



УДК 621.787:621.9.048

DOI 10.17073/0368-0797-2023-4-421-426



Оригинальная статья

Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ МАРКИ 40Х НА ЕЕ СТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ

А. С. Симачёв[✉], Т. Н. Осолкова, Р. А. Шевченко

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

✉ simachev_as@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрено влияние комбинированной электрохимической обработки по трем различным режимам на структуру и твердость поверхностных слоев стали марки 40Х в нормализованном состоянии (исходная структура). Режимы отличаются друг от друга разной приложенной нагрузкой и количеством импульсов. Приложенная нагрузка по режимам 1 и 2 (сила тока 39 кА, время импульса 0,02 с, количество импульсов 1) составляет 100 и 250 МПа. Отличительной особенностью режима 3 по сравнению с режимом 2 является большее количество импульсов (два). Металлографически установлено, что во всех трех случаях формируется упрочненный поверхностный слой разной толщины (от 300 до 1200 мкм) с твердостью 593 – 598 HV, состоящий из двух зон (поверхностной зоны со структурой мелкоигольчатого мартенсита; переходной зоны, плавно переходящей в исходную феррито-перлитную структуру). Переходная зона (обработка по режиму 1) в своей структуре содержит мартенсит и феррит. Переходная зона (обработка по режиму 2) состоит из видманштеттовой структуры. Более существенная по толщине поверхностная зона разогрева по этому режиму (700 мкм) по сравнению с обработкой по режиму 1 (300 мкм) в сочетании и интенсивным отводом тепла способствовали формированию видманштеттовой структуры, которая является дефектной и недопустимой для эксплуатации. Переходная зона при обработке по режиму 3 имеет структуру мартенсита и феррита. Формирования дефектной видманштеттовой структуры в переходной зоне не происходит, поскольку при обработке применяется в два раза больше импульсов, чем по режиму 2. Это способствует прогреву поверхностного слоя на большую глубину (1200 мкм), и, следовательно, структурообразование в переходной зоне происходит из межкритического интервала $Ag_3 - Ag_1$.

Ключевые слова: сталь, твердость, микроструктура, поверхностная комбинированная электрохимическая обработка

Для цитирования: Симачев А.С., Осолкова Т.Н., Шевченко Р.А. Исследование влияния режимов комбинированной электрохимической обработки стали марки 40Х на ее структуру и твердость. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(4):421–426. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-421-426>

INFLUENCE OF COMBINED ELECTROMECHANICAL PROCESSING MODES OF 40KH STEEL ON ITS STRUCTURE AND HARDNESS

A. S. Simachev[✉], T. N. Oskolkova, R. A. Shevchenko

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ simachev_as@mail.ru

Abstract. The paper considers the effect of combined electromechanical processing in three different modes on the structure and hardness of the surface layers of 40Kh steel, which was in a normalized state (the original structure). The modes differ from each other by the different applied load and the number of pulses. The applied load in modes 1 and 2 (current strength 39 kA, pulse time 0.02 s, number of pulses 1) is 100 and 250 MPa, respectively. A distinctive feature of mode 3 compared to mode 2 is a greater number of pulses (two). Metallographically it was established that in all three cases a hardened surface layer of different thickness (from 300 to 1200 μm) with a hardness of 593 – 598 HV is formed, consisting of two zones (a surface zone with a structure of fine-needle martensite; a transition zone smoothly transitioning into the initial ferrite structure). The transition zone (treatment according to mode 1) in its structure contains martensite and ferrite. The transition zone (mode 2 processing) consists of a Widmanstett structure. A more substantial surface heating zone according to this mode (700 μm) in comparison with the processing according to mode 1 (300 μm) in combination with intensive heat removal contributed to the formation of a Widmanstett structure, which is defective and unacceptable for operation. The transition zone with the processing according to mode 3 has the structure of martensite and ferrite. The formation of a defective Widmanstett structure in the transition zone does not occur, since 2 times more pulses are used during processing than in mode 2. This contributes to the heating of the surface layer to a greater depth (1200 μm), and, consequently, the structure formation in the transition zone occurs from the intercritical interval $Ag_3 - Ag_1$.

