


## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.785.545

DOI: 10.26897/2687-1149-2022-2-59-64

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКЕ

**ФЕДОРОВА ЛИЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА** , *д-р техн. наук, профессор*momd@yandex.ru , <http://orcid.org/0000-0001-7523-8441>; Scopus Autor ID: 56682637700**ФЕДОРОВ СЕРГЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ**, *д-р техн. наук, профессор*

momd@yandex.ru

**НГО ВАН ТУЕН**, *аспирант*

ngotuyenvvk@gmail.com

**ИВАНОВА ЮЛИЯ СЕРГЕЕВНА**, *канд. техн. наук, доцент*yuulianius@gmail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-9964-5284>; Scopus Autor ID ID: 57199149904

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); 105005, Российская Федерация, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5

**Аннотация.** Основными направлениями поверхностной закалки при электромеханической обработке являются отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка (ОУЭМО) и электромеханическая поверхностная закалка (ЭМПЗ). Особенности ЭМПЗ по сравнению с режимами ОУЭМО являются незначительная скорость обработки (0,6...1,4 м/мин), большая ширина контакта (до 5 мм), значительная сила электрического тока вторичной цепи (1200...3000 А). В исследовании с помощью программы продукта ANSYS Workbench представлена трехмерная модель для прогнозирования и определения температурных полей упрочненного слоя втулок из сталей У8 при ЭМПЗ. Проведено конечно-элементное моделирование процесса ЭМПЗ, состоящего из двух последовательных анализов: переходного прочностного анализа (Transient Structural) и переходного теплового анализа (Transient Thermal). При ЭМПЗ термомеханический цикл «Нагрев-выдержка-деформирование-охлаждение» осуществляется в закрытой зоне контакта инструмента и заготовки за сотые доли секунды. Установлено, что при ЭМПЗ по глубине упрочненной зоны формируется градиент температуры – интенсивное охлаждение поверхностного слоя, нагретого до 1559°C, в результате отвода тепла нижележащими слоями металла. После ЭМПЗ в зоне упрочнения формируется мелкодисперсный мартенсит. Результаты исследований позволяют разработать технологию ЭМПЗ поверхностного слоя втулок из стали У8 на основе режима упрочнения при следующих параметрах: скорость закалки – 1,2 м/мин, сила тока во вторичной цепи – 1600 А, напряжение вторичной цепи – 3 В; ширина – электроконтактного воздействия 4 мм; усилие прижатия инструментального ролика – 400 Н.

**Ключевые слова:** температурное поле, конечно-элементное моделирование, упрочнение втулок, электромеханическая поверхностная закалка.


**Формат цитирования:** Федорова Л.В., Федоров С.К., Нго В.Т., Иванова Ю.С. Расчет температурного поля упрочненного слоя при электромеханической поверхностной закалке // *Агроинженерия*. 2022. Т. 24. № 2. С. 59-64. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-59-64>.

© Федорова Л.В., Федоров С.К., Нго В.Т., Иванова Ю.С., 2022



## ORIGINAL PAPER

## CALCULATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE HARDENED LAYER DURING ELECTROMECHANICAL SURFACE HARDENING

**LILIYA V. FEDOROVA** , *PhD (Eng), Professor*momd@yandex.ru , <http://orcid.org/0000-0001-7523-8441>; Scopus Autor ID: 56682637700**SERGEY K. FEDOROV**, *PhD (Eng), Professor*

momd@yandex.ru

**NGO VAN TUYEN**, *postgraduate student*

ngotuyenvvk@gmail.com

**YULIYA S. IVANOVA**, *PhD (Eng), Associate Professor*

Yuulianius@gmail.Ru

Bauman Moscow State Technical University (National Research University); 2<sup>nd</sup> Baumanskaya Str., 5, Moscow, 105005, Russian Federation

