

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.3.05

УДК 621.9.048+621.785.5

О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин

Нижнетагильский технологический институт (филиал)
Уральского федерального университета им. первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Нижний Тагил, Россия

ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Процесс электроискровой цементации, в отличие от традиционной химико-термической обработки, эффективен для обработки крупногабаритных изделий и поверхностей. Способ электроискровой цементации существенно снижает энергоемкость процесса, повышает производительность. Отсутствие длительных выдержек при высоких температурах не приводит к росту зерна аустенита. Такие характеристики закаленного слоя, как степень науглероживания и его глубина, могут быть увеличены при реализации процесса в поле ультразвуковых колебаний. Обработка ультразвуком основного металла в процессе электроискрового легирования представляет собой актуальную, однако непростую задачу для исследователей. В данной статье реализована резонансная схема введения ультразвуковых колебаний с образованием стоячей ультразвуковой волны.

Наибольшее увеличение степени цементации обнаружено в области узла колебаний стоячей ультразвуковой волны, где циклические растяжения и сжатия способствуют увеличению доли избыточных фаз. Существенно увеличивается интенсивность линий цементита и аустенита. Хорошо идентифицируется мартенситный дублет. Содержание углерода в мартенсите, оцененное по соотношению d/a , составило 0,78 мас. %. Степень развития диффузионных процессов, определяющая глубину цементированного слоя и размеры переходной зоны, максимальна в области пучности ультразвуковых колебаний, где под действием колебаний наблюдается наибольшее динамическое смещение частиц подложки. Дисперсность структурных составляющих основного металла также увеличивает глубину упрочненного слоя. В сочетании с ультразвуковым воздействием на образцах после нормализации и закалки она достигает значений $(0,10 \pm 0,02)$ мм.

В статье представлены результаты металлографии и рентгеноструктурного фазового анализа, исследовано содержание углерода в поверхностных слоях, распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев при различных способах предварительной термической обработки.

Ключевые слова: электроискровое легирование, химико-термическая обработка, цементация, ультразвуковые колебания, резонансная схема, рентгеновский фазовый анализ, поверхностный слой, мартенсит, цементит, аустенит, поверхностное упрочнение, диффузия, глубина цементации, микроструктура, микротвердость.

O.I. Shevchenko, G.E. Trekin

Nizhny Tagil Technology Institute (department) of Ural Federal University
named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Nizhny Tagil, Russian Federation

PROCESS ELECTRIC-SPARK CARBURIZING IN AN ULTRASONIC FIELD

Process electric-spark carburizing effective for the treatment of large products and surfaces, as opposed to traditional chemical-thermal treatment. Method electric-spark carburizing considerably reduces energy consumption of the process, increasing productivity. Absence of long exposures at high temperatures does not lead to austenite grain growth. Characteristics of the hardened layer (the degree of carburizing and depth) may be extended during the process in the field of ultrasonic oscillations. Ultrasonic treatment of the base metal during the electric-spark alloying or electric-spark carburizing process, is a hot research topic; however, it is hard to introduce ultrasound into working area. In this paper, the resonant method of introduction of ultrasonic oscillations with formation of a standing ultrasonic wave was realized.

The greatest increase in the degree of carburizing was found in the node of the standing wave of ultrasonic vibration wherein the cyclic tension and compression help to increase the proportion of excessive phases. Significantly increased the intensity of the lines of cementite and austenite. Well identified martensitic doublet. The content of carbon in the martensite, estimated by the ratio of d/a was 0.78 wt%. The degree of diffusion processes, which determines the depth and dimensions of the carburized layer and transitional zone in turn is maximum in an antinode of the ultrasonic wave, where under the action of vibrations has the highest dynamic displacement of the particles of the substrate. The high dispersion of the structural components of the base metal also increases the depth of the carburizing the surface layer. In combination with ultrasound treatment on samples after normalizing and hardening it reaches values of 0.10 ± 0.02 mm.

The paper presents the results of X-ray phase analysis, the carbon content in the surface layers, metallography, depth distribution of microhardness hardened layers at different pre-heat treatments.

Keywords: electric-spark alloying, thermochemical treatment, carburizing, ultrasonic waves, resonant method, x-ray phase analysis, surface layer, martensite, cementite, austenite, surface hardening, diffusion, carburization depth, microstructure, microhardness.

