

## Ремонт и восстановление ответственных деталей лесозаготовительных машин электромеханической обработкой

П.А. Бойков<sup>1a</sup>, А.С. Безрук<sup>1b</sup>, Ю.И. Мельников<sup>1c</sup>, О.Л. Картавец<sup>1d</sup>,  
В.Г. Козлов<sup>1e</sup>, А.В. Скрыпников<sup>2f</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный аграрный университет им. Петра I, ул. Мичурина, 1, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

<sup>a</sup> don.boikov2017@yandex.ru, <sup>b</sup> bezruk@mail.ru, <sup>c</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>d</sup> oll\_kart@mail.ru,

<sup>e</sup> vya-kozlov@yandex.ru, <sup>f</sup> aleksei-skrypnikov@inbox.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8943-5622>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4963-5707>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3763-7120>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3584-4380>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>

Статья поступила 10.11.2023, принята 17.11.2023

*Долговечность и надежность контактных поверхностей деталей, подвергающихся износу в узлах трения двигателей внутреннего сгорания лесозаготовительных машин, а также многие другие важнейшие технические и технико-экономические характеристики в значительной мере определяются качеством материалов, используемых при изготовлении коренных или шатунных подшипников. Применение технологии при изготовлении или восстановлении деталей узлов трения наплавкой с последующей электромеханической обработкой позволяет с помощью силового модуля для электромеханической обработки и специальной инструментальной оснастки выполнять на несложном металлорежущем станочном оборудовании операции холодной и горячей поверхностной пластической деформации, поверхностной термомеханической и поверхностной термической обработки. Восстанавливать детали наплавкой с последующей электромеханической обработкой возможно, если слои металла одинаковы по составу, структуре и свойствам с основным металлом, так и значительно отличаются, например, с повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, жаростойкостью и др. Выполненные исследования показывают, что на ремонтных предприятиях технологии восстановления деталей узлов трения наплавкой с последующей электромеханической обработкой обладают рядом преимуществ по сравнению с применяемыми различными способами электродуговой наплавки, прежде всего возможностью получения поверхностного слоя с заданными физико-механическими свойствами, что позволяет значительно увеличить срок службы деталей. В статье представлены аналитические зависимости, дающие возможность определить коэффициент распределения тепла между контактирующими телами ( $\mu$ ), для этого мы предлагаем рассчитывать его по методу А.П. Гусенкова, что дает возможность оценить температуру, возникающую на поверхности трения и в окрестности области контакта, поскольку с повышением температуры при трении и, соответственно, с изменением прочности поверхностных слоев, примыкающих к области контакта, сказывается не только влияние скорости на коэффициент трения, но и прочность трущихся тел в макрообъемах, непосредственно примыкающих к области касания.*

**Ключевые слова:** электромеханическая обработка; тепловой процесс; трение; прочность; поверхностный слой.

## Repair and restoration of critical parts of logging machines with electromechanical processing

P.A. Boikov<sup>1a</sup>, A.S. Bezruk<sup>1b</sup>, Yu.I. Melnikov<sup>1c</sup>, O.L. Kartavtsev<sup>1d</sup>, V. G. Kozlov<sup>1e</sup>, A.V. Skrypnikov<sup>2f</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great; 1, Michurin St., Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue, 19, Voronezh, Russia

<sup>a</sup> don.boikov2017@yandex.ru, <sup>b</sup> bezruk@mail.ru, <sup>c</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>d</sup> oll\_kart@mail.ru,

<sup>e</sup> vya-kozlov@yandex.ru, <sup>f</sup> aleksei-skrypnikov@inbox.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8943-5622>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4963-5707>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3763-7120>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3584-4380>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2571-8687>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>