**Abstract.** The main methods of surface hardening during electromechanical processing (EMP) include finishing-hardening electromechanical processing (FHEMP) and electromechanical surface hardening (EMSH). EMSH, as compared with the FHEMP

modes, features a slow processing speed (0.6...1.4 m/min), a long contact width of up to 5 mm, a significant electric current strength of the secondary circuit – 1200...3000 A. The article presents a three-dimensional model for predicting and determining the temperature fields of the hardened layer of U8 steel bushings during EMSH made in the ANSYS Workbench program. The authors carried out finite element modeling of the EMSH process consisting of successive transient structural strength analysis and transient thermal analysis. During EMSH, the thermomechanical cycle “heating – keeping – deformation – cooling” is carried out in the closed contact zone of the tool and the workpiece in hundredths of a second. It was found that during EMSH a temperature gradient is formed along the depth of the hardened zone as there is intensive cooling of the surface layer heated to 1559°C, as a result of heat removal by the underlying metal layers. After EMSH a fine-dispersed martensite is formed in the hardened zone. The study results are useful for developing the EMSH processing technology of the surface layer of bushings made of U8 steel based on the hardening mode with the following parameters: hardening speed of 1.2 m/min, the current strength in the secondary circuit of 1600 A, the secondary circuit voltage of 3 V; the width of the contact electric effect of 4 mm; the pressing force of the tool roller of 400 N.

**Key words:** temperature field, finite element modeling, bushing hardening, electromechanical surface hardening.

**For citation:** Fedorova L.V., Fedorov S.K., Ngo V.T., Ivanova Yu.S. Calculation of the temperature field of the hardened layer during electromechanical surface hardening. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2022; 24(2): 59-64. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-2-59-64>.

**Введение.** На оптимальных режимах электромеханической обработки (ЭМО) вследствие этапов кратковременного высокотемпературного нагрева и последующего интенсивного отвода тепла от поверхности нижележащими слоями заготовки формируется специфичная градиентная структура поверхностного слоя металла. Основными направлениями поверхностной закалки при ЭМО являются технологии, основанные на отделочно-упрочняющей электромеханической обработке (ОУ-ЭМО) и электромеханической поверхностной закалке (ЭМПЗ).

На основании расчетов при ОУЭМО твердосплавным инструментом установлено, что температура нагрева поверхностного слоя заготовки в центре пятна контакта составляет 1750...1830°C<sup>1</sup>.

В экспериментальной работе [1] исследована температура нагрева при ОУЭМО и отмечено значительное превышение температуры заготовки на глубине от 0,25 до 3 мм в отличие от режимов нагрева при объемной закалке, причем установлена зависимость температуры нагрева поверхностного слоя по глубине от скорости обработки. На глубине 0,25 мм при скорости обработки 125 мм/мин температура нагрева составила 1200°C, а при скорости 315 мм/мин – не более 950°C.

Процесс ЭМПЗ, реализованный по способу профессора Н.В. Гевелинга, основан на электроконтактной закалке поверхностного слоя заготовок вращающимся бронзовым инструментом. Особенности ЭМПЗ по сравнению с режимами ОУЭМО являются незначительная скорость обработки (0,6...1,4 м/мин), большая ширина контакта (до 5 мм), значительная сила электрического тока вторичной цепи (1200...3000 А).

ЭМПЗ является одним из способов контактной обработки заготовок концентрированным источником электрической энергии. При ЭМПЗ «Нагрев-выдержка-деформирование-охлаждение» осуществляются в закрытой зоне термомеханического контакта «Инструмент-заготовка» за сотые доли секунды. Охлаждение нагретого

поверхностного слоя происходит в результате отвода тепла нижележащими слоями металла. ЭМПЗ является перспективным способом упрочнения, позволяющим увеличить износостойкость поверхностного слоя [2-4].

При ЭМПЗ температура в зоне контакта инструмента и заготовки проходящим электрическим током оказывает наибольшее влияние на формирование структуры и свойств поверхностного слоя в результате преобразования электрической энергии в тепловую. Для исследования образования в упрочненной зоне температурных полей при ЭМПЗ используют программный продукт ANSYS для проведения инженерных расчетов.

