоотвода при кристаллизации, от стенок паза. Перемешивание наплавленного материала и основы практически не происходит, в угловых участках паза наблюдаются несплавления. Твердость наплавленного материала составляет 57,7 HRC, что отвечает требованиям, предъявленным в КД.



Рис. 2. Заготовка противобруса после наплавки

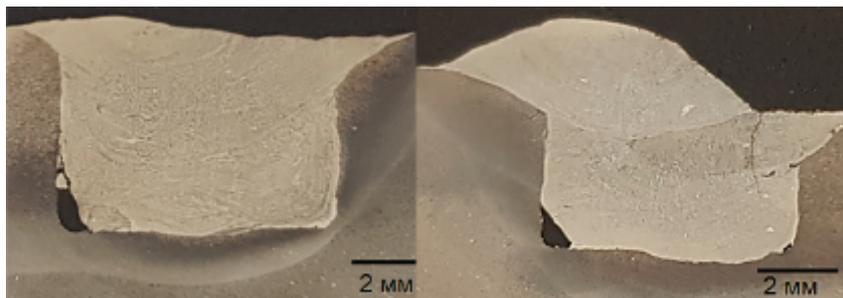


Рис. 3. Макрошлиф участков заготовки противобруса, после однопроходной (а) и многопроходной (б) наплавки

Материал основы имеет феррито-перлитную структуру, характерную для среднеуглеродистых сталей в состоянии поставки. Равноосные зерна перлита размером 15–25 мкм окружены ферритной сеткой. Наблюдаются также ферритные зерна размером около 10 мкм (рис. 4, а). Наплавленный металл имеет литую мартенситную структуру (рис. 4, б). Зона термического влияния (ЗТВ) окружает наплавленный материал в виде полукруга (в поперечном сечении) диаметром около 12 мм (рис. 3). При наплавке за 1 проход микроструктура ЗТВ представляет собой дисперсные мартенситные иглы в областях, граничащих с литой зоной (рис. 4, в), и крупнозернистую феррито-перлитную структуру в остальной части ЗТВ. Отпуск локальных зон, вызванный дополнительными тепловложениями в ходе нескольких этапов наплавки, приводит к образованию троостита отпуска в ЗТВ (рис. 4, г). Такое изменение микроструктуры, в свою очередь,

