

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса  
(технические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2024-1-185-191

УДК 621.77.014

**Исследование тепловых процессов при электромеханической закалке  
рабочих поверхностей шлицевых втулок**

**А. В. Морозов**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология производства и ремонт машин».

**А. Н. Еремеев**✉, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства и ремонт машин».

**Д. Р. Мушарапов**, соискатель кафедры «Технология производства и ремонт машин».

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1

✉erem.an@mail.ru

**Резюме.** Применительно к рабочим поверхностям шлицевых втулок на данный момент отсутствуют эффективные технологии поверхностного упрочнения. Для решения данной проблемы предложено использовать технологию электромеханической закалки (ЭМЗ). С целью определения влияния режимов ЭМЗ на распространение тепла от источника в обрабатываемую поверхность проводили исследование тепловых процессов при упрочнении шлицевых втулок. Исследования проводили расчётными (моделированием) и экспериментальными методами. Моделирование тепловых процессов при ЭМЗ полосовым высокотемпературным источником шлицев втулки проводили в среде COMSOL Multiphysics v5.6. На основе дифференциального уравнения теплопроводности сформулирована задача о нахождении температурного поля в некотором объеме, нагреваемом полосовым высокотемпературным источником  $q$ , движущимся по поверхности детали со скоростью  $u$ . Определены расчетные схемы для формирования граничных условий моделируемого процесса. Было установлено, что достижение максимальной температуры  $1178^\circ\text{C}$  на поверхности образца происходит приблизительно через одну секунду, сила тока  $I$  при этом составляет 1000 А. Для закалки образца из стали 40Х применяли одношлицевой инструмент из бронзы БрХ1. Были получены зависимости распространения тепла от источника в инструмент и деталь. Установлено, что достижение высоких значений температур детали происходит в течение одной секунды независимо от величины силы тока, при дальнейшей подаче электрического тока происходит снижение интенсивности прогрева детали. Расхождение между данными численного моделирования с результатами эксперимента составило 8...12 %, что объясняется потерями тока в цепи в реальных условиях.

**Ключевые слова:** электромеханическая закалка, полосовой источник тепла, тепловые процессы, моделирование, метод конечных элементов.

**Для цитирования:** Морозов А. В., Еремеев А. Н., Мушарапов Д. Р. Исследование тепловых процессов при электромеханической закалке рабочих поверхностей шлицевых втулок // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №1 (65). С. 185-191. doi:10.18286/1816-4501-2024-1-185-191

**Study of thermal processes during electromechanical hardening of the working  
surfaces of spline bushings**

**A. V. Morozov, A. N. Ereemeev**✉, **D. R. Musharapov**

FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017 Ulyanovsk, Novyi Venets Boulevard 1

✉erem.an@mail.ru

**Abstract.** As applied to the working surfaces of spline bushings, there are currently no effective surface hardening technologies. To solve this problem, it is proposed to use electromechanical hardening (EMH) technology. In order to determine the influence of EMC modes on the spread of heat from the source to the machined surface, a study of thermal processes during hardening of spline bushings was carried out. The studies were carried out using computational (modeling) and experimental methods. Modeling of thermal processes during EMM with a strip high-temperature source of bushing splines was carried out in the COMSOL Multiphysics v5.6 environment. Based on the differential equation of

thermal conductivity, the problem of finding the temperature field in a certain volume heated by a strip high-temperature source  $q$  moving along the surface of a part with a speed  $u$  is formulated. Calculation schemes for the formation of boundary conditions for the simulated process are determined. It was found that reaching a maximum temperature of  $1178^{\circ}\text{C}$  on the surface of the sample occurs in approximately one second, the current strength  $I$  is 1000 A. To harden a sample made of 40X steel, a single-spline tool made of BrKh1 bronze was used. The dependences of heat propagation from the source into the tool and the part were obtained. It has been established that the achievement of high temperatures of the part occurs within one second, regardless of the magnitude of the current; with further supply of electric current, the intensity of heating of the part decreases. The discrepancy between the numerical simulation data and the experimental results was 8...12%, which is explained by current losses in the circuit under real conditions.

**Keywords:** electromechanical hardening, strip heat source, thermal processes, modeling, finite element method.

**For citation:** Morozov A. V., Ereemeev A. N., Musharapov D. R. Study of thermal processes during electromechanical hardening of the working surfaces of spline bushings/ Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2024;1(65): 185-191 doi:10.18286/1816-4501-2024-1-185-191

### Введение

Важной задачей электромеханической закалки является получение поверхностного слоя высокой твердости, имеющего высокую ударную вязкость, чему способствуют быстрый нагрев, давление инструмента и последующее быстрое охлаждение [1, 2].