Received 25.10.2023, accepted 17.11.2023

*The durability and reliability of the contact surfaces of parts subjected to wear in the friction units of internal combustion engines of logging machines, as well as many other important technical and technical and economic characteristics are largely determined by the quality of materials used in the manufacture of core or connecting rod bearings. The use of technology in the manufacture or restoration of parts of friction units by surfacing with subsequent electromechanical processing allows, with the help of a power module for electromechanical processing and special tooling, to perform operations of cold and hot surface plastic deformation, surface thermomechanical and surface heat treatment on simple metal-cutting machine equipment. It is possible to restore parts by surfacing with subsequent electromechanical processing if the metal layers are the same in composition, structure and properties with the base metal, and significantly different, for example, with increased wear resistance, corrosion resistance, heat resistance, heat resistance, etc. The performed studies show that at repair enterprises, technologies for restoring parts of friction units by surfacing with subsequent electromechanical processing have a number of advantages compared to the various methods of electric arc surfacing used, primarily the possibility of obtaining a surface layer with specified physical and mechanical properties, which significantly increases the service life of parts. The article presents analytical dependencies that make it possible to determine the coefficient of heat*

distribution between contacting bodies ( $\mu$ ). The use of the A.P. Gusenkov method when calculating the coefficient makes it possible to estimate the temperature arising on the friction surface and in the vicinity of the contact area, since an increase in temperature during thorns and, accordingly, with a change in the strength of the surface layers adjacent to the contact area, not only the influence of velocity on the coefficient of friction, but also the strength of rubbing bodies in macro volumes directly adjacent to the contact area affects.

**Keywords:** electromechanical processing; thermal process; friction; strength; surface layer.

**Введение.** В лесной промышленности задействован большой объем лесозаготовительной техники, оснащенной дизельными двигателями внутреннего сгорания, в которых наиболее напряженным является узел трения кривошипно-шатунного механизма, определяющий, в основном, периодичность ремонта.

Разрушение контактных поверхностей в узлах трения лесозаготовительной машины не только нарушает работу сопряжений пары «вал – подшипник», но и вызывает нарушение работы других деталей машины вследствие увеличения зазоров, снижения давления масла и появления динамических нагрузок [5]. Изношенные узлы трения (вкладыши подшипников скольжения) из-за технологической сложности в настоящее время не подвергаются ремонту (восстановлению), так как методы восстановления не позволяют получить детали, по своим свойствам не уступающие новым, и требуют значительных затрат.

В настоящее время при ремонте контактных поверхностей в узлах трения лесозаготовительных машин производят замену изношенных деталей вкладышей на новые с последующей их расточкой под ремонтные размеры [14].

Предложенная в начале 60-х гг. прошлого столетия Борисом Моисеевичем Аскинази (1911–1988) электромеханическая обработка, явилась дальнейшим развитием термомеханической обработки [12]. Принципиальным преимуществом электромеханической обработки является сочетание воздействий одновременного упрочнения (за счет изменения структуры материалов) и отделочной обработки (за счет изменения показателей макро- и микрогеометрии поверхности).

**Постановка задачи.** Электромеханическое сглаживание характеризуется сочетанием силовых и тепловых воздействий на поверхностный слой подшипников скольжения лесозаготовительных машин, которые резко изменяют его структуру, твердость, внутренние напряжения, сопротивление износу и шероховатость. Тепло, которое выделяется в месте контакта, отводится в тело инструмента и детали, образуя в поверхностных слоях зоны теплового влияния (температурные поля); изменяя режимы, можно регулировать тепловые влияния.

Следовательно, выбор режима обработки при электромеханическом сглаживании узлов трения лесозаготовительных машин должен осуществляться на основе учета и сознательного управления тепловыми процессами, протекающими в обрабатываемом поверхностном слое.

Глубину упрочненного поверхностного слоя детали возможно определить из следующего уравнения:

$$\delta = \frac{k\mu(0,24\eta_{тр}YU + \frac{f_{сгл}PV}{42,7}}{\pi V c \gamma b T_m}, \quad (1)$$

где  $P$  — нормальное давление при сглаживании, кг;  $V$  — скорость сглаживания, см/с;  $f_{сгл}$  — коэффициент трения при сглаживании;  $\eta_{тр}$  — коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора;  $I$  — сила тока вторичной цепи, А;  $U$  — напряжение, В;  $\mu$  — коэффициент, учитывающий ту часть тепла, создаваемого в зоне контакта, которая отводится в деталь;  $k$  — коэффициент, учитывающий ту часть тепла, которая поглощается сверхтемпературным объемом;  $c$  — удельная теплоемкость металла, кал/г. град;  $b$  — половина ширины светлого слоя;  $\gamma$  — удельный вес металла, г/см<sup>3</sup>;  $T_m$  — температура фазового превращения металла, °С.