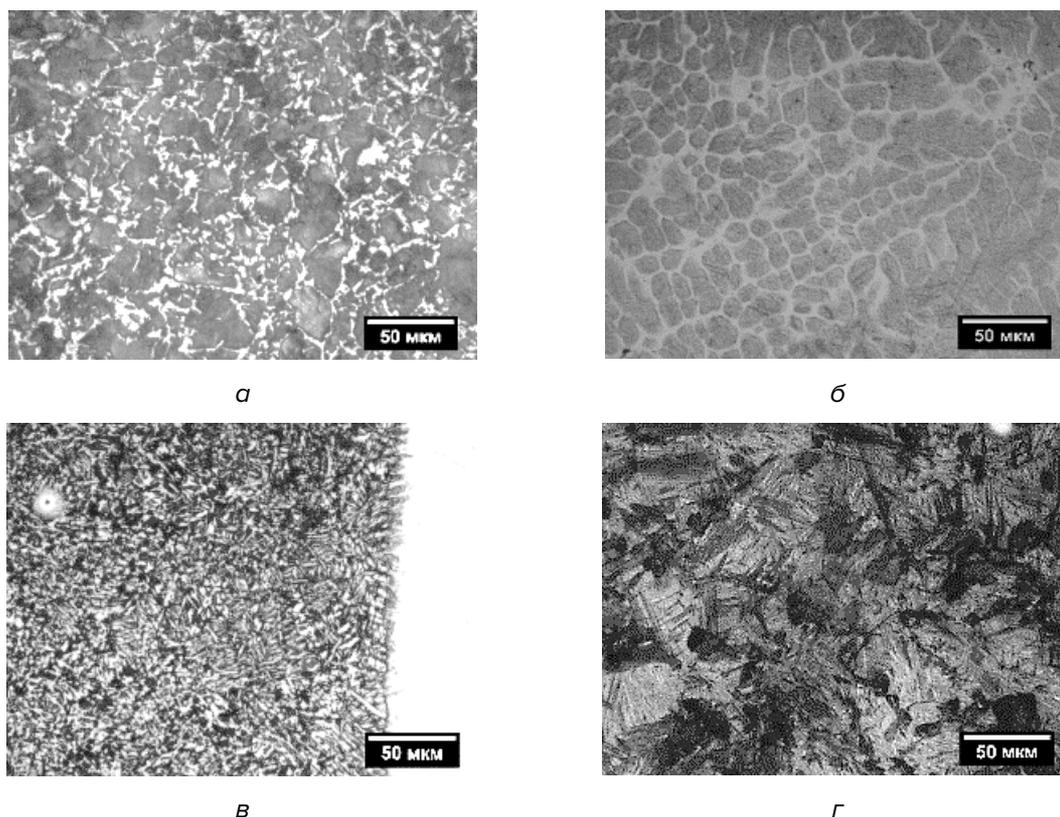


Рис. 4. Микроструктура материала основы – стали 45 (а), наплавленного материала (б), ЗТВ в стали 45 при наплавке за 1 проход (в), ЗТВ при наплавке за 3 прохода (г)

ведет к скачкообразному снижению твердости в ЗТВ (рис. 6, б), что может негативно отразиться на эксплуатационных характеристиках инструмента.

Рентгеновская дефектоскопия (рис. 5) и макрошлиф показали частичное отсутствие сплавления металлов основы и наплавки в углах пазов и в местах прерывания процесса. Этот дефект может привести к снижению прочности соединения материалов основы и наплавки и отрицательно сказаться на эксплуатационных характеристиках инструмента.

График распределения в поперечном сечении заготовки для однопроводной наплавки (рис. 6, а) показывает плавное изменение микротвердости при переходе от наплавленного материала к основе. При многопроводной наплавке (рис. 6, б) заметно наложение нескольких зон термического влияния, характер распределения напряжений усложняется, возможно появление трещин (рис 3, б).

Рис. 7 отражает величины деформаций заготовок противобрусов, изготовленных с применением мер, предупреждающих остаточные деформации и без их применения. Снижение остаточных деформаций в 2,8–4,9 раза показывает эффективность выбранных методов.

Статический расчет напряженно-деформированного состояния с подбором фиктивной усадочной силы, обеспечивающей деформации заготовки на величины, полученные экспериментальным путем и соответствующих компенсирующих усилий, позволил получить диаграммы распределения напряжений после наплавки (рис. 8). Компенсирующие нагрузки приводят к снижению напряжений в средней части заготовки противобруса (рис. 8, б), что, в свою очередь, приводит к меньшим величинам деформаций (рис. 8, г).

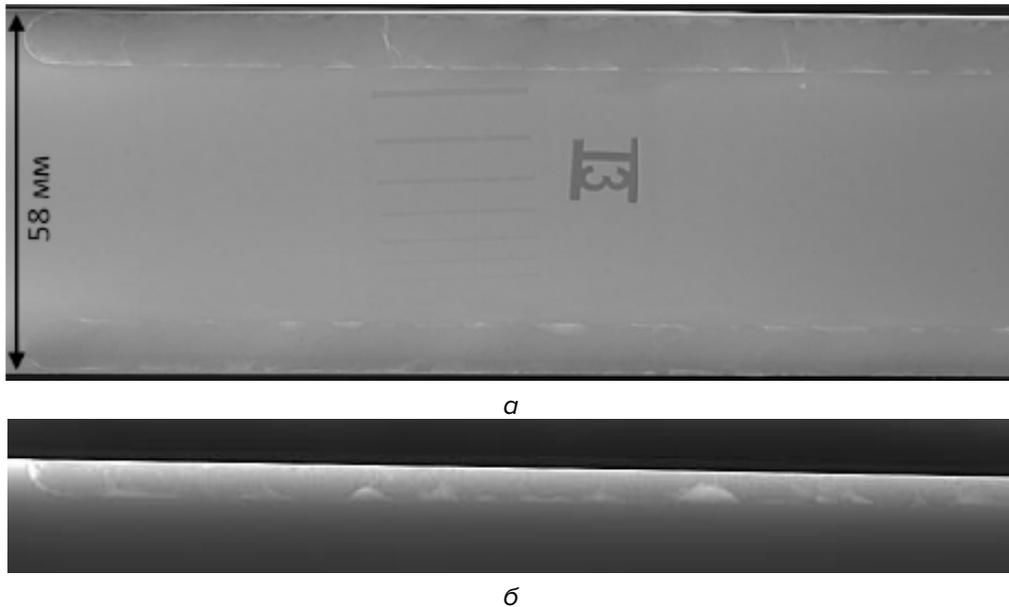


Рис. 5. Снимок заготовки противобруса, полученный методом рентгеновской дефектоскопии: вид сверху (а) и сбоку (б)