Цементацию широко применяют в промышленности для повышения твердости и износостойкости поверхности изделий с сохранением вязкости их сердцевины. Традиционные и хорошо изученные способы цементации в твердом карбюризаторе, жидкой среде, газовая цементация, несмотря на широкое распространение, имеют ряд существенных недостатков: длительность процесса, высокая температура, приводящая к росту зерна аустенита, а следовательно, необходимость дополнительной термической обработки [1–3]. Значительную технологическую сложность представляет процесс химико-термической обработки крупногабаритных деталей и инструмента деформации [4, 5].

В последнее десятилетие предпринимаются попытки получения цементированного слоя на поверхности деталей с использованием искрового разряда [6–10]. За основу взят процесс электроискрового легирования (ЭИЛ) (рис. 1), сущность которого состоит в том, что искровой разряд разрушает материал анода, продукты эрозии которого переносятся на катод (обрабатываемую деталь) [11–13].



а



б

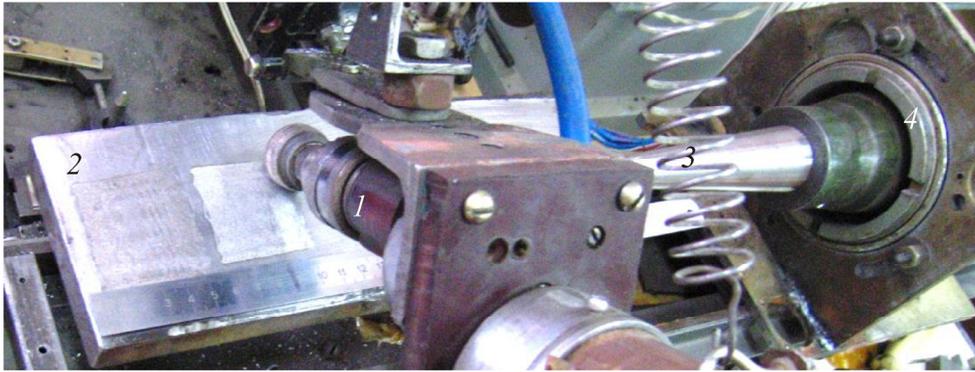
Рис. 1. Процесс электроискрового легирования плоской (*а*) и цилиндрической (*б*) деталей

Высокая температура разряда вызывает плавление частиц электродного материала и их частичное испарение. Пары материала расширяются, сбрасывают с поверхности частицы анода, который, проходя через газовую среду, внедряется в катод, образуя упрочненный слой. Под действием искрового разряда катодная область тоже резко разогревается и сразу же охлаждается за счет теплоотвода в изделие. Таким образом, происходит закалка поверхности до повышенной твердости [4, 5].

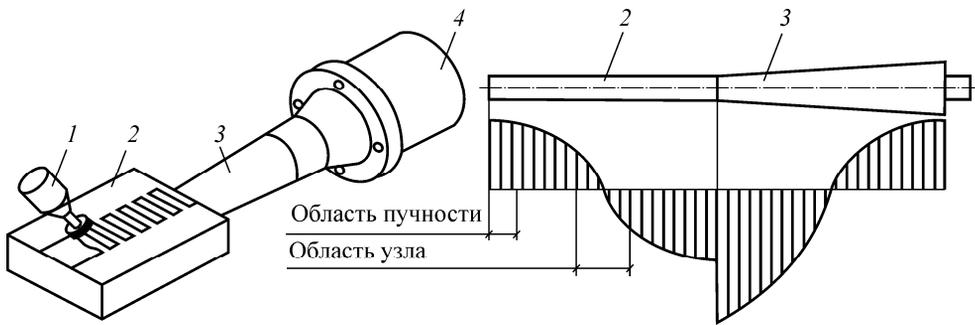
Способ электроискровой цементации существенно снижает энергоемкость процесса, повышает производительность. Отсутствие длительных выдержек при высоких температурах не приводит к росту зерна аустенита, как при традиционном процессе. Несмотря на привлекательность метода, нерешенными вопросами остаются малая глубина цементированного слоя и невысокая степень цементации.

Задачей данного исследования является интенсификация диффузионных процессов электроискровой цементации посредством ультразвуковых колебаний (УЗК). Для выявления специфического воздействия УЗК в областях узлов и пучностей колебаний использована резонансная схема [14, 15]. Размер пластин соответствовал значению длины звуковой волны λ в низкоуглеродистой стали (рис. 2). В образце генерировалась стоячая ультразвуковая волна с частотой 18 кГц и расчетной амплитудой 12,6 мкм.

