

УДК/UDC 621.78

DOI: <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-86-95>

EDN: XPSBUZ

Научная статья / Original article

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В. Р. Эдигаров¹, Б. Ш. Алимбаева²✉¹Омский автобронетанковый инженерный институт,
Россия, 644098, г. Омск, ул. 14-й Военный городок, 119²Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева,
Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22✉ botagoz.alimbaeva@mail.ru

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований поверхностных слоев деталей, изготовленных из конструкционных сталей после электромеханического упрочнения.

Установлено, что для электромеханического упрочнения характерно одновременное наличие разнородных структур, неоднородно распределенных в поверхностном слое детали, образованных различной интенсивностью термомеханического воздействия. Чрезвычайно малое время теплового воздействия на поверхностный слой при электромеханическом упрочнении не способствует полному растворению цементита и получению однородного γ -раствора, что может приводить к неполной закалке с включениями цементита. При электромеханическом упрочнении вследствие высокоскоростного нагрева и охлаждения в тонком поверхностном слое формируется мелкозернистая мартенситная структура, а также тончайшая не травящаяся (обычными способами) светлая зона глубиной до 0,1 мм. Светлая зона и основной металл имеют четкую границу, что указывает на существенное различие природы этих структур.

Следовательно, после поверхностной электромеханической обработки наблюдаются значительно меньшие внутренние остаточные напряжения в обрабатываемом поверхностном слое, что подтверждается экспериментально (в данном случае в работе рассматривались напряжения I рода). При этом отдельные микрообъемы поверхностного слоя локальных треков могут подвергаться отпуску, что способствует получению в обработанном слое неоднородной структуры.

Ключевые слова: электромеханическое упрочнение, поверхностный слой, термомеханическое воздействие, высокотемпературное поле, структурно-фазовые превращения, теплопроводность, остаточные напряжения

Для цитирования: Эдигаров В. Р., Алимбаева Б. Ш. Исследование термомеханических процессов в поверхностном слое стальных деталей после упрочняющей электромеханической обработки. Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2026. Т. 10, № 2. С. 86–95. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-86-95>. EDN: XPSBUZ.



© Эдигаров В. Р., Алимбаева Б. Ш., 2026.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

RESEARCH OF THERMOMECHANICAL PROCESSES IN THE SURFACE LAYER OF STEEL PARTS AFTER STRENGTHENING ELECTROMECHANICAL PROCESSING

V. R. Edigarov¹, B. Sh. Alimbaeva²✉

¹Omsk Tank-Automotive Engineering Institute,
14th Voyennyy gorodok St., 119, Omsk, 644098, Russia

²Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulyov,
Zakharyevskaya St., 22, Saint Petersburg, 191123, Russia

✉ botagoz.alimbaeva@mail.ru

This article presents the results of theoretical and experimental studies of the surface layers of parts made of structural steels after electromechanical hardening.

The authors show that electromechanical hardening is characterized by the simultaneous presence of heterogeneous structures, non-uniformly distributed in the surface layer of the part, formed by varying intensities of thermomechanical action. The extremely short thermal exposure time of the surface layer during electromechanical hardening does not facilitate complete dissolution of cementite and the formation of a homogeneous γ -solution, which can lead to incomplete hardening with cementite inclusions. During electromechanical hardening, due to high-speed heating and cooling, a fine-grained martensitic structure is formed in a thin surface layer, as well as the thinnest non-etchable (by conventional methods) light zone with a depth of up to 0.1 mm. The light zone and the base metal have a distinct boundary, indicating a significant difference in the nature of these structures.

Therefore, the research proves that significantly lower internal residual stresses present in the treated surface layer after surface electromechanical processing, which is confirmed experimentally. In this case, stresses of the first kind were considered in the study. Moreover, individual micro-volumes of the surface layer of local tracks can be tempered and contribute to obtain a heterogeneous structure in the treated layer.

Keywords: electromechanical hardening, surface layer, thermomechanical action, high-temperature field, structural-phase transformations, thermal conductivity, residual stresses

For citation: Edigarov V. R., Alimbaeva B. Sh. Research of thermomechanical processes in the surface layer of steel parts after strengthening electromechanical processing. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2026;10(2):86–95. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2026-10-2-86-95>. EDN: XPSBUZ. (In Russ.).



© Edigarov V. R., Alimbaeva B. Sh., 2026.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Повышенный износ деталей в трибосопряжениях приводит к нарушению герметичности узла, агрегата, машины в целом; к изменению условий смазки деталей его образующих; к потере кинематической точности. Феномен абразивного износа, как наиболее часто встречающийся, инициирует существенную деградацию рабочих характеристик механизмов, выражающуюся в уменьшении номинальной мощности агрегатов, повышении коэффициентов потребления топливно-смазочных компонентов, снижении производственной эффективности, ослаблении сил сцепления и тяги оборудования, ухудшении маневренности и управления системами. Повышение сопротивляемости истиранию контактных пар узлов трения достигается посредством внедрения на этапах производства методов поверхностного упрочнения либо модифицирования соприкасающихся зон элементов конструкций [1–7].