Анализируя формулу (1), можно сделать следующие выводы:

1. В связи с тем, что  $T_m$  — температура фазового превращения, следовательно, для таких металлов и сплавов, которые под действием тепловых факторов допускают фазовые превращения.

2. В зоне контакта детали тепло распространяется прямолинейно, во всех направлениях от центра контакта, — а это означает, что распределение тепла берется по ширине контакта  $B$ , следовательно, ведет к завышению влияния тепла.

3. Наиболее правильным считаем определение коэффициента  $\mu$  теоретически, это позволит решить задачу применительно к каждому практическому случаю.

**Методика исследования.** Рассмотрим физический процесс, когда местный непрерывно действующий источник тепла мощностью  $q$  движется по полупространству с постоянной скоростью  $V$ . Следовательно, форма источника тепла будет соответствовать пятну контакта инструмента с деталью.

Эффективная мощность источника тепла для детали определяется следующим образом:

$$q_1 = (0,24\eta_{тр}u + \frac{PVf_{сгл}}{42,7})\mu, \quad (2)$$

где  $f_{сгл}$  — коэффициент трения при сглаживании;  $\eta$  — термический коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{1}{e} = 0,368. \quad (3)$$

Следовательно, уравнение процесса распространения тепла определяется следующим образом:

$$q = \frac{q_1}{F_k}, \quad (4)$$

где  $F_k$  — площадь контакта сглаживающей пластины с деталью.

Процесс распространения тепла мгновенного источника выражается следующим уравнением:

$$T = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2, \quad (5)$$

$$T = \frac{q}{c\gamma(4\pi at)^{3/2}} \cdot e, \quad (6)$$

где  $T$  — температура точек  $x, y, z$  за время  $t$  под действием мгновенно возникающего тепла  $q$  в точках  $x', y', z'$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ ;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Принимаем, что тепло равномерно распределено по площади источника, в этом случае температура  $T$  выражается как:

$$T = \frac{qa}{\pi\lambda V} \int_{x-B}^{x+B} e^{-\eta} d\eta \int_{y-B}^{y+B} \frac{\exp\{-(\eta^2 + \varepsilon^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}\}}{(\eta^2 + \varepsilon^2 + z^2)} d\varepsilon, \quad (7)$$

где:

$$X = \frac{Vx}{2a}; Y = \frac{Vy}{2a}; Z = \frac{Vz}{2a}; L = B = \frac{Vb}{2a}. \quad (8)$$

В выражении (7) можно приравнять к нулю показатель подынтегральной функции внутреннего интеграла, т. е. можно считать, что  $-(\eta^2 + \varepsilon^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \approx 0$ .

После возведения в квадрат и упрощения получим, что  $z^2 + \varepsilon^2$  близко к нулю, т. е. точка, где определяется температура, близка к тепловому источнику.

Тогда из уравнения (7), получим:

$$\frac{\pi \lambda V}{2qa} T_{xoz} = \int_{x-B}^{x+B} d\eta \int_0^B \frac{d\varepsilon}{\sqrt{\eta^2 + \varepsilon^2 + z^2}} = \int_{x-B}^{x+B} \ln \left| \frac{B + \sqrt{\eta^2 + B^2 + z^2}}{\sqrt{\eta^2 + z^2}} \right| (9)$$

После интегрирования по частям уравнения (9) окончательно будем иметь:

$$\frac{\pi \lambda V}{2qa} T_{oz} = (X+B) \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + B^2 + (X+B)^2}}{\sqrt{z^2 + (X+B)^2}} \right| + (B - X) \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + B^2 + (B-X)^2}}{\sqrt{z^2 + (B-X)^2}} \right| + B \ln \left| \frac{X+B + \sqrt{z^2 + B^2 + (X+B)^2}}{X-B + \sqrt{z^2 + B^2 + (X-B)^2}} \right| - z \left[ \operatorname{arctg} \frac{B(X+B)}{z\sqrt{z^2 + B^2 + (X+B)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{B(X-B)}{z\sqrt{z^2 + B^2 + (X-B)^2}} \right], (10)$$

где  $-B \leq X \leq +B$ .