За счет подбора оптимальных технологических режимов ЭМЗ достигаются требуемые характеристики поверхностного слоя, что в последующем положительно сказывается на продолжительности эксплуатации. Было установлено [1, 2], что для получения рабочей поверхности заданного качества, недостаточно установить технологические режимы по усредненным (зафиксированным) значениям температур в различных точках по сечению заготовки, так как они значительно отличаются от реальных. В связи с этим актуальной задачей является моделирование тепловых процессов при ЭМЗ.

Учитывая, что шлицевые втулки часто поставляют с невысокими эксплуатационными свойствами рабочих поверхностей, и, вследствие этого, соединения и агрегаты имеют пониженный срок службы, то повышение их свойств поверхностной закалкой рабочих поверхностей будет весьма актуально.

Также в процессе анализа было установлено, что применительно к рабочим поверхностям шлицевых втулок отсутствуют эффективные технологии поверхностного упрочнения [3, 4, 5].

Цель работы – определение влияния режимов ЭМЗ на распространение тепла от источника в обрабатываемую поверхность.

### Материалы и методы

Моделирование тепловых процессов при ЭМЗ полосовым высокотемпературным источником шлицев втулки проводили в среде математического моделирования COMSOL Multiphysics v5.6.

При моделировании процесса ЭМЗ поверхности шлица в качестве источника тепла применяли инструмент с прямоугольной контактной площадкой из BrX1 (рис. 1) [6, 7, 8].

Перемещение инструмента при этом не учитывали (квазистатическая модель).

На основе дифференциального уравнения теплопроводности сформулировали задачу о нахождении температурного поля в некотором объеме,

нагреваемом полосовым высокотемпературным источником  $q$ , движущимся по поверхности детали со скоростью  $u$ , [9, 10, 11].

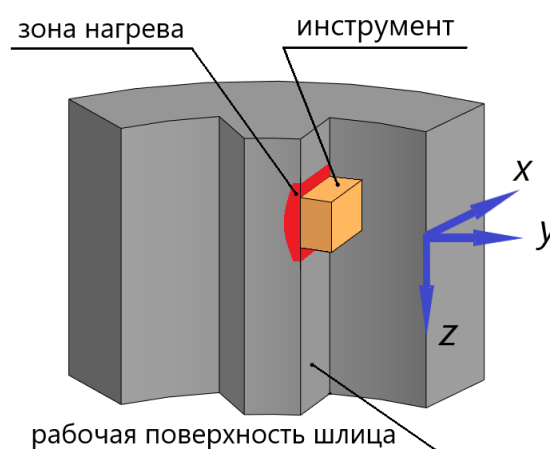


Рис. 1. Схема определения температурного поля обрабатываемого шлица

$$c_i(T_i)\rho_i(T_i)\frac{\partial T_i(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T_i)\frac{\partial T_i(r,t)}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T_i)\frac{\partial T_i(r,t)}{\partial z}\right), \quad \vec{r} \in V_i, i = I, II,$$

где  $V_i$  – пространственные области осесимметричной цилиндрической структуры;

$\vec{r} = \vec{r}(r, \phi, Z)$ , ( $0 \leq \phi \leq 2\pi$ );  $\lambda_i, c_i, \rho_i$  – коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности элементов структуры.

Начальное условие:

$$T_i(\vec{r}, 0) = T_c,$$

где  $T_c$  – начальная температура, принимаем равной температуре окружающей среды, 300 К.

Граничные условия на внешних поверхностях структуры (рис. 2, а) [12, 13, 14]:

$$\begin{aligned} 2, 3 - \lambda_I \frac{\partial T_I(\vec{r}, t)}{\partial n} + \alpha_{\text{вн}}(T_I(\vec{r}, t) - T_c) &= 0, \\ 5, 4 - \lambda_I \frac{\partial T_I(\vec{r}, t)}{\partial n} + \alpha_{\text{вн}}(T_I(\vec{r}, t) - T_c) &= 0, \\ 6, 7, 8, 9 - \lambda_{II} \frac{\partial T_{II}(\vec{r}, t)}{\partial n} + \alpha_{\text{вн}}(T_{II}(\vec{r}, t) - T_c) &= 0 \end{aligned}$$

где  $\frac{\partial}{\partial n}$  – производная по направлению внешней нормали к соответствующей поверхности.