Образцы для исследований вырезались из пластины в областях узла и пучности стоячей волны (см. рис. 2). Основной металл – пластина из стали 20 – прошел предварительную термическую обработку по трем вариантам: отжиг (охлаждение с печью), нормализация (принудительный обдув воздухом), закалка (охлаждение в спреерном устройстве интенсивного охлаждения). Содержание углерода в поверхностном слое определялось на оптико-эмиссионном спектрометре Bruker Q2 ION; исследование структуры на сканирующем электронном микроскопе Phenom G2 Pure; распределение твердости по глубине слоя на автоматическом микротвердомере FutureTechFM-300. Рентгеноструктурный фазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance с медным анодом в θ – θ геометрии методом шагового сканирования в диапазоне углов $2\theta = 30 \dots 140^\circ$.



а



б

в

Рис. 2. Установка (а) и схема (б) электроискровой цементации в поле ультразвуковых колебаний. Распределение амплитуд в стоячей волне (в): 1 – инструмент ЭИЛ; 2 – образец; 3 – концентратор ультразвуковых колебаний; 4 – магнитострикционный преобразователь

Фазовый анализ упрочненных слоев показал максимальное влияние УЗК в областях близких к узлу колебаний стоячей волны. Существенно увеличивается интенсивность линий цементита и аустенита, хорошо выявляется мартенситный дублет (рис. 3). Содержание углерода в мартенсите, оцененное по соотношению c/a , составило 0,78 мас. %.

Как и ожидалось, наименьшая степень цементации была получена на образцах без ультразвукового воздействия на подложках из отожженной стали и после нормализации (0,80 и 1,15 % С) соответственно (рис. 4). Введение УЗК повышает содержание углерода в упрочненном слое, причем наиболее существенно в области циклических растяжений и сжатий среды (т.е. в области узла колебаний стоячей волны).

Наибольшая степень цементации достигнута на подложках после нормализации и закалки (2,20 и 2,15 % С). Среднее содержание углерода в цементированном слое на образцах, вырезанных из области пучности стоячей волны, также повышено и составляет 1,2–1,4 %.

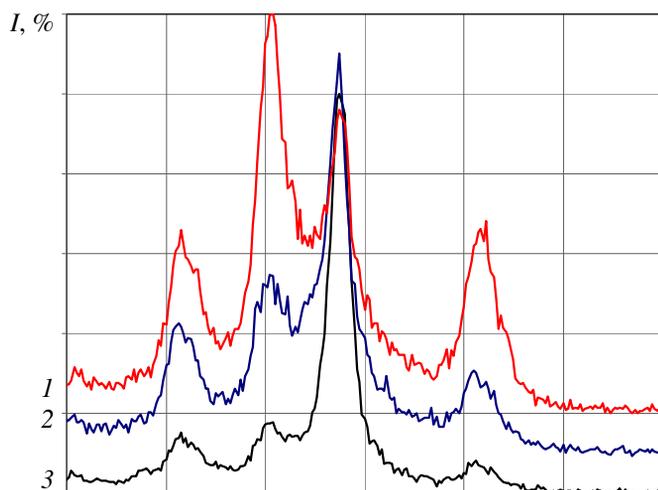


Рис. 3. Участки дифрактограмм цементированного слоя: в области узла (1); пучности (2) колебаний стоячей волны; без УЗК (3)

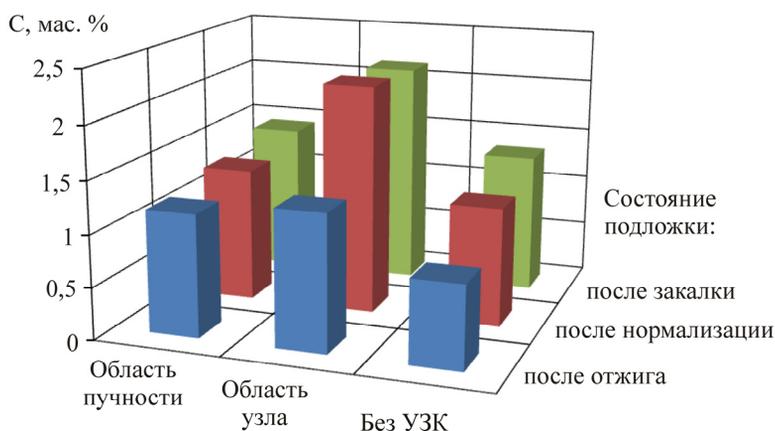


Рис. 4. Среднее содержание углерода в упрочненном слое (мас. %) в характерных участках стоячей ультразвуковой волны при различных вариантах предварительной термической обработки заготовки