Тепловыделение в области электромеханического воздействия складывается за счет действия трех основных энергетических источников: теплоты, выделяемой при прямом прохождении электрического тока через зону контакта инструмента с обрабатываемой деталью и определяемой по закону Джоуля-Ленца; тепла от трения; тепла от пластической деформации поверхностного слоя. В случае обработки поверхностей вращающимся инструментальным роликом с небольшими скоростями и усилиями обкатки тепло от трения и пластической деформации невелико по сравнению с теплом от электроконтактного нагрева [1, 5], поэтому ими можно пренебречь.

Особенностью технологии ЭМПЗ по сравнению с объемной закалкой является весьма высокая скорость нагрева и охлаждения. Поэтому теплопередача в технологии ЭМПЗ относится к нелинейному мгновенному типу теплопередачи. Уравнение баланса энергии выглядит следующим образом [6]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial T}{\partial z}), \quad (1)$$

где Q – эффективность производства тепла на единицу объема, Вт/м<sup>3</sup>; K<sub>x</sub>, K<sub>y</sub>, K<sub>z</sub> – коэффициент теплопередачи в направлениях осей x, y, z, Вт/(м·К); ρ – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>; C – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; t – время, с.

Начальное условие:

$$T(x, y, z, t)_{t=0} = T_1, \quad (2)$$

где T<sub>1</sub> – начальная температура заготовки.

<sup>1</sup> Бамутов В.П. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В.П. Бамутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дукина. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.

Граничные условия конвекции:

$$q_k = \alpha (T_m - T_o), \tag{3}$$

где  $\alpha$  – коэффициент конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_m$  – мгновенная температура, °К;  $T_o$  – температура окружающей среды.

**Цель работы:** определение температурных полей в поверхностном слое втулок из стали У8 при ЭМПЗ с использованием программного пакета ANSYS.

**Материалы и методы.** В процессе расчета использовали инструментальный ролик из бронзы БрХ1 (рис. 1а), втулку из стали У8 (рис. 1б). Размеры втулки Н14.2.925.01.002 насоса Гра 350/40 и инструмента для ЭМПЗ представлены на рисунке 1. Длина контакта инструмента и детали составила 4 мм.

Металлографические исследования структуры поверхностного слоя выполнялись на металлографическом микроскопе GX-51 фирмы OLYMPUS. Рентгеноструктурный анализ проводился на сканирующем микроскопе TESCAN VEGA II LMH.

ЭМПЗ наружного диаметра втулки основана на электроточном взаимодействии инструмента с заготовкой. При назначении режимов обработки для различных типоразмеров наружных втулок необходимо исходить из плотности тока на единицу контактной поверхности. Поэтому сначала необходим расчет площади контакта инструмента с заготовкой. Программа ANSYS использовалась для расчета деформации в зоне контакта. Значения ширины контакта инструмента с заготовкой определялись посредством программного продукта AutoCAD с помощью геометрических построений.

Конечно-элементное моделирование процесса ЭМПЗ состоит из двух последовательных анализов: переходного прочностного анализа (Transient Structural) и переходного теплового анализа (Transient Thermal). Анализ Transient Structural проводился при усилии поджатия инструмента  $P = 400$  Н, физико-механические свойства материалов приведены в таблице [7, 8].