Для вычисления температур по оси OZ полагаем  $X = 0$ , тогда:

$$\frac{\pi \lambda V}{2qa} T_{oz} = 2B \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{\sqrt{z^2 + B^2}} \right| + B \ln \left| \frac{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}} \right| - 2z \operatorname{arctg} \frac{B^2}{z\sqrt{z^2 + 2B^2}}. (11)$$

Так как величина  $2z \operatorname{arctg} \frac{B^2}{z\sqrt{z^2 + 2B^2}}$  незначительна, то ею можно пренебречь:

$$\frac{\pi \lambda V}{2qa} T_{oz} = 2B \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{\sqrt{z^2 + B^2}} \right| + B \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}} \right| (12)$$

Определим  $T_{oz}$  из уравнения  $T_{xoz}$ :

$$\frac{\pi \lambda V}{2qa} T_{oz} = B \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}} \right| - 2B \ln \left| \frac{\sqrt{z^2 + 2B^2} - z}{\sqrt{z^2 + B^2}} \right|. (13)$$

Тогда  $T_{oz}$  из уравнений (12) и (13):

$$T_{oz} = \frac{\pi \lambda V}{2qa} \left( B \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}} \right| + 2B \ln \frac{B}{\sqrt{z^2 + B^2}} \right). (14)$$

но  $B = \frac{vb}{2a}$ , тогда выражение (14) получит следующий вид:

$$T_{oz} = \frac{qb}{\pi \lambda} \left( \ln \left| \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}} \right| + 2 \ln \frac{B}{\sqrt{z^2 + B^2}} \right). (15)$$

Температура на поверхности определяется по формуле:

$$T_0 = 1,75 \frac{qb}{\pi \lambda}. (16)$$

где  $b$  — ширина контакта сглаживающего инструмента с деталью.

Сравниваем выведенную формулу для определения температуры контакта с теоретическими разработками различных авторов.

И.Р. Салахутдинов [12]:

$$T_{II} = \theta_c + q_v \cdot \frac{\delta}{\alpha}; (17)$$

$$\Delta \theta = q \frac{\delta}{2\lambda}, (18)$$

где  $\theta_c$  — температура среды;  $q_v$  — количество тепла, выделяющегося в единице объема за единицу времени;  $q$  — тепловой поток через единицу поверхности в единицу времени.

П.И. Полухин [13]:

$$\theta_{max} = \frac{q}{\lambda} \frac{2\sqrt{ar_0}}{\sqrt{\pi}}. (19)$$

А.В. Уваров [14]:

$$T(b_0; 0; y; 0) = \frac{q}{\lambda} \frac{1}{2\pi b_0} \ln \frac{y + \frac{b_0}{2}}{y - \frac{b_0}{2}}. (20)$$

В.К. Ильин [3; 14] так определяет среднюю температуру на площади источника:

$$\theta_{cp} = 0,946 \frac{ql}{\lambda}, (21)$$

где  $l = \frac{1}{2}$  длины контакта. Основное различие лишь в коэффициенте при  $\frac{q}{\lambda}$ .

**Определение коэффициента распределения тепла между контактирующими телами ( $\mu$ ).** Коэффициент распределения тепла  $\mu$  предлагается определять по следующим зависимостям:

$$\mu = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, (22)$$

где коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  — температуропроводность контактирующих тел;  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — теплопроводность:

$$\mu = \frac{4\sqrt{2}\lambda_2 a_1^{1/2}}{4\sqrt{2}\lambda_2 a_1^{1/2} + \lambda_1 (\pi d_2 V)^{1/2}}, (23)$$

где  $d_2$  — длина скольжения элемента;  $V$  — скорость скольжения.

