

DOI: 10.15593/2224-9877/2017.3.06

УДК 621.785.545

**Ю.Д. Шицын¹, Д.С. Белинин¹, С.Д. Неулыбин¹, И.Л. Синани¹,
С.А. Терентьев¹, В.С. Верхорубов²**

¹ Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

² ПАО «Протон-ПМ», Пермь, Россия

ПЛАЗМЕННАЯ ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА СТАЛИ 38Х2Н2МА НА ТОКАХ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Развитие современной промышленности направлено на повышение технологических свойств изделий. Многие параметры изделия в основном определяет состояние поверхностного слоя материала, из которого оно изготовлено. Повышение твердости поверхностного слоя при уникальных характеристиках сердцевины позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий и расширить область применения стали 38Х2Н2МА. В работе приведены результаты исследования финишной плазменной поверхностной закалки стали 38Х2Н2МА на токах прямой и обратной полярности. Подобраны режимы закалки, исключаящие подплавление обрабатываемой поверхности. Проведены исследования четырех вариантов плазменной поверхностной закалки, включая обработку со сканированием и обработку в режиме закрытой дуги. Приведены результаты измерения геометрических характеристик и твердости полученных упрочненных слоев. Показана возможность получения упрочненных слоев твердостью до 52 HRC. Проведены исследования макро- и микроструктуры полученных упрочненных слоев с использованием световой микроскопии. Проанализированы особенности структурообразования в упрочненных по различным вариантам слоях. Установлено, что при обработке на токе прямой полярности без сканирования происходит образование бейнитной структуры как в закаленной, так и в переходной зонах. При обработке на токе обратной полярности происходит образование мартенситной структуры различной дисперсности в закаленной зоне, структура переходной зоны представляет собой сорбит или троостит отпуска в зависимости от варианта обработки. Отмечено отсутствие литой структуры в поверхностном слое при обработке по представленным вариантам. Показана возможность получения упрочненных слоев глубиной до 1,7 мм и шириной до 24 мм в варианте финишной плазменной обработки без значительного изменения шероховатости поверхности.

Ключевые слова: хромникельмолибденовые стали, плазма, плазменная поверхностная закалка, твердость, микроструктура, прямая полярность тока, обратная полярность тока, упрочняющие технологии, закалочные структуры, металлографические исследования.

**Yu.D. Shitsyn¹, D.S. Belinin¹, S.D. Neulybin¹,
I.L. Sinani¹, S.A. Terentyev¹, V.S. Verkhorubov²**

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Public Proton Joint Stock Company, Perm, Russian Federation

THE COMPARISON RESEARCH OF PLASMA SURFACE HARDENING OF 34CrNiMo6 STEEL PRODUCED ON DIRECT POLARITY AND REVERSED POLARITY CURRENT

The development of modern industry is aimed at improving the technological properties of products. Many product parameters basically determine the state of the surface layer of the material from which it is made. Increasing the hardness of the surface layer with unique core characteristics will significantly improve the performance characteristics of products and expand the field of application of 34CrNiMo6 steel. The paper presents the results of a study of the surface plasma hardening of 34CrNiMo6 steel on direct and reverse polarity currents. The modes of quenching are selected, which exclude fusion of the surface to be treated. Four studies of plasma surface quenching, including processing with scanning and processing in closed arc mode, were carried out. The results of measuring the geometric characteristics and hardness of the hardened layers obtained are given. The possibility of obtaining hardened layers with a hardness of up to 52 HRC is shown. The macro- and microstructure of the hardened layers obtained using light microscopy was studied. The features of structure formation in layers hardened in different variants are analyzed. It is established that when processing on a direct polarity current without scanning, a bainite structure is formed both in the hardened and in the transition zones. When processing on a reverse polarity current, a martensitic structure of different dispersity is formed in the hardened zone, the structure of the transition zone is sorbitol or release troposit, depending on the treatment option. It is shown that there is no cast structure in the surface layer when processing according to the presented variants. It is shown that it is possible to obtain hardened layers with a depth of 1.7 mm and a width of up to 24 mm in the finish plasma treatment without significant changes in the surface roughness.