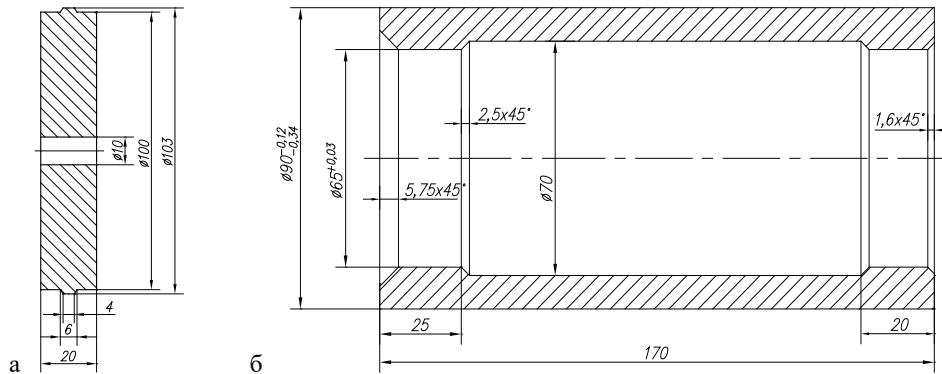


Рис. 1. Эскиз инструментального ролика (а) и втулки (б)

Fig. 1. Sketch of the tool roller (a) and sleeve (b)

Таблица

**Физико-механические свойства бронзы БрХ1 и стали У8**

Table

**Physical and mechanical properties of bronze BrKh1 and steel U8**

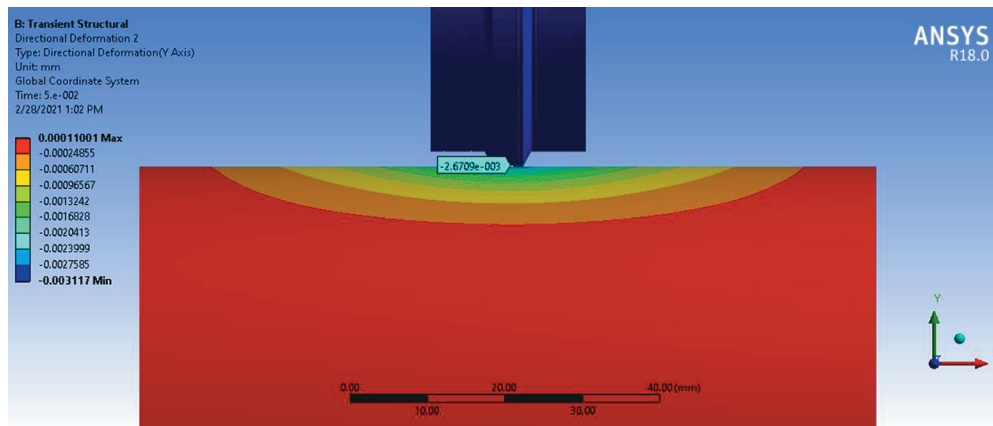
Физико-механические свойства <i>Physical and mechanical properties</i>	Материал / Material	
	Сталь У8 <i>Steel U8</i>	Бронза БрХ1 <i>Bronze BrX1</i>
Плотность, кг/м <sup>3</sup> / Density, kg/m <sup>3</sup>	7839	8920
Модуль Юнга, Па / Young's modulus, Pa	2,09·10 <sup>11</sup>	1,31·10 <sup>11</sup>
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio	0,3	0,34
Объемный модуль, Па / Volume modulus, Pa	1,7417·10 <sup>11</sup>	1,3646·10 <sup>11</sup>
Модуль сдвига, Па / Shear modulus, Pa	8,1·10 <sup>10</sup>	4,9·10 <sup>10</sup>
Предел текучести при растяжении, Па / Tensile yield strength, Pa	1,23·10 <sup>9</sup>	2,7·10 <sup>8</sup>
Предел текучести при сжатии, Па / Compressive yield strength, Pa	1,23·10 <sup>9</sup>	2,7·10 <sup>8</sup>
Предел прочности при растяжении, Па / Tensile strength, Pa	1,42·10 <sup>8</sup>	4,1·10 <sup>8</sup>

Установлено, что при усилии поджатия инструмента 400 Н в месте контакта инструмента и заготовки деформация по стороне усилия поджатия  $y = 2,7 \cdot 10^{-3}$  мм (рис. 2) соответствует пятну контакта  $4 \times 1,0$  мм.