В качестве высокоэффективного технологического способа борьбы с износом деталей узлов трения машин, повышения их износостойкости может выступить электромеханическая обработка (ЭМО),

электромеханическое упрочнение (ЭМУ) [8–20] и комбинированные методы на основе ЭМО [12–17, 20]. При этом исследования, направленные на разработку новых и совершенствование существующих методов поверхностного модифицирования, установление закономерностей термо-деформационного воздействия на поверхностный слой в процессе обработки с последующим обеспечением требуемых параметров качества поверхностного слоя деталей, образующих трибосопряжения, являются актуальными и востребованными в современном производстве.

Цель исследования. Исследование термомеханических процессов происходящих в поверхностном слое стальных деталей трибузлов при упрочняющей электромеханической обработке, установление взаимосвязи технологических параметров обработки и изменения параметров качества обрабатываемых поверхностей.

Материалы и методы

Исследование поверхностных слоев стальных деталей, подвергнутых ЭМУ, осуществляли в лабораторных условиях. Обработка осуществлялась

на специальной установке, включающей: станок модели 16K20 (ИТ-1М), источник переменного тока с фазоимпульсным регулированием (с программируемым микропроцессорным блоком управления), а также скользящее контактное устройство, державка и рабочий инструмент [16, 17].

Лабораторные исследования проводились на образцах из конструкционных и инструментальных сталей (например, таких как сталь 45, сталь 50, 38ХС, 45Х, 40ХФ, У7 и др.) с целью установления зависимостей влияния режимов электромеханической обработки на распределение температурных полей в локальных объемах обрабатываемого поверхностного слоя, изменение структурно-фазового и напряженно-деформированного состояния, а также изменение параметров качества поверхностного слоя и их влияние на износостойкость трибосопряжения. Выбор вышеуказанных сталей был осуществлен по причине их широкого использования в производстве различных деталей трибозлово многоцелевых гусеничных и колесных машин, например, таких как балансир 33-сб. 226, втулка 15.10, диск 31-сб. 117, кривошип 31-сб. 138, опора 31-12, червяк 31-16, колесо червячное 31-17, пробка 31-79, опора 32-231, шток 32-427 и др., работающих в сложных условиях трения, изнашивания, высоких знакопеременных динамических нагрузок, при слабой смазке, а зачастую и ее полном отсутствии, от которых требуется повышенная прочность, упругость и износостойкость.

Исходя из предшествующих исследований [8–20], при осуществлении процедуры упрочнения методом электромеханического воздействия были последовательно исследованы вариации ключевых технологически значимых параметров, при этом: сила электрического тока варьировалась в диапазоне от 300 до 1200 А, линейная скорость обработки находилась в пределах от 10 до 40 метров в минуту, удельное давление контакта инструмента (деформационная нагрузка) составляло от 400 до 800 Н, количество проходов инструмента принимало значения два или три раза соответственно.

Анализ фрикционно-трибологических свойств обработанных образцов осуществлялся в условиях сухого или жидкостного трения скольжения, реализованного в контакте с контртелом согласно модели трения типа «вал – вкладыш». Экспериментальные исследования проводились при нормальном давлении контакта от 10 до 30 МПа и относительной скорости перемещения от 0,2 до 0,4 м/с и продолжительностью эксперимента от 6 до 8 часов. Показатель износостойкости системы оценивался путем расчета массового эквивалента интенсивности изнашивания испытуемого стального образца и сопрягающегося элемента. Процедура взвешивания проводилась с применением высокоточных микро-массштабных весов марки ВАР-20Г, обеспечивающих точность измерений менее $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г. Данная методология была признана оптимальной на основании результатов предварительно проведенных опытов. По завершении полного цикла замеров для каждой тестируемой единицы продукции производился расчет усредненных значений экспериментальных величин, а также среднее значение показателя массовой скорости процесса разрушения материала вследствие трения.

В процессе экспериментальных исследований поверхность образцов, изготовленных в форме дисков, подвергалась электромеханическому упрочнению рабочим инструментом — твердосплавной пла-

стиной с геометрией (радиус инструмента в плане $R = 30$ мм, радиус инструмента в сечении, перпендикулярном оси детали, $r = 15$ мм), изготовленной из сплава твердого спеченного титановольфрамовой группы марки Т15К6. При этом на обрабатываемой поверхности образовывались локальные закаленные треки (в виде витков — полос). В дальнейшем на эту же поверхность наносились другие треки, т. е. производили обработку поверхности в 2–3 прохода, в результате чего отдельные треки пересекались, накладывались друг на друга.

Моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя образцов при ЭМУ точечным и полосовым высокотемпературным источником производили с использованием программных комплексов ANSYS 15.0 (16.1).