Keywords: chrome nickel molybdenum steel, plasma, plasma surface hardening, hardness, microstructure, direct current polarity, reverse polarity of current, strengthening technologies, quenching structures, metallographic studies.

Современная промышленность предъявляет повышенные требования к работоспособности изделий и свойствам материалов, из которых они изготовлены. Решение вопросов повышения надежности, экономичности и ресурса выпускаемых деталей и узлов машин, агрегатов, ответственных конструкций требует применения материалов, способных работать в различных агрессивных средах, в условиях высокого перепада температур и давлений, повышенных вибраций при переменных контактных, ударных, статических нагрузках и т.д. [1, 2]. Многие параметры изделия в основном определяет состояние поверхностного слоя материала, из которого оно изготовлено.

Для изготовления ответственных, тяжело нагруженных конструкций (тяжелонагруженные валы, зубчатые колеса, коленчатые валы, шатуны и другие детали автомобиле- и станкостроения) используется качественная сталь 38Х2Н2МА – конструкционная хромоникельмолибденовая легированная [3]. Химический состав и механические свойства стали приведены ниже.

Химический состав стали 38Х2Н2МА:

Содержание элементов, %									
C	Si	Cu	Mn	Ni	P	Cr	Mo	V	Ti
0,33–0,40	0,17–0,37	0,30	0,25–0,50	1,30–1,70	≤0,025	1,30–1,70	0,20–0,30	≤0,03	0,03

Механические свойства стали 38Х2Н2МА: предел прочности $\sigma_B = 1080$ МПа; предел текучести $\sigma_T = 930$ МПа; относительное удлинение $\delta = 12$ %; относительное сужение $\psi = 50$ %; ударная вязкость КСЧ = 780 кДж/м; твердость по ГОСТ 4543–71 НВ 26.

Сталь 38Х2Н2МА относится к категории улучшаемых сталей. Закалку таких сталей обычно проводят в масле в сочетании с высоким отпуском. Температура закалки составляет 820–850 °С. Температура отпуска составляет 550–650 °С. После термообработки стали рассматриваемой группы имеют структуру сорбитного типа, хорошо воспринимающего ударные нагрузки. Для полученной структуры характерно существенное повышение предела прочности при растяжении и ударной вязкости и почти полное (90–95 %) устранение всех внутренних напряжений. Наличие молибдена в рассматриваемой стали позволяет достичь уменьшения отпускной хрупкости в два раза. Данная сталь после улучшения обладает большим запасом вязкости при пониженной температуре эксплуатации [4]. Сталь теплоустойчивая, обеспечивает высокую работоспособность конструкций при вибрационных и динамических нагрузках в диапазоне температур –70...+450 °С.

Многие детали из улучшаемых сталей работают в условиях поверхностного износа. Сопротивление износу обеспечивает высокая твердость, но после высокого отпуска твердость стали составляет 26–28 HRC. Повышение твердости поверхностного слоя при уникальных характеристиках сердцевины позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики изделий и расширить области применения стали 38Х2Н2МА.

При выборе технологии поверхностной термообработки необходимо помнить о пониженной обрабатываемости резаньем. Оптимальным вариантом является финишное упрочнение, после которого не требуется механическая обработка поверхностного слоя.

Целью работы являлся поиск технологии финишной поверхностной закалки стали 38Х2Н2МА без оплавления поверхностного слоя.

Большие возможности для достижения поставленной цели имеются у плазменной поверхностной термической обработки. Наибольшее распространение для финишного поверхностного упрочнения получила плазменная обработка непереносной дугой (плазменной струей) [5]. При определенных преимуществах (плазменная струя электрически не связана с обрабатываемым изделием, что существенно расширяет диапазон обрабатываемых материалов, возможность обработки без подплавления поверхностного слоя) такая технология имеет ряд существенных недостатков (низкий эффективный КПД нагрева поверхности, высокая тепловая нагрузка на плазмотрон; невысокие скорости нагрева и охлаждения поверхности изделия, необходимость применения специализированных источников питания с повышенным напряжением холостого хода) [6–8].