Определение коэффициента  $\mu$  по формулам (22) и (23) не представляется возможным, так как коэффициент выведен без учета влияния скорости, время контакта, размеров контактов трущейся пары другие теоретические зависимости имеют еще более сложный вид и для практического использования затруднительны. Поэтому предлагается рассчитывать коэффициент  $\mu$  по методу А.П. Гусенкова [9; 15]. Автор разработал инженерный метод расчета температуры трения, в котором учел реальные условия трения, конфигурацию трущихся тел, характер контактирования и многие другие факторы.

Для условий непрерывной работы:

$$\mu = \frac{\sqrt{c_1 \lambda_1 \gamma_1 \eta_1''}}{\sqrt{c_1 \lambda_1 \gamma_1 \eta_1'' + c_2 \lambda_2 \gamma_2 \eta_1''}}, (24)$$

$\eta_1'$  и  $\eta_1''$  — определяется зависимостью, исходя из следующих зависимостей  $t$ :

$$t = \frac{L^2}{4a}; m = \frac{b}{vt}; n = \frac{2}{v} \sqrt{\frac{a}{t}} (25)$$

(штрихи относятся соответственно к внутреннему и наружному телам).

Многие исследователи указывают, что если необходимо получить результаты, имеющие практическое значение, то необходимо уметь оценивать температуру, возникающую на поверхности трения и в окрестности области контакта, поскольку с повышением температуры при трении и, соответственно, с изменением прочности поверхностных слоев, примыкающих к области контакта, связывается не только влияние скорости на коэффициент трения, но и прочность трущихся тел в макрообъемах, непосредственно примыкающих к области касания, если при этом процесс трения достаточно продолжителен. Процесс электромеханического сглаживания может быть сведен к процессу фрикционного трения с подачей дополнительного тепла в зону контакта инструмента с деталью.

Как и при трении, возникающее при электромеханическом сглаживании тепло оказывает влияние на коэффициент трения.

Для отдельных металлов изменения величины коэффициента трения в зависимости от тела, возникающего в зоне контакта, приведены в таблице.

**Таблица.** Зависимость коэффициента трения от температуры

Металл	$f_1$	$T_1$	$f_2$
Железо	0,98	100–200	0,45
Медь	0,78–1,4	400–500	0,50–0,70
Никель	0,92	1200–1400	0,22
Молибден	1,0	800–900	0,28
Хром	0,5–0,6	800–100	0,28–0,32

Анализ таблицы позволяет сделать вывод, что величина коэффициента трения зависит от следующих факторов: материала, состояния контактирующих поверхностей, конструкции фрикционного сочленения или узла режима

работы (скорости скольжения, удельной нагрузки  $P_{уд}$ , температуры контакта  $T_k$  и градиента температуры  $\partial T_k / \partial Z$  в области контакта).

Так как исчерпывающими данными, отражающими совместное влияние вышеперечисленных факторов на процесс трения, наука не располагает, то определение коэффициента трения опытным путем затруднительно. Предлагается в приближенных расчетах вести определение коэффициента трения как функцию температуры контакта двух тел:

$$f_{сгл} = f(T_k), \quad (26)$$

где  $T_k$  — температура контакта.

Предлагаемая зависимость для определения коэффициента трения как функции контакта двух тел имеет вид:

$$f_{сгл} = \frac{(\Delta_1 \alpha_1 + \Delta_2 \alpha_2) T_k \pi D}{\gamma PV}, \quad (27)$$

где  $D$  — диаметр сопряженной пары;  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — глубины проникновения тепла соответствующих тел пары;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи соответствующих тел:

$$\Delta_1 = 0,5 \sqrt{\frac{\lambda_1 D}{\alpha_1}}; \quad \Delta_2 = 0,5 \sqrt{\frac{\lambda_2 D}{\alpha_2}}. \quad (28)$$