Keywords: steel, hardness, microstructure, surface combined electromechanical processing

For citation: Simachev A.S., Oskolkova T.N., Shevchenko R.A. Influence of combined electromechanical processing modes of 40Kh steel on its structure and hardness. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(4):421–426. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-4-421-426>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие машиностроения в России невозможно представить без применения среднеуглеродистых улучшаемых сталей. Рассматриваемые стали чаще всего работают в триботехнических условиях, поэтому создание на их поверхности упрочненных слоев позволит значительно повысить надежность и долговечность деталей машин [1–3], а также поверхностную твердость [4; 5], что приведет, несомненно, к повышению износостойкости применяемой стали в целом. Так, например, повышение износостойкости режущих инструментов – основная проблема металлообрабатывающей промышленности [6–8].

Высокие показатели поверхностной твердости в настоящее время достигаются, в основном, за счет применения различных методов упрочнения поверхности деталей с целью создания слоев и покрытий с заданными свойствами [9; 10]. Анализ литературных данных [11–13] показывает, что в настоящее время существует множество способов поверхностного упрочнения сталей, среди которых совместная электро-механическая с ультразвуковой обработка и электро-механическая обработка с динамическим силовым воздействием.

В работах [14; 15] эффективным методом поверхностного упрочнения деталей машин является комбинированная электромеханическая обработка (КЭМО). Такая обработка приводит к поверхностному упрочнению путем электромеханической обработки (ЭМО) и пластической деформации поверхностного слоя.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе использовали образцы 10×10×20 мм после нормализации стали марки 40X, химический состав которой соответствует требованиям ГОСТ 4543 – 2016. Поверхностное упрочнение образ-

Режимы обработок стали марки 40X способом комбинированной ЭМО

Treatment modes of 40Kh steel by combined electromechanical processing

Режим	Сила тока, кА	Время импульса, с	Количество импульсов	Приложенная нагрузка, МПа
1	39	0,02	1	100
2	39	0,02	1	250
3	39	0,02	2	250

цов проводили способом КЭМО на сварочной рельефной машине МР 2517 по режимам, представленным в таблице и на рис. 1.

Машина МР 2517 переменного тока с одним сварочным трансформатором с номинальной силой сварочного тока 25 кА оборудована пневматическим приводом / сжатия обрабатываемых деталей. Сварочный корпус машины выполнен в виде жесткой скобы. Ток в машине коммутируется тиристорными контакторами и протекает через специально подготовленные электроды 2 с уменьшенным поперечным сечением, что позволяет достигать высокой плотности электрического тока на обрабатываемой поверхности образца 3. Для управления циклом КЭМО используется бесконтактная аппаратура, позволяющая осуществлять регулирование тока, модуляцию и многоимпульсные включения.

Способ КЭМО включает в себя воздействие на поверхностный слой электрического тока больших значений и поверхностной пластической деформации. В результате этого поверхность стали нагревается до температур 1000 – 1300 °С [16 – 18]. При интенсивном охлаждении поверхности путем отвода тепла в глубь материала и окружающую среду происходят фазовые превращения (сверхскоростная закалка) с образованием мартенситных структур.

Металлографические исследования упрочненных слоев проводили с использованием микроскопа OLIMPUS – GX 50 методом измерения микротвердости (прибор HVS-1000) по ГОСТ 2999 – 75 «Металлы