В зоне контакта инструмента и детали 10 с различными теплофизическими параметрами плотность теплового потока непрерывна, то есть

$$-\vec{n}(\lambda \nabla T) = q(\vec{r}),$$

где функция  $q(\vec{r})$  моделируется функцией нормального распределения.

При построении геометрической модели использовали трехмерную идеализацию рассматриваемого объекта. При этом число конечных элементов составило около 3800 [15, 16, 17].

Вид конечных элементов и схема разбиения зоны контакта инструмента с поверхностью отверстия детали приведена на рис. 3.

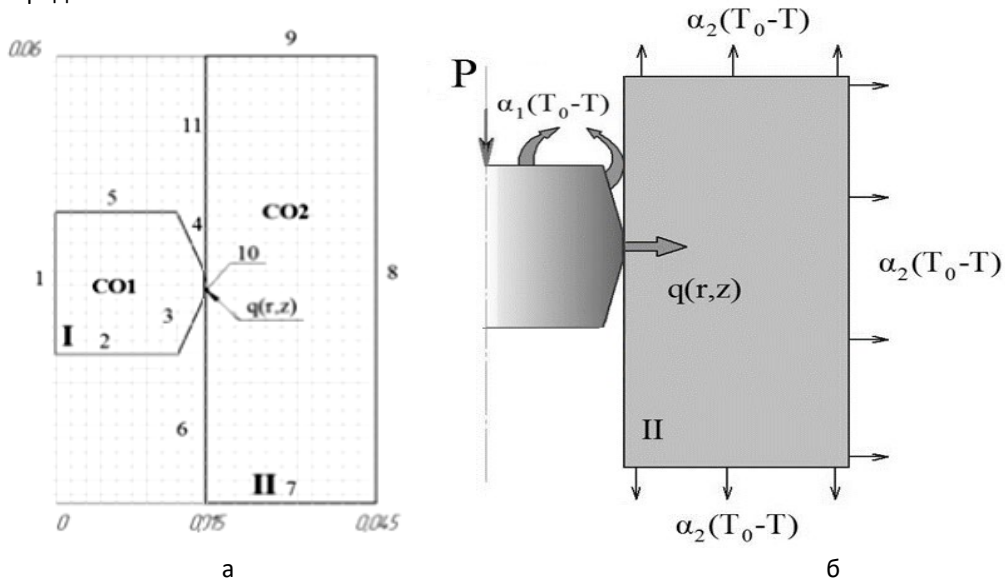


Рис. 2. Расчетные схемы: а – к граничным условиям на внешних поверхностях структуры; б - теплового воздействия от движущегося источника

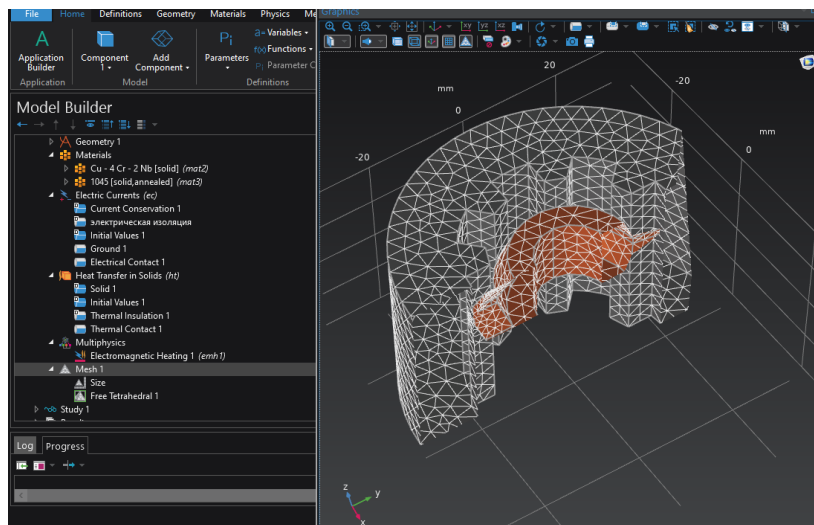


Рис. 3. Общий вид конечно-элементного разбиения зоны контакта

Начальное условие:

$$T_i(\vec{r}, 0) = T_c,$$

где  $T_c$  – начальная температура, принимаем равной температуре окружающей среды, 300 К.

