

3. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Формирование наноразмерных элементов структуры при низкотемпературной рекристаллизации ферритно-перлитной стали после интенсивной холодной деформации // Пленарные доклады IV Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2008. – 304 с.

4. Яковлева С.П., Махарова С.Н., Мордовской П.Г., Борисова М.З. Влияние режимов объемного наноструктурирования мегапластической деформацией на свойства конструкционной стали // Перспективные материалы. – 2011. – №13. – С. 961–967.

5. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Роль наноструктурирования в повышении механических

свойств низколегированных сталей // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 28–34.

6. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с.

7. Hirth I.P., Rigney D.A. The application of dislocation concepts in friction and wear. Dislocation in Solids /Edited by F.R.N. Nabarro. – 1983. – V. 6, ch. 25. – P. 3–54.

8. Макаров А. В., Коришунов Л. Г., Выходец В. Б. и др. Влияние упрочняющей фрикционной обработки на химический состав, структуру и трибологические свойства высокоуглеродистой стали // Физика металлов и материаловедение. – 2010. – № 5. – Т.110. – С.1–15.

9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбатов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

Поступила в редакцию 07.08.2015

УДК 621.791

Импульсно-дуговая наплавка для восстановления изношенных деталей

Н.И. Голиков*, Ю.Н. Сараев**, О.И. Слепцов*, К.В. Степанова*, С.В. Семенов*

*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

Проведены сравнительные экспериментальные исследования химического состава, механических свойств и микроструктуры наплавленных слоев сварочного электрода марки УОНИ-13/55, полученных электродуговой наплавкой на постоянном и модулированном токах. Показано, что наплавленные слои металла, полученные импульсно-дуговой наплавкой, имеют повышенное содержание марганца и значений ударной вязкости, а также более мелкозернистую структуру по сравнению с ручной дуговой наплавкой на постоянном токе. Установлено, что микротвердость наплавленного слоя, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, имеет более сглаженный вид по сравнению с наплавкой на постоянном токе. Для повышения прочности и надежности при восстановлении геометрических размеров изношенных деталей горнодобывающей техники может быть использована технология импульсно-дуговой наплавки.

Ключевые слова: импульсно-дуговая наплавка, наплавленный слой, химический состав, ударная вязкость, микроструктура, феррит, перлит, микротвердость.

The results of comparative pilot studies of chemical composition, mechanical characteristics and a microstructure of weld overlays on the welding electrode UONI-13/55 received by electric arc overlaying on the direct and modulated currents are presented. It is shown that the overlayed metal layers received by pulsed arc welding have the raised content of manganese and of resilience, and also more fine grained structure in comparison with the layers produces by manual arc fusing on a direct current. It is established that the microhardness of the weld overlay performed by pulse arc fusing has more rounded appearance, in comparison with fusing on a direct current. It is concluded that for the increase of durability and reliability at recovery of geometrical sizes of worn-out details of mining technique the technology of pulse arc overlaying can be used.

Key words: pulsed arc welding, build-up layer, chemical composition, resilience, microstructure, ferrite, pearlite, microhardness.

*ГОЛИКОВ Николай Иннокентьевич – к.т.н., в.н.с., n.i.golikov@mail.ru; **САРАЕВ Юрий Николаевич – д.т.н., доцент, в.н.с. litsin@ispms.tsc.ru; *СЛЕПЦОВ Олег Ивкентьевич – д.т.н., проф., o.i.sleptsov@iptpn.ysn.ru; *СТЕПАНОВА Ксения Валерьевна – н.с., kseniastepanova@rambler.ru; *СЕМЁНОВ Сергей Владимирович – инженер 1-й категории sl789@mail.ru.

Введение

Эксплуатация горнодобывающей техники в экстремальных природно-климатических условиях Севера предъявляет особые требования к рабочим элементам машин и механизмов. Характерными следствиями изнашивания режущих деталей землеройной техники являются возрастание усилия резания грунта, нагрузок на отдельные детали и машину в целом, снижение производительности труда, увеличение простоев и затрат на ремонт изношенных деталей. Наблюдается повышенный износ деталей буровой и землеройной техники, эксплуатируемой в горнодобывающей промышленности Севера. Применяемые рабочие элементы землеройной техники весьма дорогостоящи, поэтому актуально решение проблем повышения их износостойкости, восстановления, а также разработки и внедрения эффективных технологий упрочнения и ремонта [1, 3].