При анализе Transient Thermal использовали сталь У8 с характеристиками: плотность – 7839 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент температурного расширения –  $10^{-6}$  1/°С, изотропная теплопроводность – 48 Вт/м·°С, удельная теплоемкость – 461 Дж/кг·°С.

Разработана математическая модель теплового воздействия при ЭМПЗ образца при следующих режимах:

скорость закалки  $v = 1,2$  м/мин; сила тока во вторичной цепи  $I_2 = 1600$  А; напряжение вторичной цепи  $U_2 = 3$  В.



**Рис. 2. Результаты расчета деформаций на основе 3D-модели**  
**Fig. 2. Results of deformation analysis based on the 3D model**

Время термомеханического воздействия при ЭМПЗ со скоростью закалки 1,2 м/мин (20 мм/с)  $t = 1/20 = 0,05$  с. Для упрощения пренебрегаем кривизной цилиндрической формы обрабатываемой поверхности. Мощность энергии, выделяемой в зоне контакта при ЭМПЗ, рассчитывается по формуле [9]:

$$W = 0,24\eta I_2 U_2, \quad (4)$$

где 0,24 – тепловой эквивалент;  $I_2$  – сила тока во вторичной цепи, А;  $U_2$  – напряжение вторичной цепи, В;  $\eta$  – суммарный коэффициент, учитывающий потери электрического тока во вторичной цепи.

Значение  $\eta$  определяется по формуле:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5, \quad (5)$$

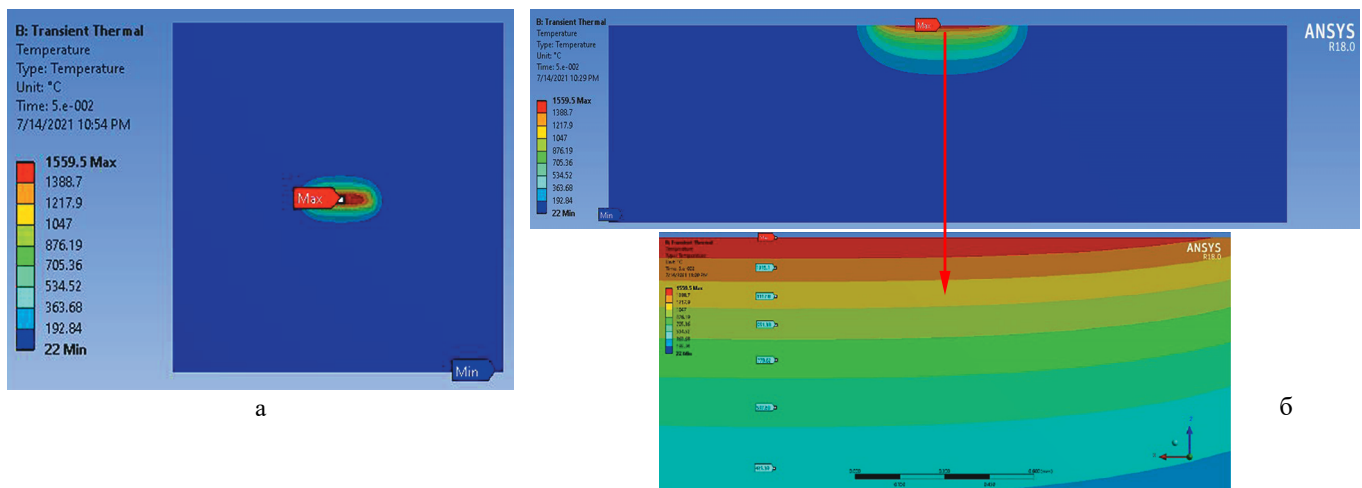
где  $\eta_1$  – коэффициент, учитывающий потери электрического тока во вторичной цепи силового трансформатора;  $\eta_2$  – коэффициент, учитывающий потери в силовых токоподводящих кабелях;  $\eta_3$  – коэффициент, учитывающий потери в местах соединения силового кабеля или шин;  $\eta_4$  – коэффициент, учитывающий потери в технологической оснастке;  $\eta_5$  – коэффициент, учитывающий потери в инструментальной оснастке.