Рис. 6. График распределения микротвёрдости в поперечном сечении заготовки после однопроходной (а) и многопроходной (б) наплавки

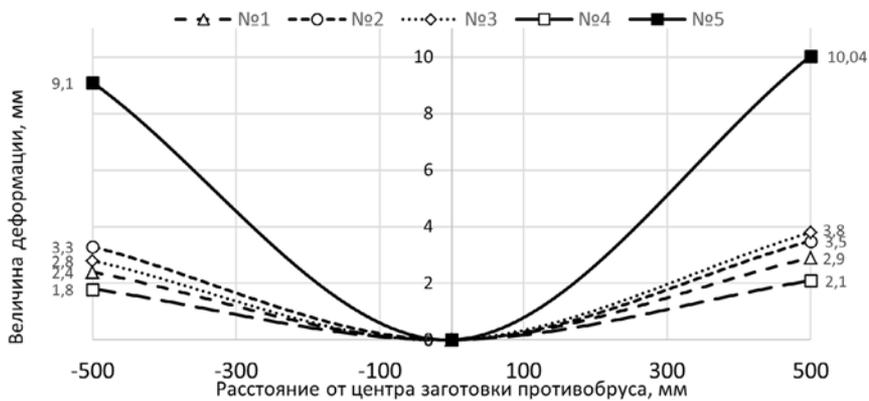


Рис. 7. Деформации заготовки после наплавки: №1–4 – с предупреждением деформаций, №5 – без предупреждения деформаций

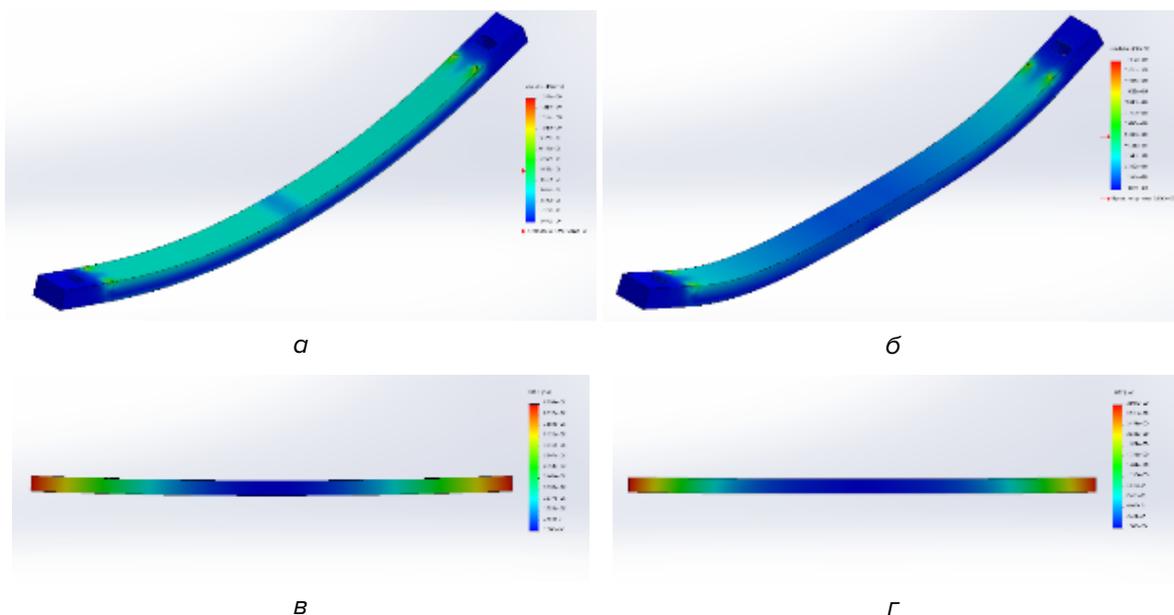


Рис. 8. Диаграммы напряжений по Мизесу (а,б) и деформаций в заготовках после наплавки (в,г), полученные путем конечно-элементного моделирования действия фиктивной усадочной силы  $P_{ус}$  (а,в) и  $P_{ус}$  совместно с компенсирующими нагрузками (б,г).