Важнейшими факторами, определяющими эксплуатационную надежность вышеперечисленной техники, являются свойства материалов их рабочих поверхностей [10]. К свойствам этих поверхностей, в зависимости от условий их эксплуатации, предъявляют определенные требования по износостойкости, коррозионной стойкости, хладноломкости и др. Увеличение размеров оборудования, повышение его быстродействия и производительности сопровождаются ужесточением условий работы его узлов и механизмов.

Анализ практики мирового промышленного производства показывает, что для улучшения эксплуатационных показателей быстроизнашивающихся деталей и изделий в основном применяют различные виды наплавки, в том числе ручную дуговую металлическим электродом, полуавтоматическую и автоматическую дуговую порошковой проволокой или проволокой сплошного сечения с защитой дуги газом или флюсом, плазменно-порошковую, электрошлаковую, вибродуговую, газовую ручную, газовую автоматическую и др. [2, 4, 5, 13].

Исследования в указанном направлении особенно интенсивно выполнялись в 50–70-х годах двадцатого столетия. Безусловными лидерами данного направления исследований были ученые бывшего Советского Союза. Однако, если в исследовательских и производственных организациях Советского Союза основное внимание уделялось разработке новых технологических решений, созданию специализированного оборудования и материалов, то за рубежом – средствам механизации и автоматизации разработанных в СССР способов сварки и наплавки [11, 12].

Вместе с тем особенности ремонтного производства требовали нетрадиционного подхода при восстановлении и упрочнении быстроизна-

шивающихся деталей и изделий. Так, например, удаленность предприятий, использующих горнодобывающую технику: коронки рыхлителей, зубья ковшей и др., потребовала широкого применения ручной дуговой наплавки, как наиболее простого и эффективного способа ремонтно-восстановительной и упрочняющей обработки её рабочих поверхностей.

Как правило, ручная дуговая наплавка осуществлялась покрытыми электродами на постоянном токе. Вместе с тем выбор технологии наплавки и рецептурного состава материала покрытия для конкретных условий эксплуатации до сих пор является сложной научно-технической задачей, поскольку восстановленные детали с применением традиционных технологий на постоянном токе по сравнению с новыми расходными изделиями имели малый ресурс и быстро выходили из строя.

Частично её решение можно было бы осуществить путем изготовления деталей целиком из износостойкой легированной стали. Однако такой путь представляется экономически неоправданным в связи с трудностью обработки таких изделий и высокой себестоимостью изделия в целом. В целом к настоящему времени традиционные стационарные процессы сварки и наплавки (электродуговая, электрошлаковая, плазменная) практически исчерпали свои технологические возможности. Концентрация энергии сварочных источников нагрева не решила, да и не может решить многих проблем, в том числе проблемы производительности и улучшения качества сварки.

Наиболее перспективным направлением совершенствования технологий, позволяющих решать такие задачи, обладают импульсные технологии наплавки: плазменная, электрошлаковая, электродуговая [7–9].

Ранее на основе экспериментальных исследований было установлено, что наиболее эффективными методами упрочняющих покрытий на рабочие органы быстроизнашивающихся деталей являются адаптивные импульсные технологии наплавки, реализуемые специализированным оборудованием, имеющим блочно-модульный принцип построения, обеспечивающим возможность дозирования энергии, стабилизации мгновенных значений основных энергетических параметров процесса наплавки и контроля качества (стабильности) технологического процесса. По сравнению со стационарными адаптивные импульсные технологии наплавки обеспечивают [8]:

- управление процессами плавления, переноса и кристаллизации металла сварочной ванны при значительно меньших средних значениях тех-

нологических параметров (сварочный ток, дуговое напряжение, мощность отдельного микроцикла);

- увеличение скорости кристаллизации сварочной ванны вследствие нестационарного энергетического воздействия источника нагрева на сварочную ванну, уменьшающего температуру расплавленного металла;

- уменьшение степени деформационных процессов в наплавленных поверхностях; повышение качественных характеристик наносимого покрытия (однородности химического состава по всему объему покрытия и механических свойств).

Отмеченные достоинства достигаются направленной кристаллизацией сварочной ванны и усилением гидродинамических процессов в расплавленном металле, способствующим интенсивной дегазации сварочной ванны и равномерному распределению легирующих элементов по всему объему расплава.