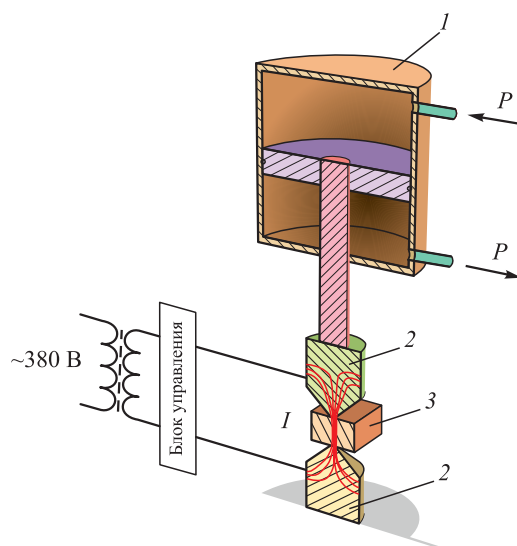


Рис. 1. Схема установки для комбинированной электромеханической обработки

Fig. 1. Scheme of the installation for combined electromechanical processing

и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу» и методом оценки величины зерна в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 «Методы выявления и определения величины зерна».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оптическая металлография образцов после обработки по режиму 1 (сила тока 39 кА, время импульса

0,02 с, количество импульсов 1, приложенная нагрузка 100 МПа) выявила образование на поверхности стали слоя, состоящего из двух зон общей толщиной 300 мкм с измененной микроструктурой по сравнению с исходной (рис. 2). Первая (поверхностная) зона толщиной 150 мкм (рис. 2, а, б) состоит из мелкоигольчатого мартенсита с твердостью 598 HV и номером зерна 8. Вторая переходная зона толщиной 150 мкм (рис. 2, а, в) состоит из мартенсита и феррита с твердостью 275 HV и номером зерна 7. Ниже располагается исходная структура феррита и перлита с твердостью 188 HV и номером зерна 6 [19; 20].

Образцы после КЭМО по режиму 2 (сила тока 39 кА, время импульса 0,02 с, приложенная нагрузка 250 МПа, количество импульсов 1) имеют упрочненный слой толщиной 700 мкм (рис. 3, а), который состоит из двух зон: первая (поверхностная) зона толщиной 500 мкм и номером зерна 7, 8 представлена мелкоигольчатым мартенситом (рис. 3, а, б) с твердостью 593 HV. Ниже расположена переходная зона (рис. 3, а, в) толщиной 200 мкм со структурой перлита и феррита с видманштеттовой направленностью. Твердость этой зоны 233 HV, номер зерна 4, 5. Переходная зона глубже переходит в исходную феррито-перлитную структуру. Более существенная по толщине поверхностная зона разогрева по рассматриваемому режиму (700 мкм) по сравнению с режимом 1 (300 мкм) и в сочетании с интенсивным отведением тепла от этой зоны поспособствовали формированию видманштеттовой структуры, которая является дефектной и недопустимой для эксплуатации.

Обработку по режиму 3 проводили при следующих параметрах: сила тока 39 кА, время импульса 0,02 с, приложенная нагрузка 250 МПа, количество импульсов 2. Микроструктура стали после упрочнения способом КЭМО (по режиму 3) представлена на рис. 4.

Металлографически выявлено увеличение толщины упрочненного слоя до 1200 мкм (рис. 4, а). Этот слой, как и в предыдущих случаях, состоит из двух зон: поверхностной толщиной 1000 мкм с номером зерна 7 со структурой мелкоигольчатого мартенсита (рис. 4, б) с твердостью 598 HV; ниже этой зоны располагается переходная зона толщиной 200 мкм со структурой мартенсита и феррита (твердость 275 HV) и номером зерна 6 (рис. 4, в). Далее упрочненный слой плавно переходит в исходную структуру феррита и перлита с номером зерна 6 и твердостью 190 HV.

Металлографически не идентифицируется дефектная видманштеттовая структура в переходной зоне, так как обработка стали марки 40X по режиму 3 способствует прогреву поверхностного слоя на большую глубину, и, следовательно, структурообразование в переходной зоне происходит из межкритического интервала $Ar_3 - Ar_1$ (рис. 4, в).