### Дальнейшие исследования

Заготовки противобруса после наплавки переданы для натурных испытаний на ОАО «Гомсельмаш». Продолжаются исследований в данном направлении по оптимизации формы паза с целью его полного заполнения износостойким материалом, будет проводится термомеханический расчет процессов нагрева и охлаждения заготовки методом конечных элементов с учетом фазовых превращений. Имеются наработки по применению дополнительных мер, применяемых для дальнейшего снижения деформаций. Изменение геометрии заготовки и формы разделки позволит устранить появление несплавлений и снизить издержки на механическую обработку. Проводятся работы по автоматизации процесса наплавки с применением сварочных кареток с осцилляторами и оптимизация последовательности операций и режимов наплавки, что, в свою очередь, обеспечит гарантированные механические свойства рабочей кромки изделия.

### Заключение

1. Выбранный материал и режимы наплавки обеспечивают твердость рабочих кромок, необходимую по КД.
2. Примененный метод уменьшения остаточных деформаций длинномерных заготовок при наплавке показал свою эффективность.
3. Однопроходная наплавка обеспечивает более равномерное распределение микротвердости при переходе от наплавленного материала к материалу основы.
4. Для устранения незаполнения металлом угловых зон паза необходима оптимизация формы паза и автоматизация процесса наплавки с выбором оптимальных значений параметров процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bunshah, R. F. Handbook of hard coatings / R. F. Bunshah, C. Weissmantel (ed.). – 2001.
2. Ahmed, N. New developments in advanced welding / N. Ahmed (ed.). – Elsevier, 2005.
3. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies / L. E. Murr [et al.]/Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Т. 28. – №. 1. – С. 1–14.
4. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Т. 23. – №. 6. – С. 1917–1928.
5. Welding in tool making URL: [www.bucorp.com/media/bohler\\_welding\\_in\\_tool\\_making.pdf](http://www.bucorp.com/media/bohler_welding_in_tool_making.pdf) (дата обращения: 28.04.2018).
6. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / А.М. Дальский [и др.]; Под ред. А.М. Дальского. – 5-е изд., исправленное. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
7. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М. Машиностроение, 1984 – 280 с.
9. EnDOtec® DO\*15 URL: <https://www.castolin.com/product/endotec-do15> (дата обращения: 28.04.2018).
10. ГОСТ 1050-88

## REFERENCES

1. Bunshah R. F., Weissmantel C. (ed.). Handbook of hard coatings. – 2001.
2. Ahmed N. (ed.). New developments in advanced welding. – Elsevier, 2005.
3. Murr L. E. et al. Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies //Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Т. 28. – №. 1. – С. 1–14.
4. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review //Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Т. 23. – №. 6. – С. 1917–1928.
5. Welding in tool making URL: [www.bucorp.com/media/bohler\\_welding\\_in\\_tool\\_making.pdf](http://www.bucorp.com/media/bohler_welding_in_tool_making.pdf) (date of access: 28.04.2018).
6. Dal'skij A.M., Barsukova T.M., Buharkin L.N. [et al.]Tehnologija konstrukcionnyh materialov: Uchebnik dlja studentov mashinostroitel'nyh special'nostej vuzov [Technology of constructional materials: Textbook for students of machine-building specialties of universities]; Pod red. A.M. Dal'skogo. – 5-e izd., ispravlennoe. Moscow, Mashinostroenie, 2004, 512 p. (in Russian)
7. Vinokurov V.A., Grigor'janc A.G. Teorija svarochnyh deformacij i naprjazhenij [Theory of welding deformations and stresses]. – Moscow. Mashinostroenie, 1984 – 280 s. (in Russian)
8. EnDOtec® DO\*15 URL: <https://www.castolin.com/product/endotec-do15> (date of access: 28.04.2018).
9. GOST 1050–88 (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 20.06.18*