С учетом тепла, возникающего при электромеханическом сглаживании, коэффициент трения  $f_{сгл}$  определяется по формуле:

$$f_{сгл} = \frac{((\Delta_1 \alpha_1 + \Delta_2 \alpha_2) T_k \pi D)}{\gamma PV + 0,24 \eta_r \eta U}. \quad (29)$$

Определение фактической площади контакта представляет значительные трудности, так как предложенная формула для определения величины относительного сближения (30) сложна для вычислений:

$$\varepsilon = \frac{a}{n_{max}} \left( \frac{r^{\omega N}}{2^{\omega} b h_{max}^{\omega} A c k_3 H_4} \right). \quad (30)$$

Фактическая опорная поверхность, получаемая при обработке точением (с поверхностью 5–6-го классов), предшествующей чистовой обработке давлением, по результатам исследований и расчетов составляет не более 15–20 % от номинальной.

Ю.Г. Шнейдер предложил следующую формулу определения фактической площади контакта [11]:

$$F'_k = 2 \frac{4}{3} \frac{S_1}{R_{исх}} \sqrt{d_{ш} \sum_{i=1}^{i=n/2} [(R_{исх} - R) - \frac{S_1^2 (i-1)^2}{d_{ш}}]^{3/2}}. \quad (31)$$

Для определения величины фактической площади контакта необходимо произвести практическое измерение характеристик шероховатости. Предложены и другие теоретические выводы определения фактической площади контакта, но они трудоемки при использовании. Наиболее приемлемыми для практики приближенных расчетов являются расчетные формулы, предложенные Ю.Г. Проскуряковым, В.М. Меньшиковым [9; 16; 17]. Так, при обработке внутренних поверхностей предлагается следующая зависимость:

$$F_k = \frac{Db_1 q_0}{0,18 E (\frac{d}{d_1} - 1)}, \quad (32)$$

где  $D$  — диаметр сглаживаемого отверстия, мм;  $d$  — диаметр сглаживающей пластины, мм;  $b_1$  — ширина контакта сглаживающего инструмента с обрабатываемым изделием, мм;  $E$  — модуль упругости обрабатываемого металла, кг/мм<sup>2</sup>.

Опытами установлено, что для ориентировочных расчетов величину давления при сглаживании можно принимать:

$$q_0 = (1,8 - 2,1) \sigma_T, \quad (33)$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести.

Обработка экспериментальных данных определения площади контакта показала достаточно хорошую сходимость экспериментальных и расчетно-теоретических данных.

Для сглаживания наружной поверхности деталей:

$$F_k = \frac{Db_1 q_0}{0,126 E (\frac{d}{d_1} + 1)}. \quad (34)$$

Значительный интерес представляет проверка теоретических положений по опубликованным данным. Так, в ряде работе [1; 9; 18] даны следующие данные, проверенные экспериментом, по электромеханической обработке шейки коленчатого вала из стали 40Х пластинкой из твердого сплава Т15К6 с шириной контактной поверхности  $2b = 10$  мм. Режим электромеханического сглаживания  $I = 470$  А,  $U = 2,5$  В,  $V = 13,6$  м/мин,  $P = 50$  кг. Определялась температура на глубине 0,0075 см.  $T_{0,0075}$  оказалась равна 900 °С.

Воспользуемся этими данными для определения температуры на 0,0075 см от поверхности по формуле (15), для чего определяем:

1. Площадь контакта  $F_k$  (34),  $F_k = 0,82$  мм<sup>2</sup>.
2. Приведенную ширину контакта  $2b$ ,  $2b = \sqrt{F_k} = 0,009$  см,  $b = 0,045$  см.
3. Коэффициент  $\mu$  (24),  $\mu = 0,62$ .
4. Температуру контакта  $T_k$  (16),  $T_k = 950$  °С.
5. Коэффициент трения при сглаживании  $f_{сгл}$  (27),  $f_{сгл} = 0,65$ .