Экспериментально установлено, что суммарные потери находятся в пределах  $\eta = 0,41 \dots 0,43$ . Для расчета принято  $\eta = 0,42$ . Тогда с учетом формулы (1) мощность тепловой энергии  $W = 484$  Вт.

Процесс ЭМПЗ сопровождается охлаждением поверхностей посредством конвекции в среде неподвижного воздуха. Принимаем коэффициент конвекции  $10$  Вт/( $m^2 \cdot K$ ) [10, 11], температуру среды –  $22^\circ C$ .

**Результаты и обсуждение.** В процессе теплового воздействия ЭМПЗ температура в поверхностном слое втулок превышает температуру фазовых превращений и даже температуру плавления стали У8 ( $1450 \dots 1520^\circ C$ ). Однако ввиду времени воздействия 0,05 с не происходит оплавления поверхности заготовки. Результат распределения температур в месте контакта при ЭМПЗ представлен на рисунках 3, 4.

В упрочненной зоне формируется температурный градиент по глубине: температура снижается с максимальной температуры  $1559,5^\circ C$  в центре пятна контакта инструмента с деталью в глубь упрочненной зоны (рис. 3б). В связи с этим в данной зоне формируется неоднородная структура.



**Рис. 3. Модель распределения температур на поверхности (а) и по глубине (б) при ЭМПЗ**  
**Fig. 3. Model of temperature distribution on the surface (a) and in depth (b) during EMSH**

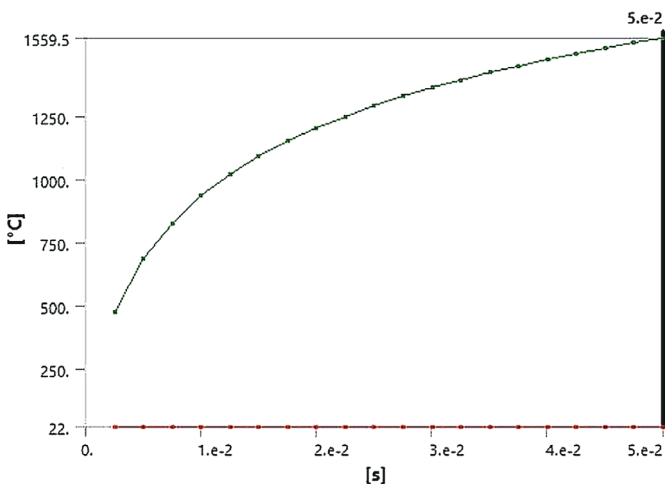


Рис. 4. Зависимость температуры от времени при ЭМПЗ  
Fig. 4. Relationship between temperature and time during EMSH

Результаты исследования микроструктуры образцов из стали У8 после ЭМПЗ свидетельствуют о формировании в зоне упрочнения мелкодисперсного мартенсита (рис. 5, 6), обладающего высокой твердостью.

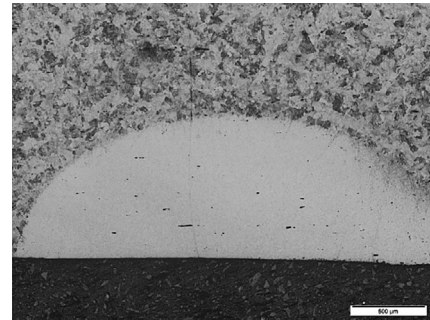


Рис. 5. Микроструктура поверхностного слоя стали У8 после ЭМПЗ  
Fig. 5. Microstructure of the surface layer of U8 steel after EMSH