Плазменная поверхностная термическая обработка дугой прямого действия позволяет повысить производительность обработки и в широких пределах регулировать глубину упрочненного слоя. При работе плазмотрона на токе прямой полярности распределение мощности по пятну нагрева подчиняется закону нормального распределения Гаусса. При таком распределении максимальная мощность сосредоточена в центре пятна нагрева и при достаточных значениях тока дуги вызывает подплавление обрабатываемой поверхности, что при финишной обработке недопустимо.

В отличие от плазменной дуги прямой полярности плазменная дуга обратной полярности характеризуется более равномерным распределением тепловой мощности по поверхности изделия. Достигается это следующим образом: при работе плазмотрона в режиме дуги прямого действия обратной полярности обрабатываемое изделие является холодным катодом, а дуга относится к типу дуг с нестационарными катодными пятнами, блуждающими по его поверхности. Одной из отличительных особенностей нестационарных пятен является кратковременность их существования и большая плотность тока в них

($j \approx 10^5\text{--}10^6$ А/см²), при этом удельные тепловые потоки достигают значений $q \approx 10^6\text{--}10^7$ Вт/см², таким образом получаются необходимые для поверхностной закалки скорости нагрева и охлаждения [9].

Задачей первого этапа работы было определение режимных параметров финишного упрочнения методом плазменной поверхностной закалки без оплавления поверхности дугой прямого действия на токе прямой и обратной полярности, обеспечивающих упрочнение изделий из стали 38Х2Н2МА. Следующей задачей было определение оптимального варианта плазменной поверхностной закалки с точки зрения получения наилучших характеристик закаленного слоя при отсутствии его подплавления.

В качестве рабочего инструмента использовался универсальный плазмотрон, разработанный на кафедре сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета. Плазмотрон обеспечивает устойчивую работу на токах прямой и обратной полярности в широком диапазоне изменения параметров процесса плазменного упрочнения [10–12].

Были выбраны следующие варианты обработки:

- 1) плазменная закалка на токе обратной полярности с линейным перемещением плазмотрона;
- 2) плазменная закалка на токе обратной полярности с использованием закрытой дуги (рис. 1);
- 3) плазменная закалка на токе прямой полярности;
- 4) плазменная закалка на токе прямой полярности с поперечными колебаниями плазмотрона.

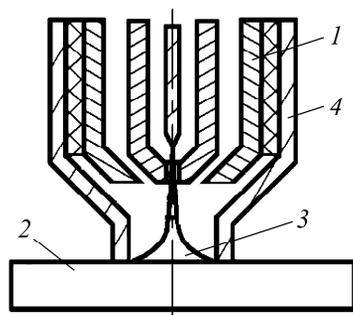


Рис. 1. Схема закрытой плазменной дуги: 1 – плазмотрон; 2 – изделие; 3 – плазменная дуга; 4 – защитная камера

Основные технологические параметры процесса плазменной поверхностной закалки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры плазменной поверхностной закалки

Режимы упрочнения	Ток дуги, А	Расход защит. газа, л/мин	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Скорость обработки, м/ч	Поперечные колебания	Режим закрытой дуги
Плазменная закалка на токе обратной полярности	140	4,5	2,5	16	-	-
	160	4,5		25	-	+
Плазменная закалка на токе прямой полярности	120	4,5	2,5	12	+	-
	140	4,5		20	-	-

Вид поверхности образца с закаленными по приведенным в табл. 1 технологическим режимам дорожками представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид закаленных дорожек

На поверхности закаленных дорожек наблюдается образование цветов побежалости. Шероховатость поверхности образцов, полученных с использованием токов как прямой, так и обратной полярности, идентична неупрочнявшейся поверхности. Следовательно, дальней-

шая механическая обработка поверхности не требуется, а устранение цветов побежалости возможно при необходимости полировкой поверхности.