На основании вычисленных данных температура на глубине 0,0075 см составит 907 °С, отсюда:

$$\frac{T_{расч}}{T_{экс}} \cdot 100\% = \frac{907}{900} = 100,8\%. \quad (35)$$

Основные выводы для электромеханического сглаживания можно использовать и для определения температуры при поверхностном упрочнении металлов сглаживанием, в этом случае формулы (15) и (16) примут вид:

$$T_{к\ тока}^6 = 1,75 \frac{\mu f PV}{42,7}; \quad (36)$$

$$T_{oz} = \frac{\mu f PV}{42,7 \pi \lambda} \left( \ln \frac{B + \sqrt{z^2 + 2B^2}}{-B + \sqrt{z^2 + 2B^2}} + 2 \ln \frac{B}{\sqrt{z^2 + B^2}} \right). \quad (37)$$

Сравнивая результаты, полученные расчетным и экспериментальным путем при сглаживании без тока, имеем следующие результаты:  $T_{к\ расч} = 97,1$  °;  $T_{к\ экс} = 95,5$  °; т. е.  $\frac{97,1}{94,5} \cdot 100\% = 103\%$ .

Из приведенных примеров видно, что предложенные теоретические предпосылки можно использовать при электромеханическом сглаживании и поверхностном упрочнении сталей. Для проверки основных теоретических положений при электромеханической обработке бронз необходимо провести дополнительные экспериментальные исследования.

**Заключение.** В месте контакта инструмента с деталью возникают высокие температуры в зависимости от режимов обработки, а это означает, что, изменяя режимы обработки (изменяя степень полноты разупрочняющихся процессов), можно при электромеханическом сглаживании получить следующие виды деформации: холодное, горячее и деформирование промежуточных видов.

Представленные аналитические зависимости дают возможность определить коэффициент распределения тепла между контактирующими телами ( $\mu$ ), для этого мы предлагаем рассчитывать его по методу А.П. Гусенкова, что даст возможность оценить температуру, возникающую на поверхности трения и в окрестности области контакта, поскольку с повышением температуры при трении и, соответственно, с изменением прочности поверхностных

слоев, примыкающих к области контакта, сказывается не только влияние скорости на коэффициент трения, но и прочность трущихся тел в макрообъемах, непосредственно примыкающих к области касания.

Предложенная зависимость для определения коэффициента трения как функции контакта двух тел, а также зависимость определения площади контакта дают достаточно хорошую сходимость экспериментальных и расчетно-теоретических данных.