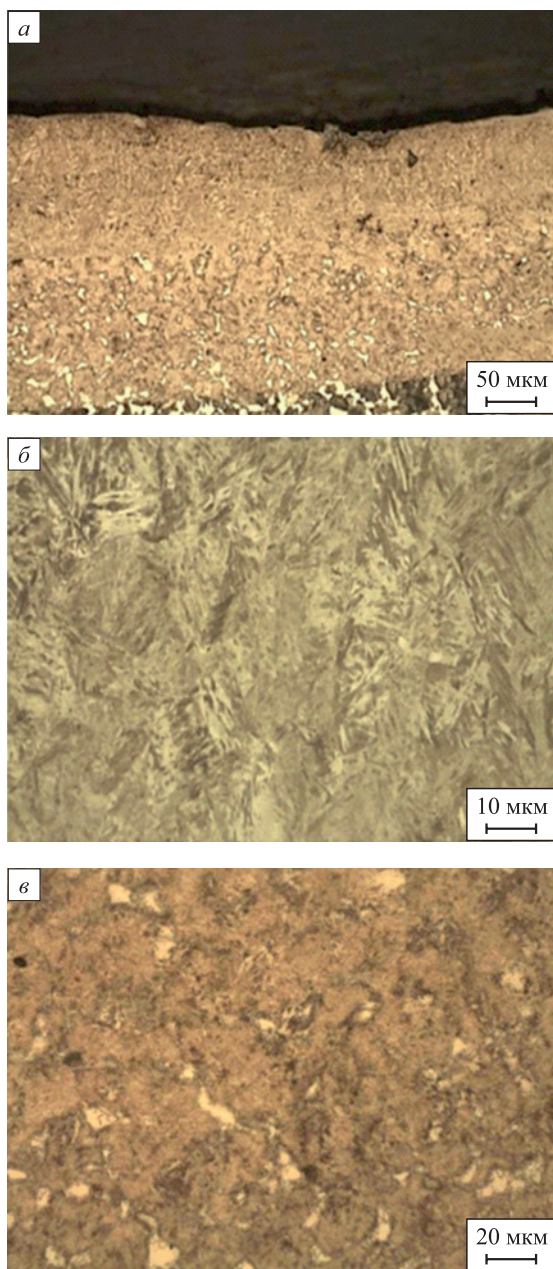


Рис. 2. Микроструктура стали марки 40X после комбинированной электромеханической обработки по режиму 1:

а – внешний вид упрочненного слоя;
б – внешняя упрочненная зона; в – переходная зона

Fig. 2. Microstructure of 40Kh steel after combined electromechanical processing according to mode 1:

а – appearance of the hardened layer;
б – external hardened zone; в – transition zone