Измерения твердости и геометрических характеристик упрочненного слоя (табл. 2), показывают высокую эффективность выбранных вариантов плазменной обработки.

Таблица 2

Результаты измерений

Номер образца	Глубина слоя, мм	Ширина дорожки, мм	Твердость НВ	Твердость НРС
1	1,3	14	512	52
2	1,1	23,8	321	35
3	1,4	16,9	477	49
4	1,4	23,6	404	40

Примечание. Твердость стали при объемной закалке составляет НВ 280, в состоянии поставки – НВ 220.

Исследования микроструктур упрочненных слоев, проведенные с помощью световой микроскопии, позволили установить следующее (рис. 3–6). На всех образцах прослеживается сложная структура, представляющая собой последовательную смену закаленной зоны, переходной зоны и основного металла. Подплавление поверхности отсутствует на всех образцах. Микроструктура основного металла представляет собой феррито-перлитную смесь (рис. 3–6, *г*). Кроме того, следует отметить, что в основном металле наблюдаются характерные полосы и выделения сульфидов, связанные с особенностями состояния поставки материала (ковка/прокатка).

Закаленная зона образцов № 1 и № 2 представляет собой мартенситную структуру различной дисперсности (рис. 3, 4, *б*). Структура переходной зоны образца № 1 представляет собой феррито-карбидную смесь сорбитного типа (рис. 3, *в*). Структура переходной зоны образца № 2 представляет собой троостит отпуска (рис. 4, *в*). В структуре основного металла вблизи переходной зоны также заметны локальные выделения карбидов, предположительно хрома.

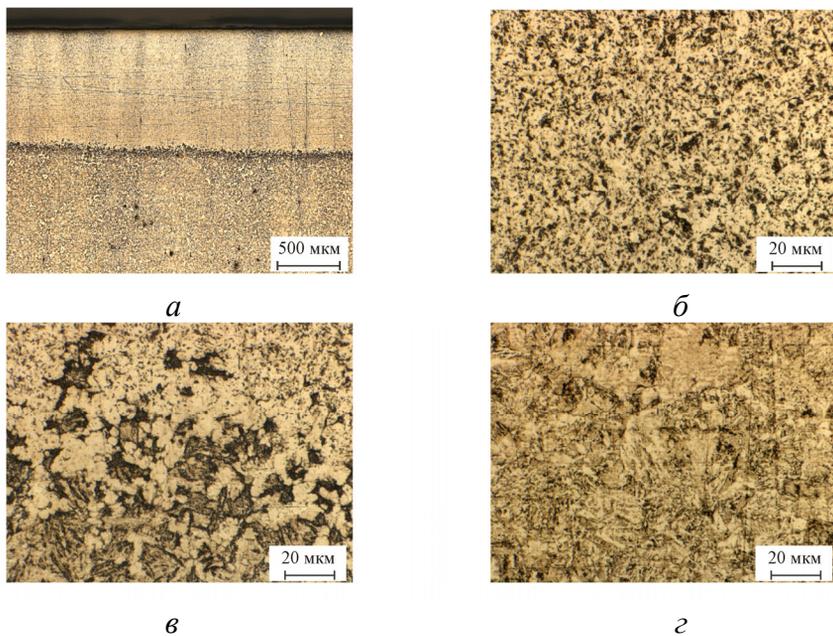


Рис. 3. Вид макро- и микроструктуры закаленной дорожки № 1: *a* – макроструктура; *б* – зона закалки; *в* – переходная зона; *г* – основной металл