Граничные условия на внешних поверхностях структуры (рис. 2, а) [12, 13, 14]:

$$2, 3 - \lambda_1 \frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial n} + \alpha_{сст}(T_1(\vec{r}, t) - T_c) = 0,$$

$$5, 4 - \lambda_1 \frac{\partial T_1(\vec{r}, t)}{\partial n} + \alpha_{вын}(T_1(\vec{r}, t) - T_c) = 0,$$

$$6, 7, 8, 9 - \lambda_{II} \frac{\partial T_{II}(\vec{r}, t)}{\partial n} + \alpha_{сст}(T_{II}(\vec{r}, t) - T_c) = 0$$

где  $\frac{\partial}{\partial n}$  – производная по направлению внешней нормали к соответствующей поверхности.

В зоне контакта инструмента и детали 10 с различными теплофизическими параметрами плотность теплового потока непрерывна, то есть

$$-\vec{n}(\lambda \nabla T) = q(\vec{r}),$$

где функция  $q(\vec{r})$  моделируется функцией нормального распределения.

#### 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

При построении геометрической модели использовали трехмерную идеализацию рассматриваемого объекта. При этом число конечных элементов составило около 3800 [15, 16, 17].

Вид конечных элементов и схема разбиения зоны контакта инструмента с поверхностью отверстия детали приведена на рис. 3.

Рассмотрим электромеханическую закалку рабочих поверхностей шлицев образца, выполненного из стали 40Х. Для закалки применялся инструмент из материала: бронза марки БрХ1. Были назначены следующие режимы закалки: сила тока  $I = 1000$  А,  $I = 900$  А,  $I = 800$  А.

При исследовании тепловых процессов проводили анализ следующих показателей: время, при

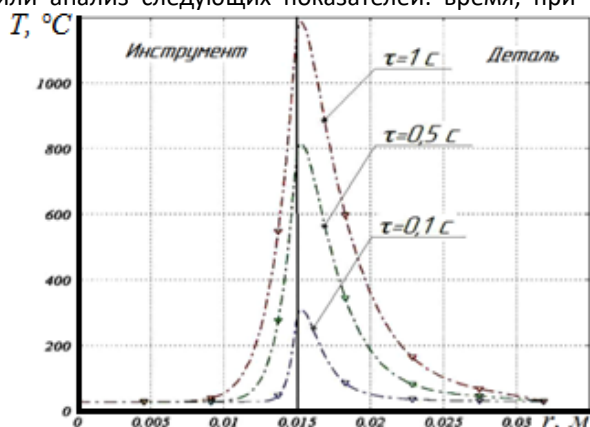


Рис. 4. Распространение тепла от источника в инструмент и деталь

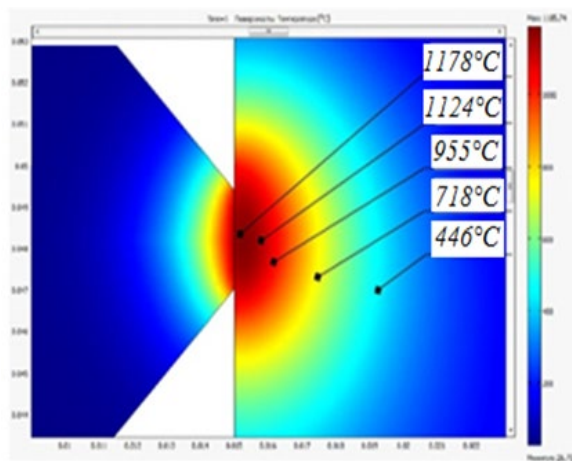


Рис. 6. Распространение тепла от источника в инструмент и деталь

Анализируя график (рис. 6), следует, что температура существенно снижается при распространении вглубь шлица и инструмента, что объясняется высокой электро- и теплопроводностью бронзы.

Для проведения экспериментальных исследований ЭМЗ рабочих поверхностей шлицевых втулок применяли вертикально-фрезерный станок 6В11. В качестве инструмента применяли оправку с одним шлицем, изготовленным из бронзы БрХ1 (рис. 7).

котором происходит нагрев поверхности заготовки до значений максимальной температуры, начиная с момента подачи электрического тока, и определяли, каким образом происходит изменение температуры по толщине контактирующих объектов при квазистатической модели электромеханической закалки.

Используя предлагаемую модель процесса ЭМЗ, было установлено, что достижение максимальной температуры  $1178^{\circ}\text{C}$  на поверхности образца происходит приблизительно через одну секунду, сила тока  $I$  при этом составляет  $1000$  А.

На рис. 4 и 5 представлено распределение температур в инструмент и заготовку в зависимости от времени воздействия теплового источника.