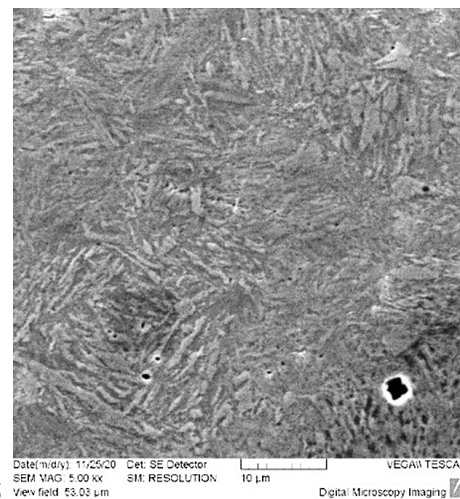
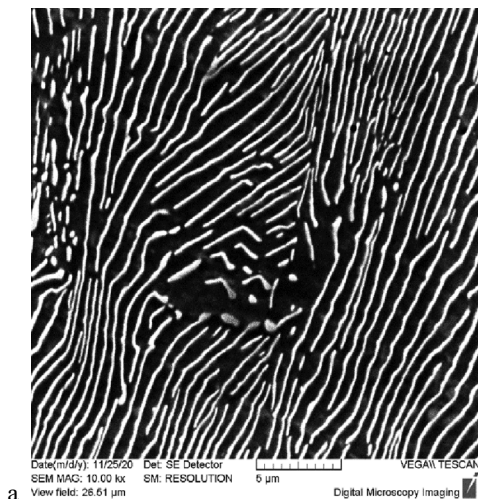


Рис. 6. Результаты рентгеноструктурного анализа поверхностного слоя стали У8 в исходном состоянии (а) и после ЭМПЗ (б)  
Fig. 6. Results of X-ray diffraction analysis of the surface layer of U8 steel in the initial state (a) and after EMSH (b)

### Выводы

1. При ЭМПЗ формируется температурный градиент по глубине упрочненной зоны, максимальная температура в центре пятна контакта инструмента с заготовкой составляет 1559,5°C.

2. После ЭМПЗ в зоне упрочнения при температуре нагрева поверхностного слоя выше фазовых превращений в интервале 1047...1559,5°C формируется мелкодисперсный мартенсит.

### Библиографический список

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.

2. Морозов А.В., Федорова Л.В., Федотов Г.Д. Электромеханическая закалка рабочих поверхностей шлицевых втулок техники сельскохозяйственного назначения // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 2(30). С. 169-175. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2015-2-169-175>

3. Fedorov S., Fedorova L., Zaripov V., Ivanova Yu., Vlasov M., Lvin M.S., Tuyen N.V. Increasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated en-

3. Результаты исследований позволяют разработать технологию ЭМПЗ поверхностного слоя втулок из стали У8 на основе режима упрочнения при следующих параметрах: скорости закалки – 1,2 м/мин; силе тока во вторичной цепи – 1600 А; напряжении вторичной цепи – 3В; ширине электроконтактного воздействия – 4 мм; усилие прижатия инструментального ролика – 400 Н.

### References

1. Askinazi B.M. Uprochnenie i vosstanovlenie detaley mashin elektromekhanicheskoy obrabotkoy [Strengthening and restoration of machine parts by electromechanical processing]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 200 p. (In Rus.)

2. Morozov A.V., Fedorova L.V., Fedotov G.D. Elektromekhanicheskaya zakalka rabochikh poverkhnostey shlitsevykh vtulok tekhniki sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Electromechanical hardening of the working surfaces of splined bushings for agricultural equipment]. *Vestnik Ul'yanskoys gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2015; 2(30): 169-175. <https://doi.org/10.18286/1816-4501-2015-2-169-175> (In Rus.)

3. Fedorov S., Fedorova L., Zaripov V., Ivanova Yu., Vlasov M., Lvin M.S., Tuyen N.V. Increasing the wear resistance of the executive surfaces of machine parts concentrated

ergy flows. *Materials Today: Proceedings*, 2019; 30: 388-392. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.382>

4. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Ivanova Y.S., Voronina M.V. Increase of wear resistance of the drill pipe thread connection by electromechanical surface hardening. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017; 18: 7485-7489.