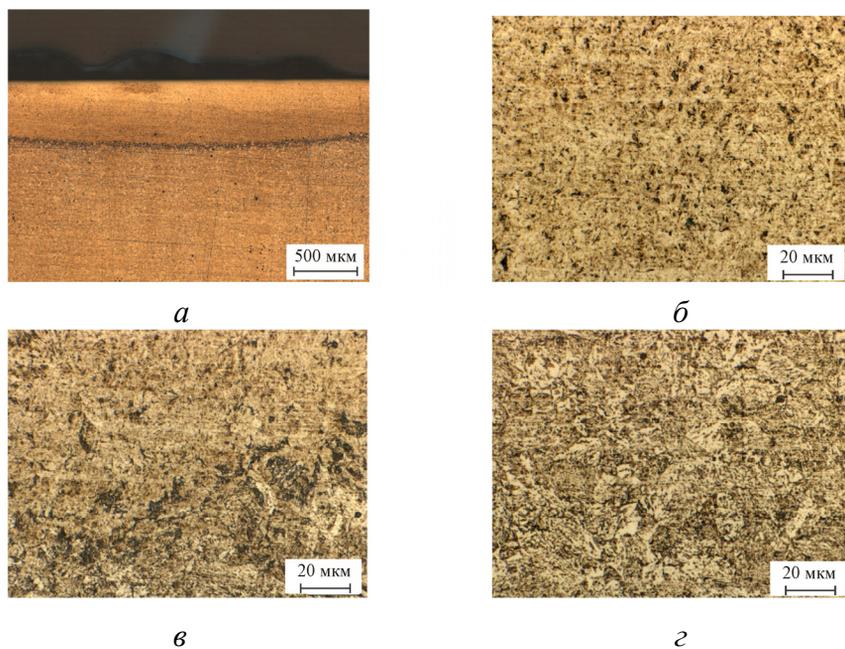


Рис. 4. Вид макро- и микроструктуры закаленной дорожки № 2: *a* – макроструктура; *б* – зона закалки; *в* – переходная зона; *г* – основной металл

В закаленной зоне образцов № 3, № 4 наблюдается преимущественно бейнитно-мартенситная структура (рис. 5, б, *б*), что характерно для плазменной обработки на токе прямой полярности, вследствие максимальной температуры в центре пятна нагрева поверхности. В переходной зоне образца № 3 происходит формирование структуры бейнита отпуска (рис. 5, *в*). В переходной зоне образца № 4 происходит образование структуры троостита отпуска с небольшими выделениями феррита, что можно связать с термическим циклом нагрева, полученным в результате сканирования поверхности (рис. 6, *в*). В переходной зоне и основном металле заметны локальные выделения карбидов.