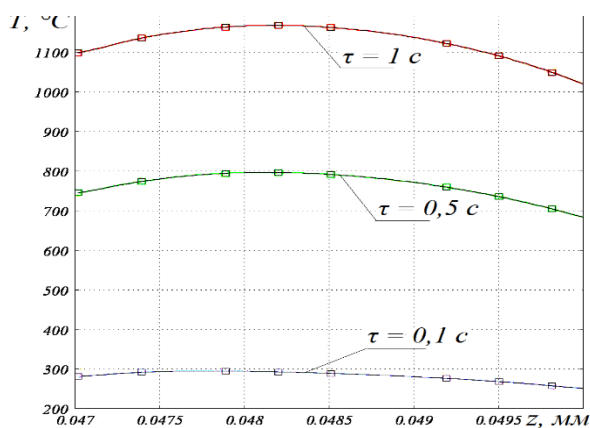
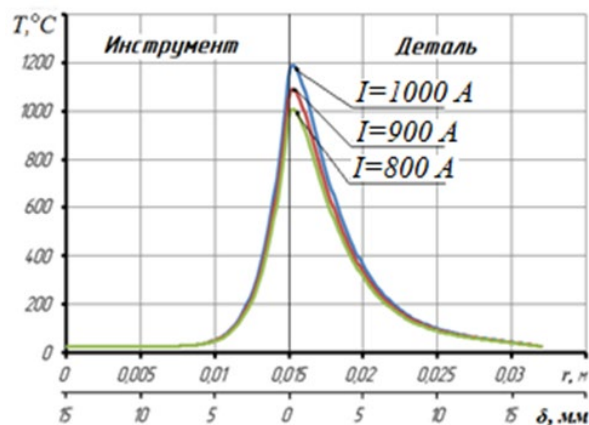


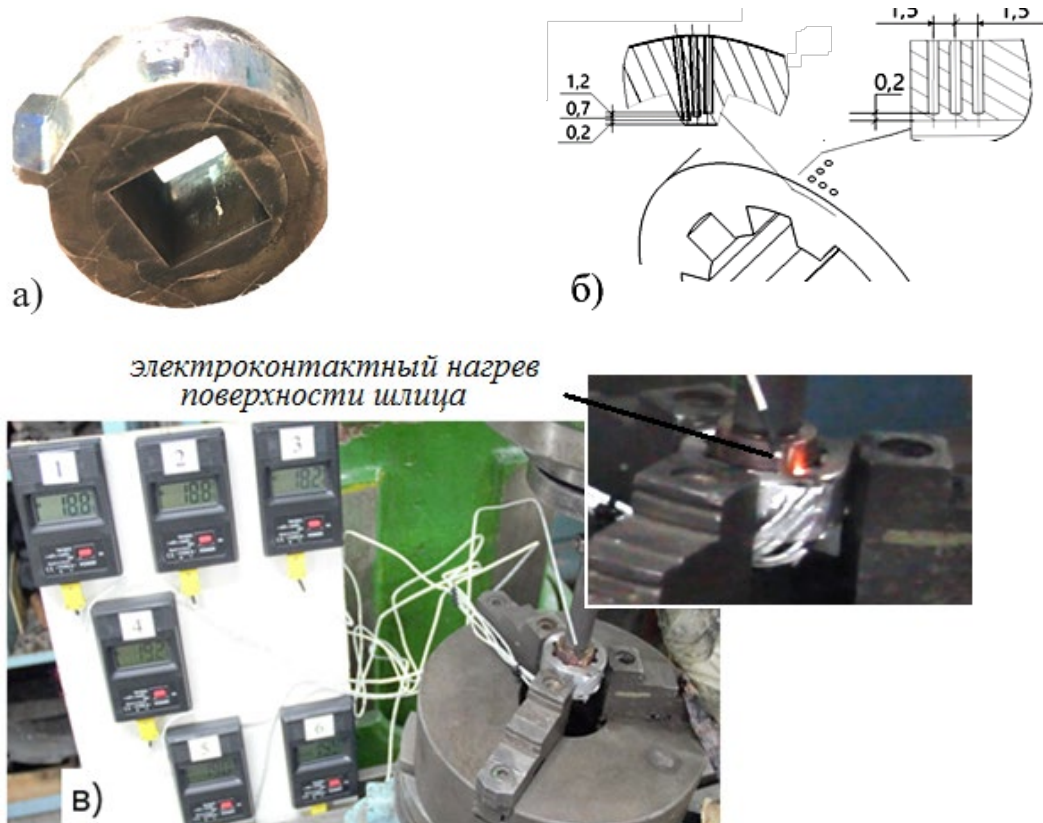
Рис. 5. Изменение температуры по линии контакта инструмента с деталью