Ключевым параметром цементации является глубина слоя, которая может быть ориентировочно определена на наклонных шлифах. Значения глубины слоя имеют высокую погрешность измерения вследствие особенностей технологии процесса ЭИЛ и специфики строения упрочненного слоя.

Металлографические исследования показали, что на поверхности образца, подвергнутого цементации методом ЭИЛ, можно выделить четыре характерные зоны: 1 – верхняя зона – «островковое» покрытие с повышенной шероховатостью поверхности (рис. 5, а); 2 – сплошной «белый» («не травящийся») слой; 3 – переходный слой (рис. 5, б); 4 – основной металл (рис. 5, в, г).

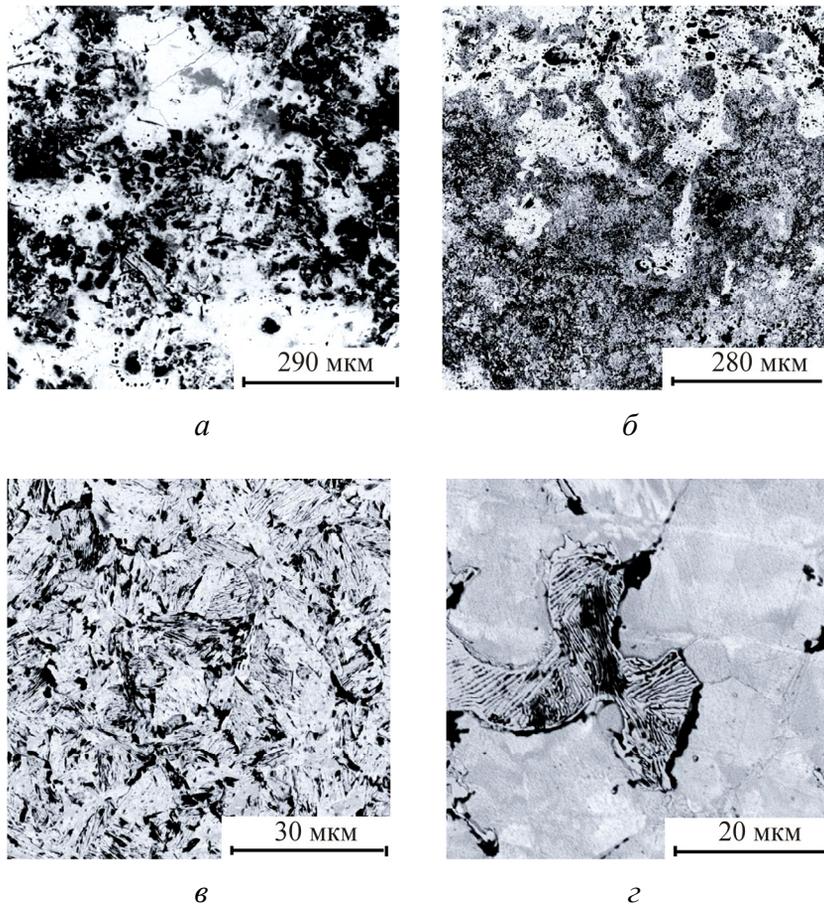


Рис. 5. Структура упрочненного слоя (наклонный шлиф): а – «островковое» покрытие; б – диффузионный слой; основной металл: в – после закалки; г – после отжига

После обработки данных глубины слоя, полученных прямым измерением, было установлено, что при электроискровой цементации без УЗК он минимален – $(0,06 \pm 0,02)$ мм. Можно отметить, что при изменении состояния основного металла от отожженного к закаленному глубина увеличивается, хотя близка к пределу статистической ошибки. Применение ультразвукового воздействия увеличивает глубину покрытия до значений $(0,10 \pm 0,02)$ мм, причем в пучности она выше, чем в узле.