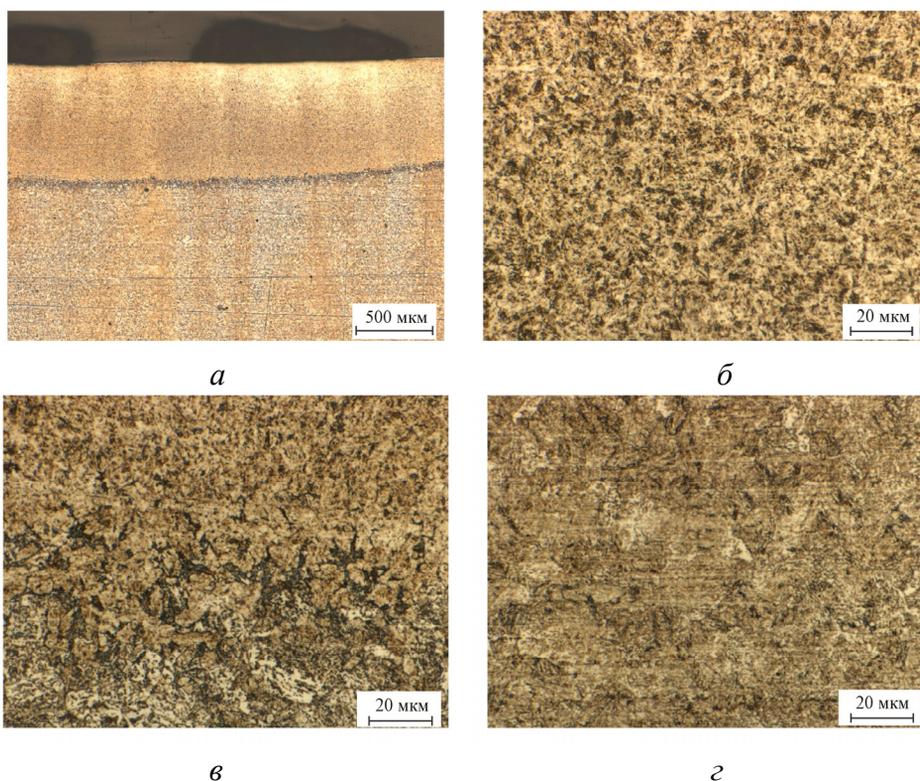


Рис. 5. Вид макро- и микроструктуры закаленной дорожки № 3:
а – макроструктура; *б* – зона закалки; *в* – переходная зона;
г – основной металл

Плазменная закалка на токе прямой полярности без сканирования поверхности (рис. 2, поз. 3) позволяет получать упрочненные слои глубиной до 1,3 мм без оплавления поверхности и шириной закаленной

дорожки в 14 мм за один проход. Использование варианта со сканированием поверхности (рис. 2, поз. 4) позволяет увеличить ширину закаленной дорожки примерно в 1,5 раза за один проход, однако при этом происходит увеличение глубины упрочненного слоя и снижение твердости упрочненного слоя вследствие снижения скоростей охлаждения.

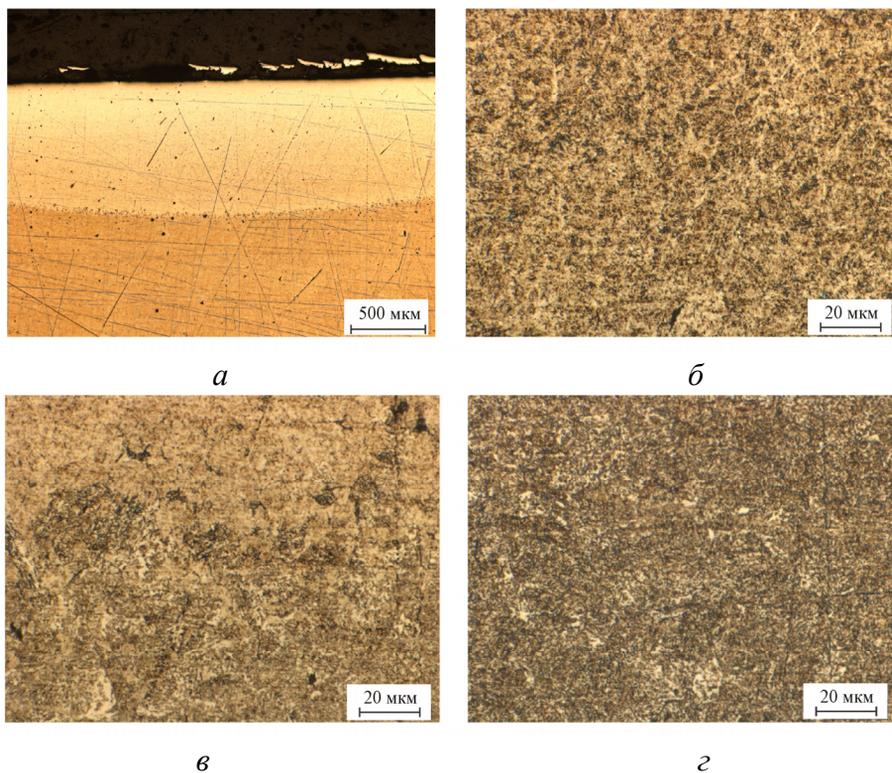


Рис. 6. Вид макро- и микроструктуры закаленной дорожки № 4:
а – макроструктура; *б* – зона закалки; *в* – переходная зона;
г – основной металл

Использование обратной полярности благодаря широким возможностям регулирования мощности сжатой дуги и тепловложения в обрабатываемое изделие позволяет получать упрочненные слои достаточной ширины и глубины без применения сканирующих механизмов (рис. 2, поз. 1, 2).