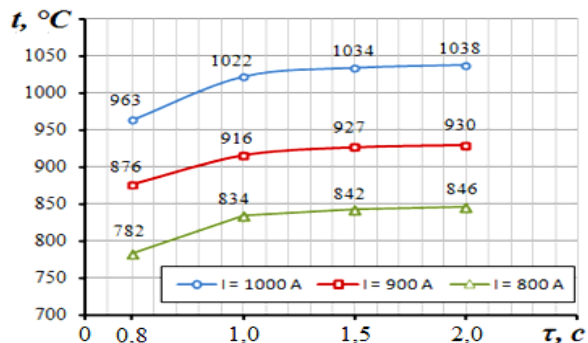
#### Результаты

Получены зависимости распространения тепла от источника в инструмент и деталь с учетом силы тока  $I$ .

Установлено, что достижение высоких значений температур детали происходит в течение одной секунды независимо от величины силы тока  $I$ , при дальнейшей подаче электрического тока температура на поверхности образца повышалась незначительно (рис. 8).



**Рис. 7. Измерение температуры теплонасыщения упрочняемого объема:**  
а - одношлицевой инструмент; б - схема установки термодпар на упрочняемых поверхностях образца; в - компоновка экспериментальной установки



**Рис. 8. Изменение температуры упрочняемой поверхности в зависимости от силы тока I и времени подачи электрического тока τ**

Сопоставляя данные численного моделирования с результатами эксперимента (рис. 8 и 9), обнаружили, что расхождение между ними составляют 8...12 %, что можно объяснить потерями тока в цепи в реальных условиях.

#### Обсуждение

Ранее проведенные исследования [9] и анализ литературы [3, 4, 5] показали, что применительно к рабочим поверхностям шлицевых втулок отсутствуют эффективные технологии поверхностного упрочнения. Применение ЭМЗ для упрочнения втулок

позволяет повысить их эксплуатационные свойства. Характеристики упрочненного слоя в первую очередь зависят от таких параметров ЭМЗ, как скорость нагрева и охлаждения заданного объема. Для определения влияния режимов ЭМЗ на распространение тепла от источника в обрабатываемую поверхность проводили моделирование тепловых процессов и сопоставление полученных при этом значений с данными экспериментальных исследований. Результаты исследований в последующем позволят определить рациональную скорость перемещения инструмента относительно обрабатываемой ЭМЗ поверхности шлица.

#### Заключение

Сравнение экспериментальных и расчетных данных указывают на адекватность полученных моделей. Результаты исследований позволили оценить влияние режимов ЭМЗ на распространение тепла в упрочняемом объеме детали. Было установлено, что достижение максимальной температуры 1178°C на поверхности образца происходит приблизительно через одну секунду, сила тока I при этом составляет 1000 А. При дальнейшей подаче электрического тока существенного повышения температуры в месте контакта инструмента и обрабатываемой поверхности не наблюдали.