При импульсно-дуговой наплавке на основной сварочный ток непрерывно горячей дуги налагают кратковременные импульсы тока, которые ускоряют перенос капель металла и позволяют контролировать размер переносимых капель. При наложении на дугу импульсов определенной энергии и частоты достигается управляемый перенос электродного металла с минимальным разбрызгиванием. Это позволяет осуществлять наплавку в различных пространственных положениях [6].

Важным достоинством импульсных процессов является возможность стабилизации мгновенных значений основных технологических параметров интервала плавления и переноса каждой капли электродного металла. Это становится возможным благодаря наличию каналов обратных связей, контролирующих состояние объекта управления по основным мгновенным значениям технологических параметров, несущим наибольшую информацию, например дуговому напряжению, сварочному току, средней мощности отдельного микроцикла, энергии, затраченной на плавление отдельной капли электродного металла [9].

Перечисленные преимущества легли в основу концепции широкого практического применения методов импульсно-дуговой наплавки. Однако поведение таких покрытий, особенно в специфических условиях эксплуатации при низких климатических температурах, до сих пор является мало изученным.

Цель работы: изучение свойств наплавленных покрытий методами адаптивной импульсно-дуговой наплавки электродами марки УОНИ 13/55 на изделиях быстроизнашивающегося оборудования землеройной, буровой, строи-

тельно-дорожной и горнодобывающей техники, работающей при низких климатических температурах.

Материалы и методы исследования

Для получения наплавленных слоев использовались сварочные аппараты «ДУГА-318М1» – для ручной дуговой сварки и наплавки на постоянном токе и инверторный источник питания «ФЭБ-315 МАГМА», реализующий адаптивный импульсно-дуговой режим сварки и наплавки, на модулированном. Электродуговую наплавку проб в восемь слоев в нижнем положении производили электродами марки УОНИ-13/55 $\varnothing$ 4 мм производства «Лосиноостровский электродный завод» на пластины размерами 120x80x18 мм. Марка стали наплаваемых пластин – СтЗсп.

Образец №1 наплавлен на постоянном токе, образец №2 получен с помощью импульсно-дуговой наплавки. Известно, что сварочные электроды марки УОНИ-13/55 предназначены для ручной дуговой сварки особо ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. По данным работы [7], наиболее эффективный частотный диапазон, обеспечивающий уменьшение структурных составляющих в зонах сварного соединения при сварке модулированным током низколегированных сталей, лежит в пределах от 1 до 2,5 Гц. В связи с этим импульсно-дуговая наплавка образцов произведена с частотой 1,67 Гц. Режимы электродуговой наплавки на постоянном и модулированном токах представлены в табл. 1 и 2. Показано, что импульсно-дуговая наплавка проведена с меньшей погонной энергией (на 17 %).

Т а б л и ц а 1

Режимы ручной дуговой наплавки образца №1 на постоянном токе

$I_{св}$, А	$U_{св}$, В	Время за один проход, с	Скорость сварки, м/ч	Погонная энергия, кДж/м
164	27,5	75	7,71	1916,75

Т а б л и ц а 2

Режимы импульсно-дуговой наплавки образца №2

$I_{и}$, А	$t_{и}$, А	$I_{п}$, А	$t_{п}$, А	$U_{св}$, В	Время за один проход, с	Скорость сварки, м/ч	Погонная энергия за один слой, кДж/м
200	0,2	50	0,4	25	90	6,00	1593,75

Химический состав основного и наплавленного металла образцов № 1 и 2 определен стационарным оптико-эмиссионным анализатором химического состава металлов и сплавов «Foundry-Master» по ГОСТ 18895-97. Металлографические исследования проводили с применением оптического микроскопа МЕТАМ РВ-21. Срезы образцов схематично были поделены на зоны 1,2,3,4 с соответствующими снимками микроструктур (рис. 1).

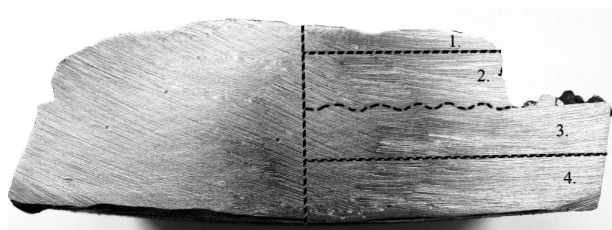


Рис. 1. Схема зон образца с наплавленным слоем

Исследование микротвердости осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г и продолжительности выдержки 10 с. Расстояние между отпечатками 300 мкм. Ударный изгиб образцов проведен с помощью инструментированного маятникового копра Amsler RKP 450 при температурах испытания ($-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). С наплавленных слоев металла были изготовлены образцы для ударного изгиба с V-образным надрезом по ГОСТ 6996-66 тип IX.