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

– Показана возможность финишной плазменной поверхностной закалки дугой прямого действия на токе прямой и обратной полярности в вариантах со сканированием и без сканирования и в режиме открытой и закрытой дуги.

– Максимальная твердость закаленной поверхности 52 HRC достигается при плазменной закалке на токе обратной полярности с использованием открытой дуги, ширина закаленной дорожки составляет 14 мм, глубина 1,3 мм.

– Установлено, что применение плазменной дуги обратной полярности способствует снижению риска образования бейнитной структуры в закаленной зоне.

– Использование плазменной дуги прямой полярности позволяет получать упрочненные слои твердостью 49 HRC глубиной до 1,5 мм без оплавления поверхности и шириной 14 мм, однако при таком варианте обработки происходит образование бейнитной структуры, что сдерживает применение такого варианта обработки в условиях ударных и циклических нагрузок.

– Использование сканирования плазменной дуги позволяет увеличить ширину упрочненной зоны до 20 мм за один проход, однако значение твердости при этом снижается до 40 HRC. Использование же закрытой плазменной дуги обратной полярности позволяет получать слои шириной до 24 мм за один проход без сканирования поверхности со схожими значениями твердости.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания (проект № 9.9697.20178.9) и гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук МК-3120.2017.8.

Список литературы

1. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л., Мазунин В.М. Упрочнение металлических изделий с использованием импульсно-плазменной технологии // Сварщик в России. – 2007. – № 1. – С. 48–52.
2. Сафонов Е.Н., Журавлев В.И. Поверхностное упрочнение железуглеродистых сталей дуговой закалкой // Сварочное производство – 1997. – № 10. – С. 30–32.
3. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.

4. *Металловедение и термическая обработка стали. Справочник: в 3 т. / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадт. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 352 с*
5. Сафонов Е.Н. Новые материалы и технологические процессы для продления ресурса прокатных валков / Нижнетагил. технол. ин-т (филиал) УГТУ–УПИ. – Н. Тагил, 2005. – С. 275.
6. Влияние технологии поверхностного упрочнения высококонцентрированным источником нагрева на структуру и трещиностойкость наплавленного металла и углеродистых сталей / Л.К. Лещинский [и др.] // *Сварочное производство*. – 1987. – № 5. – С. 3–5.
7. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский [и др.]. – Киев: Техника, 1990. – 109 с.
8. Щицын В.Ю., Язовских В.М., Щицын Ю.Д. О тепловых нагрузках на сопло плазмотрона при работе на прямой и обратной полярности // *Сварка Урала – 2001: сб. тез. юбилейной 20-й НТК сварщиков Урала*. – Н. Тагил, 2001. – С. 21.
9. Щицын Ю.Д., Косолапов О.А., Струков Н.Н. Распределение энергии сжатой дуги при работе плазмотрона на токе обратной полярности // *Сварка и диагностика*. – 2010. – № 3. – С. 13–16.
10. Технологические варианты плазменной закалки на токе обратной полярности / Д.С. Белинин, Ю.Д. Щицын, П.С. Кучев, Н.Н. Струков // *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 3–2. – С. 99–104.
11. Упрочнение рабочих поверхностей изделий методом плазменной поверхностной закалки на токе обратной полярности / Д.С. Белинин, Ю.Д. Щицын, П.С. Кучев, С.Д. Неулыбин // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке / Иж. гос. техн. ун-т. – Ижевск, 2013. – С. 20–25*.
12. Ablyaz T.R., Belinin D.S. Wire electrical discharge machining of items after plasmatic surface hardening // *Middle-East Journal of Scientific Research*. – 2014. – P. 1094–1098.