5. Яковлев С.А., Каныев Н.П. Влияние электрофизических параметров электромеханической обработки на ее технологические особенности // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 3. С. 130-134.

6. White F.M. Heat transfer. Addison-Wesley, 1984. 588 pp.

7. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

8. Машиностроение. Т. II-2. Энциклопедия. Стали. Чугуны / В.В. Мухин, Г.Г. Беляков, А.И. Александров и др.; Под общ. ред. О.А. Банных, Н.Н. Александрова. М.: Машиностроение, 2001. 780 с.

9. Федорова Л.В., Федоров С.К., Иванова Ю.С., Ломпас А.М. Технологические основы повышения износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9(690). С. 85-92. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-85-92>

10. Roberts Ibiye Aseibichin. Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. Thesis or dissertation. University of Wolverhampton, 2012. 246 p.

11. Rubino F., Astarita A., Carlone P. Thermo-mechanical finite element modeling of the laser treatment of titanium cold-sprayed coatings. *Coatings*, 2018; 8(6): 219. <https://doi.org/10.3390/coatings8060219>

#### Критерии авторства

Федорова Л.В., Федоров С.К., Нго В.Т., Иванова Ю.С. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели эксперимент и подготовили рукопись. Федорова Л.В., Федоров С.К., Нго В.Т., Иванова Ю.С. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.08.2021

Одобрена после рецензирования 27.02.2022

Принята к публикации 27.02.2022

energy flows. *Materials Today: Proceedings*, 2019; 30: 388-392. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.382>

4. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Ivanova Y.S., Voronina M.V. Increase of wear resistance of the drill pipe thread connection by electromechanical surface hardening. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017; 18: 7485-7489.

5. Yakovlev S.A., Kanyaev N.P. Vliyanie elektrofizicheskikh parametrov elektromekhanicheskoy obrabotki na ee tekhnologicheskie osobennosti [Influence of the electrophysical parameters of electromechanical processing on its technological features]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2012; 3: 130-134. (In Rus.)

6. White F.M. Heat transfer. Addison-Wesley, 1984. 588 p.

7. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirsky Yu.V. et al. *Marochnik staley i splavov* [Grade guide of steels and alloys]. Moscow, Mashinostroenie, 2003. 784 p. (In Rus.)

8. Mukhin V.V., Belyakov G.G., Aleksandrov A.I. et al. *Mashinostroenie. Tom II-2. Entsiklopediya. Stali. Chuguny* [Mechanical Engineering. Volume II-2. Encyclopedia. Steel grades. Cast iron grades]. Ed. by O.A. Bannykh, N.N. Aleksandrov. Moscow, Mashinostroenie, 2001. 780 p. (In Rus.)

9. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Ivanova Yu.S., Lompas A.M. Tekhnologicheskie osnovy povysheniya iznosostoykosti detaley elektromekhanicheskoy poverkhnostnoy zakalkoy [Technological fundamentals for increasing the wear resistance of parts by electromechanical surface hardening]. *Mashinostroenie*, 2017; 9(690): 85-92. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-85-92> (In Rus.)

10. Roberts Ibiye Aseibichin. Investigation of residual stresses in the laser melting of metal powders in additive layer manufacturing. Thesis or dissertation. University of Wolverhampton, 2012. 246 p.

11. Rubino F., Astarita A., Carlone P. Thermo-mechanical finite element modeling of the laser treatment of titanium cold-sprayed coatings. *Coatings*, 2018; 8(6): 219. <https://doi.org/10.3390/coatings8060219>

#### Contribution

L.V. Fedorova, S.K. Fedorov, V.T. Ngo, Yu.S. Ivanova performed theoretical studies and, based on the results obtained, conducted the experiment and wrote the manuscript. L.V. Fedorova, S.K. Fedorov, V.T. Ngo, Yu.S. Ivanova have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The article was received 26.08.2021

Approved after reviewing 27.02.2022

Accepted for publication 27.02.2022