Результаты и обсуждение

Химический анализ показал, что содержание марганца в наплавленном металле образца № 1, выполненного ручной дуговой наплавкой на постоянном токе, меньше на 0,129 %, чем в наплавленном металле образца №2, выполненного с помощью импульсного режима наплавки (табл. 3). Это говорит о возможном выгорании марганца в результате более интенсивного нагрева и плавления наплавленного металла шва при ручной дуговой наплавке на постоянном токе.

Микроструктура металла верхнего слоя наплавки (зона 1) имеет литую ферритно-перлитную дендритную структуру и состоит из кристаллов столбчатой формы (рис.2). Кристаллизация металла шва протекала при одновременном его подогреве со стороны источника

тепла и быстром охлаждении за счет интенсивного теплоотвода в относительно холодный металл нижних слоев. Наблюдается крупнозернистая структура с ферритными образованиями иглообразной формы. Столбчатые образования



а



б

Рис. 2. Микроструктура наплавленных слоев зоны 1, выполненных НМТ (а) и НПТ (б), $\times 500$

в наплавленном слое, выполненном электродуговой наплавкой на постоянном токе (НПТ), имеют более грубую форму (рис.2, б), сплошные колонии феррита занимают большую площадь, чем феррит в шве, выполненном наплавкой на модулированном токе (НМТ) (рис. 2, а).

Металл в зоне 2 имеет ферритно-перлитную структуру, зерна феррита разоориентированы, имеют неправильную форму. Ферритные зерна наплавленного металла, выполненного НМТ (рис. 3, а), визуально мельче ферритных зерен образца №1, выполненного НПТ (рис. 3, б).

Т а б л и ц а 3

Химический состав наплавленного металла

Образец	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Ti
№1	98,6	0,0528	0,343	0,666	<0,003	0,0054	0,0581	0,0167	0,0543	0,0012	0,0131	0,0833	0,0052
№2	98,6	0,0522	0,382	0,795	<0,003	<0,003	0,0498	0,0095	0,0252	0,001	0,013	0,03	0,0028



а



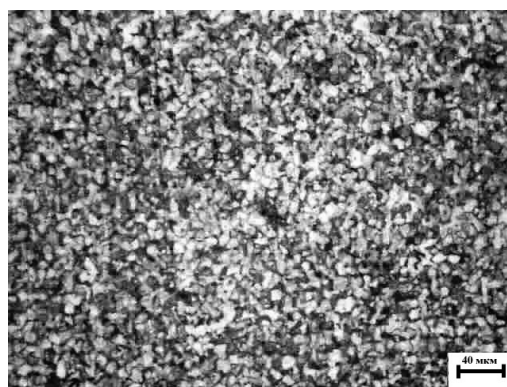
б

Рис. 3. Микроструктура зоны 2 образцов, выполненных НМТ (а) и НПТ (б), $\times 500$

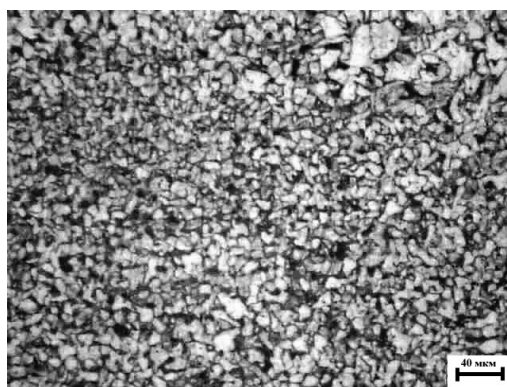
На участке нормализации в зоне термического влияния (ЗТВ) в процессе полной перекристаллизации в аустенит образовалась мелкозернистая (сорбитообразная) структура, которая обеспечивает более высокие механические свойства стали по сравнению со свойствами других участков зоны термического влияния. Местами наблюдаются крупные зерна феррита на структуре образца с наплавкой, выполненной при НПТ (рис.4, б).