Степень развития диффузионных процессов может быть оценена по протяженности переходной зоны Δ , мм (рис. 6). Значения параметра Δ максимальны в областях пучности стоячей волны и увеличиваются при измельчении структурных составляющих подложки. Наибольшую величину (до 0,02 мм) протяженность переходной зоны достигает при электроискровой цементации образцов после нормализации и закалки. В узле колебаний и при проведении процесса без УЗК значения Δ близки и составляют соответственно 0,017 и 0,014 мм (рис. 7).

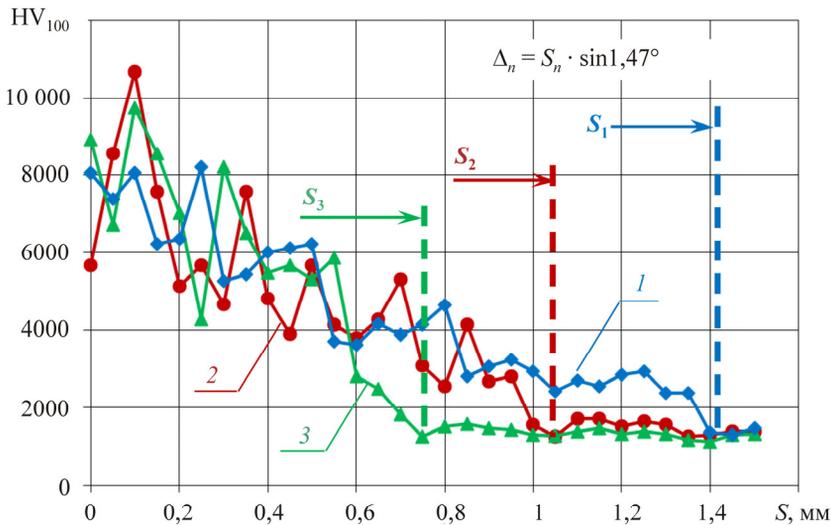


Рис. 6. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя (измерено на наклонном шлифе): 1 – область пучности; 2 – область узла колебаний стоячей УЗ-волны; 3 – без УЗК. Предварительная термообработка подложки – нормализация. Пунктиром обозначен переход к основному металлу

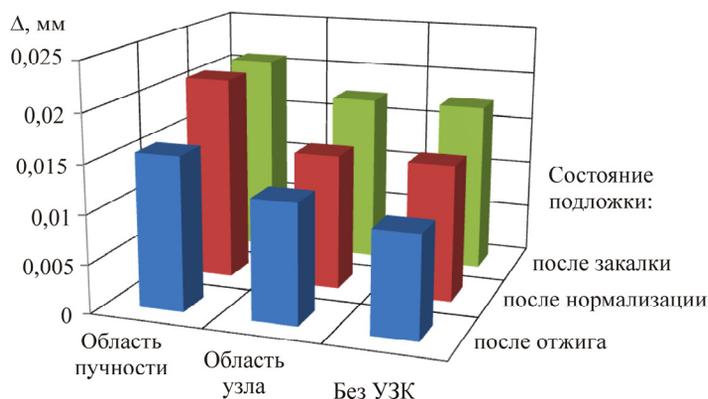


Рис. 7. Размеры переходной зоны цементированного слоя Δ , мм

Таким образом, способ электроискровой цементации эффективен для обработки поверхностей крупногабаритных изделий и, в отличие от традиционной химико-термической обработки, является способом финишной обработки. Характеристики упрочненного слоя (степень цементации и глубина) могут быть расширены при ведении процесса в поле ультразвуковых колебаний. Резонансная схема эксперимента позволила установить влияние характерных областей стоячей ультразвуковой волны на параметры цементированного слоя. Наибольшее увеличение степени цементации обнаружено в области узла колебаний стоячей ультразвуковой волны, где циклические растяжения и сжатия способствуют увеличению доли избыточных фаз. Степень развития диффузионных процессов, определяющая глубину цементированного слоя и размеры переходной зоны, в свою очередь, максимальна в области пучности УЗК, где под действием колебаний наблюдается наибольшее динамическое смещение частиц подложки. Дисперсность структурных составляющих основного металла также увеличивает глубину упрочненного слоя. В сочетании с ультразвуковым воздействием на образцах после нормализации и закалки она достигает значений $(0,10 \pm 0,02)$ мм.

Список литературы

1. Смирнов М.А., Счастливец В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН. – 1999. – 496 с.