References

1. Tiurin Iu.N., Zhadkevich M.L., Mazunin V.M. Uprochnenie metallicheskih izdelii s ispol'zovaniem impul'sno-plazmennoi tekhnologii [Hardening of metal products with use of pulse and plasma technology]. *Svarshchik v Rossii*, 2007, no. 1, pp. 48–52.
2. Safonov E.N., Zhuravlev V.I. Poverkhnostnoe uprochnenie zhelezouglerodistykh stalei dugovoi zakalkoi [Superficial hardening zhelezouglerodistykh staly arc training]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1997, no. 10, pp. 30–32.
3. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Iu.G. Spetsial'nye stali [Special became]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p.
4. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka stali [The metallurgical science and heat treatment became]. Spravochnik: v 3 tomah. Ed. M.L. Bernshteina, A.G. Rakhshadt. 3rd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 352 p.*
5. Safonov E.N. Novye materialy i tekhnologicheskie protsessy dlia prodleniia resursa prokatnykh valkov [New materials and technological processes for extension of a resource of rolling rolls]. Nizhnetagil'skii tekhnologicheskii institut (filial) Ural'skii Gosu-

darstvennyi Tekhnicheskii Universtet–Ural'skii Politekhnikeskii Institut. Nizhnii Tagil, 2005, 275 p.

6. Leshchinskii L.K. et al. Vliianie tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniia vysokokontsentririvannym istochnikom nagreva na strukturu i treshchinostoikost' naplavlennogo metalla i uglerodistykh stalei [Influence of technology of superficial hardening by the high-concentrated heating source on structure and crack resistance of the built-up metal and carbonaceous staly]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 1987, no. 5, pp. 3–5.

7. Leshchinskii L.K. et al. Plazmennoe poverkhnostnoe uprochnenie [Plasma superficial hardening]. Kiev: Tekhnika, 1990, 109 p.

8. Shchitsyn V.Iu., Iazovskikh V.M., Shchitsyn Iu.D. O teplovykh nagruzkakh na soplo plazmotrona pri rabote na priamoi i obratnoi poliarnosti [About thermal loads of a plasmatron nozzle during the work on direct and return polarity]. *Svarka Urala*. 2001: sbornik tezisov iubileinoi 20-i Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii svarshchikov Urala. Nizhnii Tagil, 2001, 21 p.

9. Shchitsyn Iu.D., Kosolapov O.A., Strukov N.N. Raspredelenie energii szhatoi dugi pri rabote plazmotrona na toke obratnoi poliarnosti [Distribution of energy of the compressed arch during the work of a plasmatron on current of the return polarity]. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 3, pp. 13–16.

10. Belinin D.S., Shchitsyn Iu.D., Kuchev P.S., Strukov N.N. Tekhnologicheskie varianty plazmennoi zakalki na toke obratnoi poliarnosti [Technological options of plasma training on current of the return polarity] *Fundamental'nye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2012, no. 3–2, pp. 99–104.

11. Belinin D.S., Shchitsyn Iu.D., Kuchev P.S., Neulybin S.D. Uprochnenie rabochikh poverkhnostei izdelii metodom plazmennoi poverkhnostnoi zakalki na toke obratnoi poliarnosti [Hardening of working surfaces of products by method of plasma superficial training on current of the return polarity]. *Molodye uchenye – uskoreniiu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke. Izhevskii. gosudarstvennyi tekhnicheskii. universitet*. Izhevsk, 2013, pp. 20–25.

12. Ablyaz T.R., Belinin D.S. Wire electrical discharge machining of items after plasmatic surface hardening. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, pp. 1094–1098.

Получено 4.07.2017

Об авторах

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Белинин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Синани Игорь Лазаревич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Терентьев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Верхорубов Вадим Сергеевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, инженер-технолог ООО «Протон-ПМ»; e-mail: v.verkhorubov@mail.ru.

About the authors

Yuri D. Shitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Dmitry S. Belinin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: 5ly87@mail.ru.

Sergey D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Researcher, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Igor L. Sinani (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Sergey A. Terentyev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production, Metrology and Technology of Materials, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Vadim S. Verkhorubov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Engineer-Technologist, Public Proton Joint Stock Company; e-mail: v.verkhorubov@mail.ru.