На участке неполной перекристаллизации ЗТВ (рис. 5) процесс измельчения зерна происходил только за счет перекристаллизации той части структуры, которая занята была перлитом, а размер зерен феррита не изменился. Поэтому сталь на этом участке состоит не только из мелких зерен, но и отдельных крупных зерен феррита. Сталь с разнотернистым строением имеет более низкие механические свойства, чем мелкозернистая сталь.

Исследования микротвердости показали, что у образца №2, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, микротвердость варьирует от 2337 МПа в зоне столбчатых образований до 1611 МПа в зоне металла подложки. В зоне мелкого зерна наплавленного слоя выявлено значение микротвердости 1833 МПа. В зоне

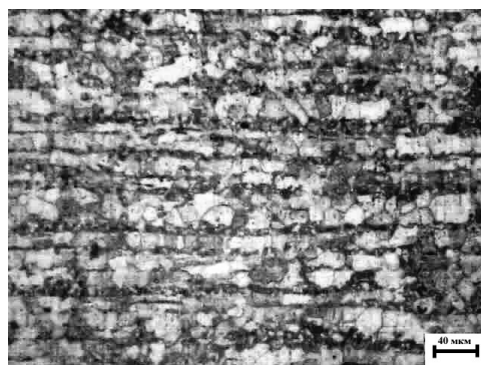


а

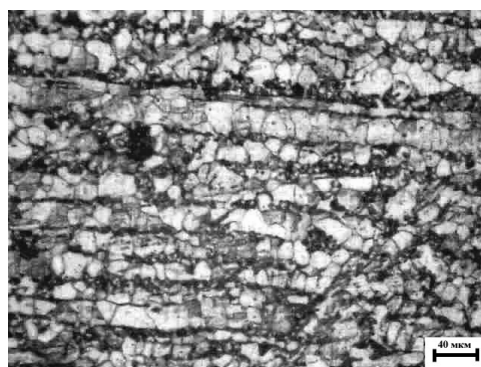


б

Рис. 4. Микроструктура зоны 3 образцов, выполненных НМТ (а) и НПТ (б), $\times 500$



а



б

Рис. 5. Микроструктура зоны 4 образцов, выполненных НМТ (а) и НПТ (б), $\times 500$

столбчатых образований наплавленного слоя, полученного ручной дуговой наплавкой на постоянном токе, микротвердость имеет значение 3080 МПа, что говорит о значительном перегреве металла. В зоне мелкого зерна наплавленного металла выявлено значение микротвердости 1640 МПа (рис. 6).

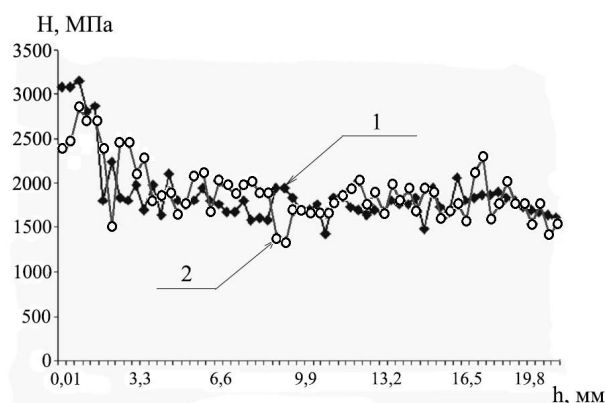


Рис. 6. Распределение микротвердости по толщине наплавленных слоев: 1 – НПТ; 2 – НМТ

По результатам ударных испытаний показано, что средние значения ударной вязкости (KCV) наплавленного металла электродов марки УОНИ-13/55, полученных импульсно-дуговой наплавкой (НМТ) при комнатной температуре (20 °С) больше примерно на 7,5 %, а при отрицательной температуре (–60 °С) на 21,5 %, чем после ручной дуговой наплавки на постоянном токе (НПТ) (рис. 7).

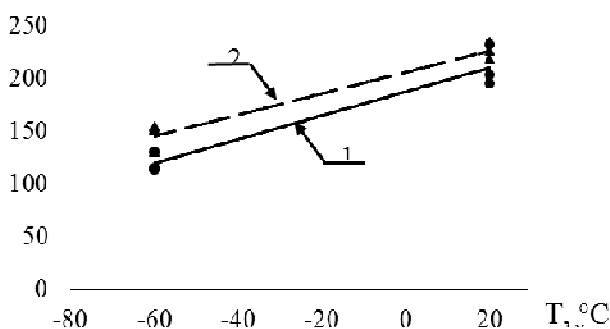


Рис. 7. Зависимость ударной вязкости образцов наплавленного металла от температуры: 1 – НПТ; 2 – НМТ

Выводы

1. Химический анализ наплавленных слоев показал, что содержание марганца в наплавленном металле образца № 1 после ручной дуговой наплавки на постоянном токе меньше на 0,129 %, чем в образце № 2, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, что говорит о более интенсивном выгорании марганца при ручной дуговой наплавке на постоянном токе.