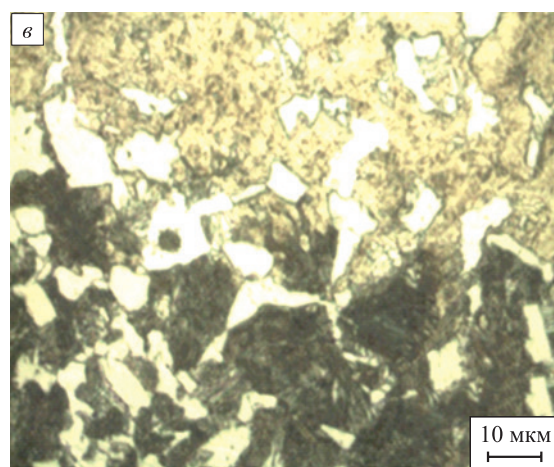
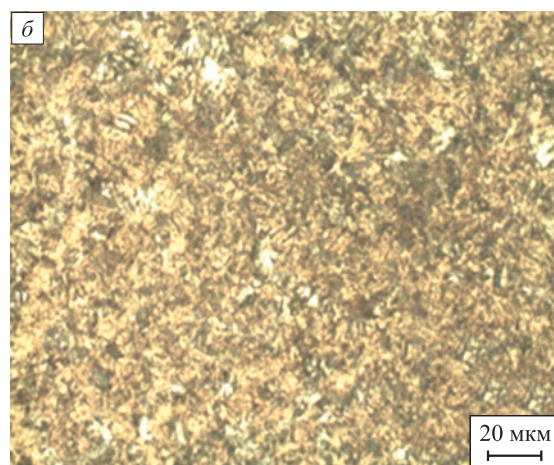
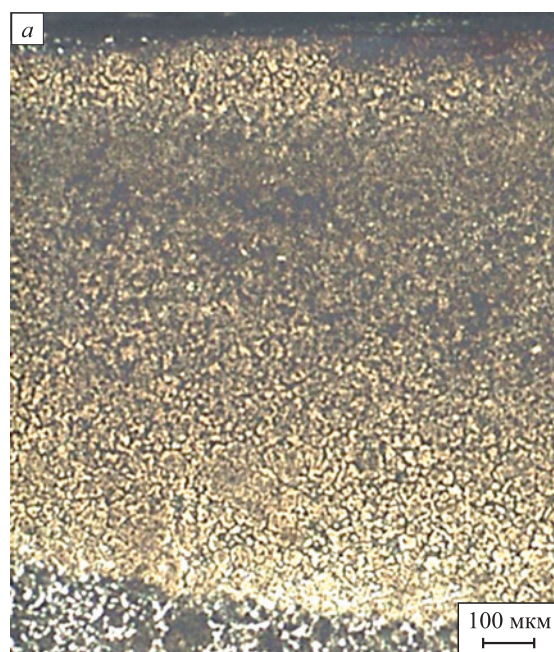
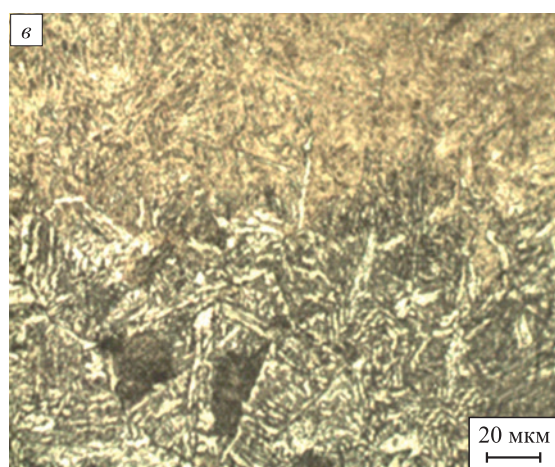
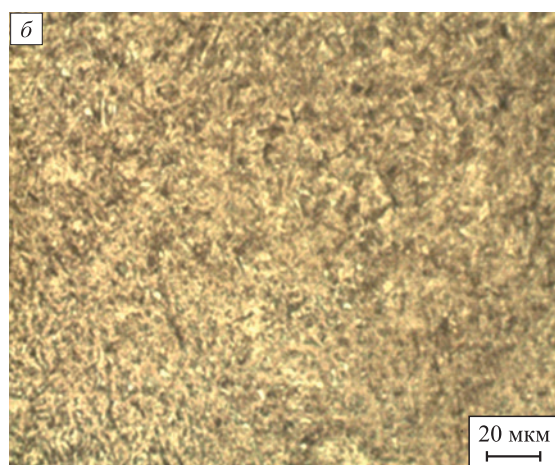
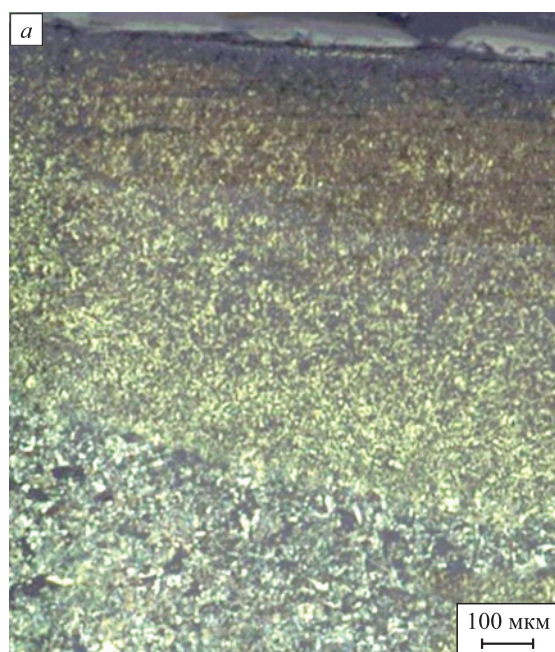