#### Литература

#### References

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
2. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дуркина Н.Г., Захаров И.Н. Электромеханическая обработка. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.
3. Богодухов С.И., Гребенюк В.Ф., Проскурин А.Д. Обработка упрочненных поверхностей в машиностроении и ремонтном производстве. М.: Машиностроение, 2005. 256 с.
4. Пучин Е.А., Дидманидзе О.Н., Новиков В.С. Технология ремонта машин. М.: Изд-во «УМЦ Триада», 2006. Ч. 1. 348 с.
5. Федоров С.К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электромеханической обработкой: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03. М., 2009. 341 с.
6. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I., Radyuk A.A., Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Parshev S.N. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Ni-20Cr coating // Journal of Alloys and Compounds. 2016. V. 655 (January 2016). P. 11-20.
7. Jutas A., Daunys M. Electromechaninio apdirbimo (EMA) įtaka plieno 45 maiaciklio deformavimo ciklinems charakteristikoms ir ilgaamfiSkumui // Mechanika, Kaunas. 2000. № 25 (25). P. 5-10.
8. Гусенков А.П. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин. М.: Наука, 1992. 405 с.
9. Куksenova Л.И., Лаптева В.Г., Герасимов С.А. Методы исследования поверхностных слоев при трении. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 76 с.
10. Букреев В.Ю., Козлов В.Г., Скрыпников А.В. Методы определения показателей надёжности машин и основные направления их совершенствования // Строительные и дорожные машины. 2022. № 2. С. 17-22.
11. Pawlowski L. The science and engineering thermal spray coatings [M]. New York: John Wiley and Sons Press, 2008.
12. Baik K.H., Grant P.S., Cantor B. The equiaxed-banded microstructural transition during low pressure plasma spraying [J]. Acta Materialia. 2004. 52. P. 199-208.
13. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J. A perspective on plasma spray technology [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2015. 35. P. 491-509.
14. Zhu L., Zhang N., Coddet C. An improvement of low power plasma torch for very low pressure plasma sprayed thin and dense ceramic coatings [C] // International Thermal Spray Conference & Exposition, Hamburg, Germany (September 27-29), 2011. P. 1367-1372.
15. Binl R., Monno M., Boulos M.I. Effect of cathode nozzle geometry and process parameters on the energy distribution for an argon transferred arc [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2007. 27. P. 359-380.
16. Chen X. Heat transfer and flow in thermal plasma [M]. Beijing: Science Press, 2009.
17. Semenov S., Cetegen B. Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in thermal spray processing of materials [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2001. № 10 (2). P. 326-336.
18. Hospach A., Mauer G., Vaßen R. Characteristics of ceramic coatings made by thin film low pressure plasma spraying [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2012. № 21. P. 435-440.
1. Askinazi B.M. Hardening and restoration of machine parts by electromechanical processing. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1989. 200 p.
2. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Durkina N.G., Zaharov I.N. Electromechanical processing. Novosibirsk: Nauka, 2003. 318 p.
3. Bogoduhov S.I., Grebenyuk V.F., Proskurin A.D. Treatment of hardened surfaces in mechanical engineering and repair production. M.: Mashinostroenie, 2005. 256 p.
4. Puchin E.A., Didmanidze O.N., Novikov B.C. Machine repair technology. M.: Izd-vo «UMC Triada», 2006. CH. 1. 348 p.
5. Fedorov S.K. Increasing the durability of agricultural machinery parts by electromechanical processing: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.20.03. M., 2009. 341 p.
6. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I., Radyuk A.A., Bagmutov V.P., Zakharov I.N., Parshev S.N. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Ni-20Cr coating // Journal of Alloys and Compounds. 2016. V. 655 (January 2016). P. 11-20.
7. Jutas A., Daunys M. Electromechaninio apdirbimo (EMA) įtaka rliepo 45 maiaciklio deformavimo ciklinems charakteristikoms ir ilgaamfiSkumui // Mechanika, Kaunas. 2000. № 25 (25). P. 5-10.
8. Gusenkov A.P. Methods and means of hardening the surfaces of machine parts. M.: Nauka, 1992. 405 p.
9. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Gerasimov S.A. Methods of investigation of surface layers under friction. M.: MGТУ im. N.E. Bauman, 2010. 76 p.
10. Bukreev V.YU., Kozlov V.G., Skrypnikov A.V. Methods for determining the reliability indicators of machines and the main directions of their improvement // Construction and Road Building Machinery. 2022. № 2. P. 17-22.
11. Pawlowski L. The science and engineering thermal spray coatings [M]. New York: John Wiley and Sons Press, 2008.
12. Baik K.H., Grant P.S., Cantor B. The equiaxed-banded microstructural transition during low pressure plasma spraying [J]. Acta Materialia. 2004. 52. P. 199-208.
13. Vardelle A., Moreau C., Themelis N.J. A perspective on plasma spray technology [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2015. 35. P. 491-509.
14. Zhu L., Zhang N., Coddet C. An improvement of low power plasma torch for very low pressure plasma sprayed thin and dense ceramic coatings [C] // International Thermal Spray Conference & Exposition, Hamburg, Germany (September 27-29), 2011. P. 1367-1372.
15. Binl R., Monno M., Boulos M.I. Effect of cathode nozzle geometry and process parameters on the energy distribution for an argon transferred arc [J]. Plasma Chemistry and Plasma Process. 2007. 27. P. 359-380.
16. Chen X. Heat transfer and flow in thermal plasma [M]. Beijing: Science Press, 2009.
17. Semenov S., Cetegen B. Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in thermal spray processing of materials [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2001. № 10 (2). P. 326-336.
18. Hospach A., Mauer G., Vaßen R. Characteristics of ceramic coatings made by thin film low pressure plasma spraying [J] // Journal of Thermal Spray Technology. 2012. № 21. P. 435-440.