2. Защитные покрытия: учеб. пособие / М.Л. Лобанов, Н.И. Кардонина, Н.Г. Россина, А.С. Юровских. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.

3. Иванов А.С., Богданова М.В. Исследование структуры и свойств цементованных слоев низкоуглеродистых цементуемых сталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 57–70.

4. Поверхностное упрочнение деформирующего инструмента методом электроискрового легирования / Е.М. Файншмидт, Г.И. Астафьев, О.И. Шевченко [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 4. – С. 26–31.

5. О поверхностном упрочнении крупногабаритного деформирующего инструмента / Е.М. Файншмидт, В.Ф. Пегашкин, О.И. Шевченко, Г.И. Астафьев // Технология упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2 ч.: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – Ч. 2. – С. 300–303.

6. Белоус А.В. Влияние энергетических параметров электроэрозионной цементации на качественные параметры поверхностных слоев конструкционных сталей // Веснік СумДУ / Сумск. нац. аграрн. ун-т. – 2006. – № 12(96). – С. 158–162.

7. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е. Применение графита в электроискровых технологиях // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 5. – С. 37–44.

8. Ершов В.М. Цементация стальной поверхности при электроискровой обработке графитом // Сб. науч. тр. сотрудников ДонГТУ. – Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2011. – Вып. 31. – С. 219–225.

9. Ершов В.М. К вопросу о механизме образования фаз в металле при электроискровом легировании // Сб. науч. тр. сотрудников ДонГТУ. – Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2012. – Вып. 37. – С. 170–178.

10. Ершов В.М., Русанова Н.В. Влияние электроискрового легирования на структуру твердых сплавов // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – Алчевск: Изд-во ДонГТУ, 2013. – Вып. 41. – С. 156–161.

11. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревуцкий. – Кишинёв: Штиинца, 1986. – 196 с.

12. Новый способ цементации крупногабаритного деформирующего инструмента / Е.М. Файншмидт, О.И. Шевченко, Г.И. Астафьев, М.В. Арифиллина // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2013. – № 4. – С. 22–24.

13. Электроискровая цементация крупногабаритного пресс-инструмента / Е.М. Файншмидт, В.Ф. Пегашкин, О.И. Шевченко, Г.И. Астафьев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 6(207). – С. 10–13.

14. Исследование характеристик упрочненного слоя методом электроискровой цементации / Н.К. Бармина, О.И. Шевченко, Г.Е. Трекин, Г.И. Астафьев // Молодежь и наука: материалы междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. / Нижнетагил. технол. ин-т (филиал) Урал. федер. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Н. Тагил, 2015. – Т. 1. – С. 4–8.

15. Шевченко О.И., Трекин Г.Е. Формирование упрочненного слоя при электроискровой цементации // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: XXII Урал. шк. металлослов-термистов, посвященная 100-летию со дня рождения профессора А.А. Попова (Тольятти, 2–6 февраля 2016 года); VII Междунар. шк. с элементами науч. шк. для молодежи (Тольятти, 31 января – 5 февраля 2016 г.): сб. материалов. – Тольятти: Изд-во Тольят. гос. ун-та, 2016. – С. 138–139.

References

1. Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Osnovy termicheskoi obrabotki stali* [Fundamentals of heat treatment of steel]. Ekaterinburg: Ural'skoe Otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 1999. 496 p.

2. Lobanov M.L., Kardonina N.I., Rossina N.G., Iurovskikh A.S. *Zashchitnye pokrytiia* [Protective coatings]. Ekaterinburg: Ural'skii univesrsitet, 2014. 200 p.

3. Ivanov A.S., Bogdanova M.V. *Issledovanie struktury i svoistv tsementovannykh sloev nizkouglerodistykh tsementuemykh staley* [Investigation of the structure and properties of the cemented layers of low-carbon carburized steel]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 57-70.

4. Fainshmidt E.M., Astafev G.I., Shevchenko O.I. [et al.]. *Poverkhnostnoe uprochnenie deformiruiushchego instrumenta metodom*

elektroiskrovogo legirovaniia [Surface hardening by deforming tool spark alloying]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2011, no. 4, pp. 26-31.