2. Металлографический анализ наплавленных слоев показал, что микроструктура столб-

чатых образований на поверхностных наплавленных слоях, полученных ручной дуговой наплавкой на постоянном токе, имеет более грубую форму, сплошные колонии феррита занимают большую площадь, чем феррит в шве, выполненном наплавкой на модулированном токе. В нижних наплавленных слоях ферритные зерна наплавленного металла, выполненного модулированным током, визуально мельче ферритных зерен образца № 1. Таким образом, наплавленный металл, полученный импульсно-дуговой наплавкой, имеет более мелкозернистую структуру, чем после наплавки на постоянном токе.

3. Разброс данных распределения микротвердости наплавленного слоя, выполненного импульсно-дуговой наплавкой, имеет более сглаженный вид по сравнению с наплавкой на постоянном токе.

4. Ударная вязкость наплавленного металла электродов марки УОНИ-13/55, полученных импульсно-дуговой наплавкой, выше, чем после наплавки на постоянном токе.

Работа выполнена в соответствии с заданием и финансированием НИИР по госконтракту № 48 от 20.10.2014 г. РС(Я) «Разработка сварочных материалов и технологий их применения при наплавке на изделия, работающие в условиях взаимодействия с мерзлыми грунтами при климатически низких температурах (до –60 °С)».

Литература

1. Винокуров Г.Г., Яковлева С.П., Кычкин А.К. и др. Изменение структуры и изнашивание породоразрушающего элемента бульдозера при эксплуатации в условиях Севера // *Металлы*. – 2009. – №5. – С. 74–80.
2. Воронников В.Я., Артеменко Ю.А., Иванов С.В., Калуцкий В.В. Технология объемного упрочнения зубьев ковшей экскаваторов // *Сварочное производство*. – 1979. – № 3. – С. 9–10.
3. Голощапов Г.А., Лиошенко В.И., Володарец В.А., Поляков В.О. Разработка методов по упрочнению изношенных деталей транспортных средств // *Материалы 64-й научн.-техн. конф. ГОУ «СибАДИ» в рамках юбилейного Межд. конгресса «Креативные подходы в образовательной, научной и производственной деятельности»*. – Омск, 2010. – С. 7–11.
4. Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н., Морозкин И. С. Прогрессивные технологии восстановления деталей подвижного состава железных дорог // *Сварочное производство*. – 2008. – № 1. – С. 21–24.
5. Каленский В. К., Гладкий П. В., Фрумин И. И. Исследование и разработка способа автома-

тической наплавки выпускных клапанов автомобилей // Автоматическая сварка. – 1963. – № 1. – С. 15–23.

6. Ларионов В.П., Слепцов О.И., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера // Вестник Академии военных наук. – 2008. – №3. – С.67–69.

7. Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. Влияние энергетических параметров процессов сварки на структуру и свойства зон сварных соединений низколегированных сталей // Сварочное производство. – 2012. – №8. – С.3–5.

8. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: Наука, 1994. – 108 с.

9. Сараев Ю.Н. Управление переносом электрода металла при дуговой сварке с корот-

кими замыканиями дугового промежутка // Автоматическая сварка. – 1988. – №12. – С.16–23.

10. Хасуи А. Наплавка и напыление / Хасуи А. и Моригаки О. Пер. с японского В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

11. Herman A. Nied, Radhakisan S. Baheti Arc welding process control sistem / United States Patent # 4,613,743. Date of Patent: Sep. 23, 1986.

12. Tobias Rosado, Pedro Almeida, Inês Pires, Rosa Miranda and Luísa Quintino INNOVATIONS IN ARC WELDING / Procedimento Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Congresso de Engenharia de Moçambique, Mozambique, Maputo, 2–4 Setembro 2008. – P. 1–18. Artigo REF: 44A004.

13. Zuchowski R.S., Culbertson R.P. Plasma arc weld surfacing // Welding Journal. – 1962. – Vol. 41, № 6. – P. 548–555.

Поступила в редакцию 28.07.2015