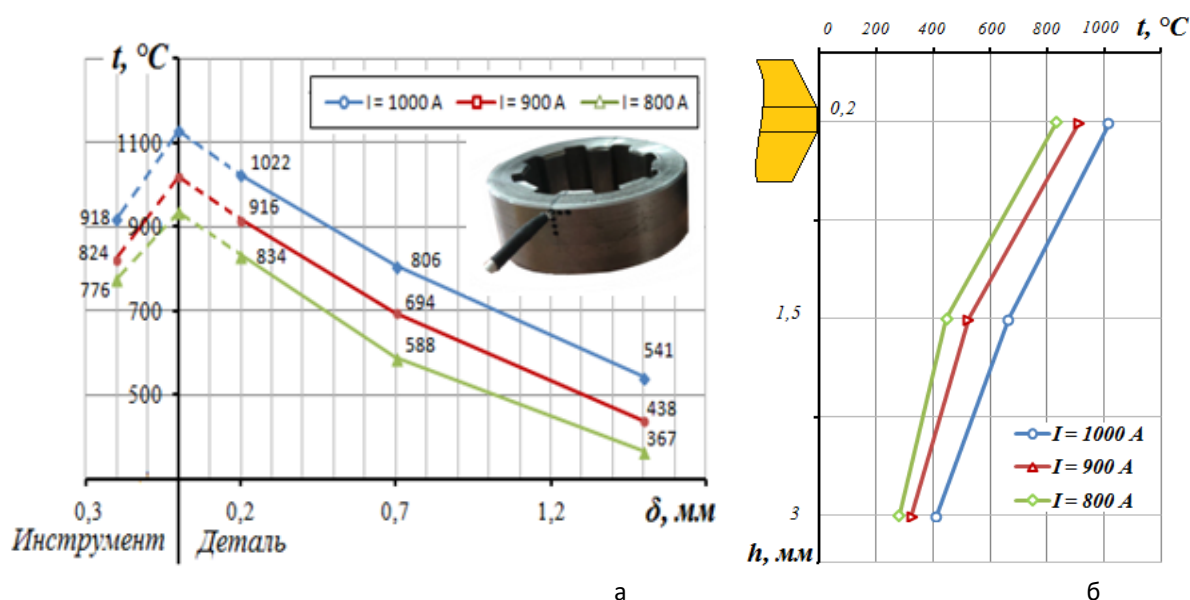


Рис. 9. Изменение температуры  $t$  в зависимости от силы тока  $I$ :

а - вглубь инструмента и детали; б - по длине наружной поверхности шлица перед источником тепла

#### Литература

1. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
2. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, и др. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.
3. Гусенков А. П. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин. М.: Наука, 1992. 405 с.
4. Коняева Н. И., Коняев Н. В. Основные причины выхода из строя деталей сельскохозяйственной техники // Современные материалы, техника и технологии. 2022. № 6 (45). С. 131-138.
5. Кравцова Т. П., Проценко В. Н. Анализ современных способов восстановления деталей машин // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 14. Воронеж: ВГТУ, 2015. С. 123-128.
6. Маркидонов А. В., Коваленко В. В. Применение компьютерного эксперимента при изучении физики твердого тела и материаловедения Современные вопросы теории и практики обучения в вузе: Сборник научных трудов. Том Выпуск 21. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. С. 50-55.
7. Федоров С. К., Морозов А. В., Фрилинг В. А. Исследование температурных полей в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе избирательной электромеханической закалки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 9. С. 117-125.
8. Федотов Г. Д., Морозов А. В., Петряков С. Н. Тепловые процессы при отделочно-упрочняющей электромеханической обработке среднеуглеродистых сталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 7. С. 384-394.
9. Результаты электромеханической закалки рабочих поверхностей шлицев втулок / А. В. Морозов, А. Н. Еремеев, Д. Р. Мушарапов и др. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 17-1. С. 110-116.
10. Болтенков А. А., Селиверстов М. В. Описание математической модели тепловых процессов в системе электрод - деталь - теплоотводящая масса при определении параметров восстановления дисковых рабочих органов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 5-2. С. 91-94.
11. Болтенков А. А., Селиверстов М. В. Вопросы моделирования тепловых процессов при восстановлении режущей способности дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин методом электромеханического деформирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 9(167). С. 159-164.
12. Расчёт времени нагрева симметричной электроконтактной пары до температуры рекристаллизации материала контакт-деталей / А. А. Болтенков, Е. А. Сарсенбаев, М. В. Селиверстов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 1(135). С. 126-132.
13. Математическое моделирование тепловых процессов в системе "Электрод - деталь - теплоотводящая масса" при ремонте деталей / В. Н. Чижов, А. А. Болтенков, Ф. С. Телгожаева // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2009. № 12(62). С. 80-84.
14. Шерышев В. П., Чижов В. Н., Болтенков А. А. Разработка и упрощение математической модели электроконтактного напекания металлических порошков // Совершенствование технологий и технических средств в АПК: Юбилейный сборник. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 2001. С. 118-124.

15. Болтенков А. А., Чижов В. Н., Шерышев В. П. Моделирование и прогноз режимов процесса электроконтактного спекания металлических порошковых материалов при восстановлении деталей // Сварочное производство. 2001. № 8. С. 24-27.

16. Болтенков А. А., Чижов В. Н., Шерышев В. П. Математическая модель процесса электроконтактного напекания // Математическое образование на Алтае: Материалы первой краевой конференции по математическому образованию на Алтае, Барнаул, 21–22 марта 2000 года. Барнаул: Издательство БГПУ, 2000. С. 31-32.

17. Чижов В. Н., Болтенков А. А., Кривочуров Н. Т. Анализ процесса электроконтактного нагрева с использованием теорий размерностей и подобия // Механизация технологических процессов в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности: сборник научных трудов / ответственный редактор А.Т. Илющенко. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет, 1997. С. 225-229.