Рис. 3. Микроструктура стали марки 40Х после комбинированной электромеханической обработки по режиму 2:

a – внешний вид упрочненного слоя;
б – внешняя упрочненная зона; *в* – переходная зона

Fig. 3. Microstructure of 40Kh steel after combined electromechanical processing according to mode 2:

a – appearance of the hardened layer;
б – external hardened zone; *в* – transition zone

Рис. 4. Микроструктура стали марки 40Х после комбинированной электромеханической обработки по режиму 3:

a – внешний вид упрочненного слоя;
б – внешняя упрочненная зона; *в* – переходная зона

Fig. 4. Microstructure of 40Kh steel after combined electromechanical processing according to mode 3:

a – appearance of the hardened layer;
б – external hardened zone; *в* – transition zone

Выводы

На поверхности стали марки 40X со структурой в исходном нормализованном состоянии феррита и перлита получены способом комбинированной электро-механической обработки поверхностные слои толщиной 300 – 1200 мкм со структурой мелкоигольчатого мартенсита с твердостью 598 HV. Исследования показали, что рациональными режимами обработки по структурообразованию и полученной поверхностной твердостью являются режимы 1 и 3. Поверхностный слой, полученный по этим режимам, состоит из мелкоигольчатого мартенсита, ниже которого располагается переходная зона со структурой мартенсита и феррита, плавно переходящая в исходную феррито-перлитную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Panin S.V., Klimenov V.A., Seifullina M.P., Pochivalov Yu.I., Ovechkin B.B. Effect of ultrasonic treatment of fused gas-thermal coatings on the character of deformation and fracture of “coating – substrate” compositions at three-point bending. *Physical Mesomechanics*. 2004;7(1-2):107–116.
- Varga G. Effects of technological parameters on the surface texture of burnished surfaces. *Engineering Materials*. 2014;581:403–408.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.403>
- Malaki M., Ding H. A review of ultrasonic peening treatment. *Materials and Design*. 2015;87:1072–1086.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.108>
- Lu K., Lu J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;375–377:38–45.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.261>
- Wang Z., Lu K. Diffusion and surface alloying of gradient nanostructured metals. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2017;8:547–560. <https://doi.org/10.3762/bjnano.8.59>
- Sidashov A.V., Kozakov A.T., Yaresko S.I. Auger and X-Ray photoelectron spectroscopy study of the tribocontact surface after laser modification. *Materials Science Forum*. 2016;870:298–302.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.298>
- Yaresko S.I. Application features of the cutting tool, hardened by laser pulsed radiation. *Materials Science Forum*. 2016;870:46–51.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.870.46>
- Ogin P.A., Levashkin D.G., Yaresko S.I., Block-modular principle of build composition automatically changeable laser modules for CNC machines. *Procedia Engineering*. 2017;206:1298–1302.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.634>
- Ivancivsky V.V., Zverev E.A., Vakhrushev N.V., Bandyurov I.V. Adhesion strength research of wear-resistant ceramic-metal plasma coatings. *Actual Problems in Machine Building*. 2016;(3):77–82.
- Loginova M.V., Yakovlev V.I., Sitnikov A.A., Filimonov V.Yu., Sobachkin A.V., Negodyaev A.Z., Gradoboev A.V. Structural transformations in mechanically activated powder mixtures Ti + Al under the influence of γ -irradiation. *Actual Problems in Machine Building*. 2016;(3):398–404.
- Edigarov V.R., Litau E.V., Morgunov A.P. The influence of process parameters of the electromechanical handling on its features. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2014:7005647.
<https://doi.org/10.1109/Dynamics.2014.7005647>
- Матлин М.М., Дудкина Н.Г., Дудкин А.Д. Особенности формирования упрочненного слоя при электро-механической обработке с динамическим силовым воздействием. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007;(6(30)):38–41. Matlin M.M., Dudkina N.G., Dudkin A.D. Features of formation of the strengthened surface layer upon electromechanical treatment with dynamic effort. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007;(6(30)):38–41. (In Russ.).
- Косогоров В.А., Багмутов В.П., Захаров И.Н., Денисевич Д.С., Косогорова П.В. Комбинированное поверхностное упрочнение стальных сплавов на основе электро-механической и ультразвуковой обработок. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2014;(1(128)):10–14. Kosogorov V.A., Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Denisevich D.S., Kosogorova P.V. Combined surface hardening of steel based alloys on electromechanical and ultrasonic treatments. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014;(1(128)):10–14. (In Russ.).
- Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю., Дегтярь В.В. Классификация комбинированных методов обработки на основе электро-механического упрочнения. *Современные наукоемкие технологии*. 2012;(3):32–36. Edigarov V.R., Kilunin I.Yu., Degtyar' V.V. Classification of combined processing methods based on electromechanical hardening. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2012;(3):32–36. (In Russ.).
- Эдигаров В.Р., Малый В.В. Повышение износостойкости деталей ходовой части многоцелевых гусеничных машин комбинированными методами электро-механической обработки. *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2014;(4(38)):57–64. Edigarov V.R., Malyi V.V. Improving wear resistance of details of multi-purpose tracked machines' running gear by combined methods of electromechanical processing. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2014;(4(38)):57–64. (In Russ.).
- Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. *Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: библиотека технолога*. Москва: Машиностроение; 2004:288.
- Эдигаров В.Р., Алимбаева Б.Ш., Перков П.С. Упрочнение поверхностных слоев деталей электро-механической обработкой с дополнительной деформацией поверхностного слоя. *Научный альманах*. 2016;10(3(24)):351–354.
<https://doi.org/10.17117/na.2016.10.03.351>
- Edigarov V.R., Alimbaeva B.Sh., Perkov P.S. Hardening of blankets of details by electromechanical processing with additional deformation of a blanket. *Nauchnyi al'manakh*. 2016;10(3(24)):351–354. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17117/na.2016.10.03.351>
- Горленко А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электро-механической обработке. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2011;(3(31)):4–8.