5. Faindshmidt E.M., Pegashkin V.F., Shevchenko O.I., Astaf'ev G.I. O poverkhnostnom uprochnenii krupnogabaritnogo deformiruiushchego instrumenta [On the surface hardening of large-sized deforming tool]. *Materialy XV Mezhdunarnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Tekhnologiiia uprochneniia, naneseniiia pokrytii i remonta: teoriia i praktika"*. Saint Petersburg: Politekhnikheskii universitet, 2013. Part 2, pp. 300-303.

6. Belous A.V. Vliianie energeticheskikh parametrov elektroerozionnoi tsementatsii na kachestvennye parametry poverkhnostnykh sloev konstruktsionnykh staley [Influence of energy parameters of EDM cementation on the quality parameters of the surface layers of structural steels]. *Vesnik SumDU. Sumskii natsional'nyi agrarnyi universitet*, 2006, no. 12(96), pp. 158-162.

7. Mikhailiuk A.I., Gitlevich A.E. Primenenie grafita v elektroiskrovovykh tekhnologiiakh [The use of graphite in electric-spark technology]. *Elektronnaia obrabotka materialov*, 2010, no. 5, pp. 37-44.

8. Ershov V.M. Tsementatsiia stal'noi poverkhnosti pri elektroiskrovoi obrabotke grafitom [Cementation steel surface by spark erosion graphite]. *Sbornik nauchnykh trudov sotrudnikov Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Alchevsk: Donskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011, iss. 31, pp. 219-225.

9. Ershov V.M. K voprosu o mekhanizme obrazovaniia faz v metalle pri elektroiskrovom legirovanii [On the mechanism of phase formation in metal electro-spark alloying]. *Sbornik nauchnykh trudov sotrudnikov Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Alchevsk: Donskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012, iss. 37, pp. 170-178.

10. Ershov V.M., Rusanova N.V. Vliianie elektroiskrovogo legirovaniia na strukturu tverdykh splavov [Effect of spark alloying on the structure of hard alloys]. *Sbornik nauchnykh trudov sotrudnikov Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Alchevsk: Donskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013, iss. 41, pp. 156-161.

11. Gitlevich A.E., Mikhailov V.V., Parkanskii N.Ia., Revutskii V.M. Elektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverkhnostei [Electric spark doping of metal surfaces]. Kishinev: Shtiintsa, 1986. 196 p.

12. Faindshmidt E.M., Shevchenko O.I., Astaf'ev G.I., Arifullina M.V. Novyi sposob tsementatsii krupnogabaritnogo deformiruiushchego instrumenta [A new way of cementing bulky deforming tool]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, 2013, no. 4, pp. 22-24.

13. Fainshmidt E.M., Pegashkin V.F., Shevchenko O.I., Astaf'ev G.I. Elektroiskrovaia tsementatsiia krupnogabaritnogo press-instrumenta [Electrospark grouting of large-sized press tool]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniem*, 2014, no. 6(207), pp. 10-13.

14. Barmina N.K., Shevchenko O.I., Trekin G.E., Astaf'ev G.I. Issledovanie kharakteristik uprochnennogo sloia metodom elektroiskrovoi tsementatsii [Investigation of characteristics of the hardened layer by spark cementation]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Molodezh' i nauka"*. Nizhnetagil'skii tekhnologicheskii institut (filial) Ural'skogo federal'nogo universiteta imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2015, vol. 1, pp. 4-8.

15. Shevchenko O.I., Trekin G.E. Formirovanie uprochnennogo sloia pri elektroiskrovoi tsementatsii [Formation of hardened layer when an electric spark cementation]. *Sbornik materialov "Aktual'nye problemy fizicheskogo metallovedeniia stalei i splavov"*, VII Mezhdunarodnaia shkola s elementami nauchnoi shkoly dlia molodezhi. Tol'iattinskii gosudarstvennyi universitet, 2016, pp. 138-139.

Получено 27.06.2016

Об авторах

Шевченко Олег Игоревич (Нижний Тагил, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлургическая технология» Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.

Трекин Григорий Евгеньевич (Нижний Тагил, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Общее машиностроение» Нижнетагильского технологического института (филиала) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: trekin1963@yandex.ru.

About the authors

Oleg I. Shevchenko (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Metallurgical Technologies, Nizhny Tagil Technology Institute (department) of Ural

Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin;
e-mail: shevchenko_oleg@mail.ru.

Grigoriy E. Trekin (Nizhny Tagil, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Machine Building, Nizhny Tagil Technology Institute (department) of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: trekin1963@yandex.ru.