18. Boltenkov A. A., Chizhov V. N., Sheryshev V. P. Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components // Welding International. 2002. Vol. 1. No. 1. P. 69-72.

## References

1. Askinazi B. M. Hardening and restoration of parts by electromechanical processing. 3rd ed., revised. and additional M.: Mechanical Engineering, 1989. 200 p.

2. Electromechanical processing: technological and physical foundations, properties, implementation / V. P. Bagmutov, S. N. Parshev, N. G. Dudkina, etc. Novosibirsk: Nauka, 2003. 318 p.

3. Gusenkov A. P. Methods and means of hardening the surfaces of machine parts. M.: Nauka, 1992. 405 p.

4. Konyaeva N. I., Konyaev N. V. The main reasons for the failure of parts of agricultural machinery // Modern materials, equipment and technologies. 2022. No. 6 (45). P. 131-138.

5. Kravtsova T. P., Protsenko V. N. Analysis of modern methods of restoring machine parts // Ensuring product quality at the stages of design and technological preparation of production: Interuniversity collection of scientific papers. Issue 14. Voronezh: VSTU, 2015. pp. 123-128.

6. Markidonov A. V., Kovalenko V. V. Application of computer experiment in the study of solid state physics and materials science Modern issues in the theory and practice of teaching at a university: Collection of scientific papers. Vol. 21. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2019. P. 50-55.

7. Fedorov S. K., Morozov A. V., Friling V. A. Study of temperature fields in the contact zone of the tool with the machined surface in the process of selective electromechanical hardening // News of Tula State University. Technical science. 2012. No. 9. P. 117-125.

8. Fedotov G. D., Morozov A. V., Petryakov S. N. Thermal processes during finishing and strengthening electromechanical processing of medium-carbon steels // News of Tula State University. Technical science. 2013. No. 7. P. 384-394.

9. Results of electromechanical hardening of the working surfaces of bushing splines / A. V. Morozov, A. N. Ereemeev, D. R. Musharapov, etc. // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022. No. 17-1. pp. 110-116.

10. Boltenkov A. A., Seliverstov M. V. Description of the mathematical model of thermal processes in the system electrode - part - heat-removing mass when determining the parameters of restoration of disk working bodies // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2019. No. 5-2. pp. 91-94.

11. Boltenkov A. A., Seliverstov M. V. Issues of modeling thermal processes when restoring the cutting ability of disk working bodies of tillage machines using the method of electromechanical deformation // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2018. No. 9(167). pp. 159-164.

12. Calculation of the heating time of a symmetrical electrical contact pair to the recrystallization temperature of the material of contact parts / A. A. Boltenkov, E. A. Sarsenbaev, M. V. Seliverstov // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2016. No. 1(135). pp. 126-132.

13. Mathematical modeling of thermal processes in the system "Electrode - part - heat-removing mass" during the repair of parts / V. N. Chizhov, A. A. Boltenkov, F. S. Telgozhaeva // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2009. No. 12(62). pp. 80-84.

14. Sheryshev V. P., Chizhov V. N., Boltenkov A. A. Development and simplification of a mathematical model of electrical contact baking of metal powders // Improvement of technologies and technical means in the agro-industrial complex: Anniversary collection. Barnaul: Altai State Agrarian University, 2001. P. 118-124.

15. Boltenkov A. A., Chizhov V. N., Sheryshev V. P. Modeling and forecasting the modes of the process of electrocontact sintering of metal powder materials during the restoration of parts // Welding production. 2001. No. 8. P. 24-27.

16. Boltenkov A. A., Chizhov V. N., Sheryshev V. P. Mathematical model of the process of electric contact baking // Mathematical education in Altai: Proceedings of the first regional conference on mathematical education in Altai, Barnaul, March 21–22, 2000. Barnaul: BSPU Publishing House, 2000. P. 31-32.

17. Chizhov V. N., Boltenkov A. A., Krivochurov N. T. Analysis of the process of electric contact heating using theories of dimensions and similarity // Mechanization of technological processes in agriculture and processing industry: collection of scientific papers / executive editor A.T. Ilyushchenko. Barnaul: Altai State Agrarian University, 1997. P. 225-229.

18. Boltenkov A. A., Chizhov V. N., Sheryshev V. P. Modelling and prediction of the conditions of the process of electric resistance sintering of metallic powder materials in reconditioning of components // Welding International. 2002. Vol. 1. No. 1. P. 69-72.