Gorlenko A.O. Hardening of friction surfaces of machine parts during electromechanical processing. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011;(3(31)):4–8. (In Russ.).

19. Кашин С.С., Шевченко Р.А., Осколкова Т.Н. Упрочнение поверхности стали марки 40Х способом электромеханической обработки. В кн.: *Сб. науч. трудов Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения.*

Ч. 2. *Технические науки*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021:231–234.

20. Кашин С.С., Осколкова Т.Н., Шевченко Р.А. Поверхностное упрочнение стали марки 40Х методом комбинированной электромеханической обработки. В кн.: *Сб. науч. трудов XXI Международной науч.-практич. конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество. Ч. 2»*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2021;2: 34–36.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Артём Сергеевич Симачёв, к.т.н. доцент кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Татьяна Николаевна Осколкова, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1310-1284

E-mail: oskolkovatiana@yandex.ru

Роман Алексеевич Шевченко, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shefn1200@mail.ru

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-9712-3757

E-mail: simachev_as@mail.ru

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1310-1284

E-mail: oskolkovatiana@yandex.ru

Roman A. Shevchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: shefn1200@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Симачев – разработка концепции научных исследований, проведение упрочняющей поверхностной обработки по разным режимам, обработка полученных результатов, написание текста статьи.

Т. Н. Осколкова – обработка полученных результатов и их обсуждение.

Р. А. Шевченко – представление схемы установки для комбинированной электромеханической обработки, описание принципа ее работы.

A. S. Simachev – development of the concept of scientific research, carrying out hardening surface processing according to different modes, processing of the obtained results, writing the text.

T. N. Oskolkova – processing of the obtained results and their discussion.

R. A. Shevchenko – presentation of scheme of the installation for combined electromechanical processing, description of the principle of its operation.

Поступила в редакцию 27.06.2022

После доработки 10.11.2022

Принята к публикации 14.11.2022

Received 27.06.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 14.11.2022