Исследование морфологии и толщины сформированного упрочненного слоя проводилось посредством металлографического анализа полированных срезов стальных образцов, выполненного с использованием световых микроскопов моделей «Neophot-21» и МИМ-8. Анализ фазово-кристаллического состава поверхностного слоя и изменений, происходящих в ходе модификационного процесса и последующего воздействия трения, проводился методами рентгеновской дифракционной спектроскопии. Рентгенодифракционные картины, полученные с поверхностей испытываемых образцов, регистрировали на аппарате ДРОН-3М с использованием монохроматизированного излучения с длиной волны $\lambda = 0,154$ нм в режиме двойного экспонирования.

Основная часть

Проведенными ранее исследованиями установлены определенные закономерности, касающиеся изменения строения и свойств материала, произошедших после однократного термомеханического воздействия инструмента на обрабатываемый поверхностный слой [10, 11, 20]. Однако особенностью ЭМО является то обстоятельство, что обработка по всей ширине поверхности детали складывается из последовательной обработки винтовых участков — треков. Каждый следующий трек (виток) своим краем частично налагается на ранее обработанный, что вызывает в определенных объемах образование закалочных структур, а в других — частичный отпуск, что оказывает значительное влияние на эксплуатационные показатели обработанной поверхности [13–15].

Металлографический анализ поверхностных слоев металлических образцов в каждом из полученных ЭМУ треков показал однородность по их глубине, упрочненный слой представляет собой мартенсит с залеганием на глубину до 2,0 мм, при соответствующих режимах обработки, за которым следует сравнительно узкий слой троостито-мартенситной структуры, и далее слой сорбита, который плавно переходит через структуры неполной закалки в структуры исходного материала.

Анализ структуры закаленного слоя показывает удовлетворительную однородность в каждой из исследуемых зон. Исходное строение материала обрабатываемых образцов цементит в основной массе α -раствора. Чрезвычайно малое время теплового воздействия на поверхностный слой при ЭМУ, казалось, не будет способствовать полному растворению цементита и получению однородного γ -раствора, что привело бы к неполной закалке с включениями цементита. При этом следует отметить, что в случае

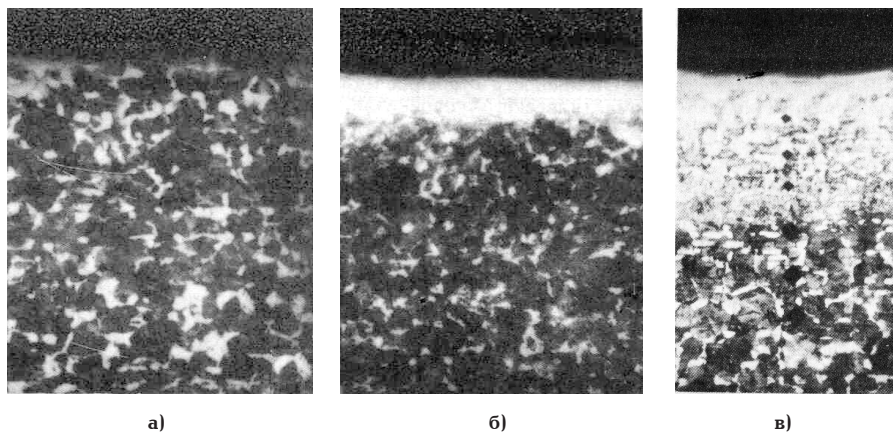


Рис. 1. Микроструктура стали 38ХС (x125): а) исходная, после нормализации (структура Ф+П); б) после электромеханического упрочнения на режиме $I = 600$ А, $v = 10$ м/мин, $P = 400$ Н (структура светлая зона + смесь мелкодисперсного Ф + П); в) упрочненный поверхностный слой (структура мартенсит + наклепанный феррит) [10]

Fig. 1. Microstructure of the 38ХС (x125) steel: а) initial, after normalization (structure Ф+П); б) after electromechanical hardening at $I = 600$ А, $v = 10$ m/min, $P = 400$ Н (structure light zone + mixture of finely dispersed Ф + П); в) hardened surface layer (structure martensite + work-hardened ferrite) [10]

обработки крупнозернистой доэвтектоидной стали на определенной глубине в поверхностном слое могут находиться нерастворимые зерна феррита, что связано напрямую со значениями температуры в этой области в процессе обработки, которая не превышает $A_{с3}$, а также низкими значениями давлений (деформаций), что в итоге несколько снижает эксплуатационные свойства обработанной поверхности. Однако специфические условия, характерные для ЭМО и ЭМУ, в частности ее термомодеформационное воздействие, оказывают решающее влияние на процесс растворения цементита. В отдельных случаях наблюдаются мелкие частицы Fe_3C , не успевшие перейти в твердый раствор. Этот слой расположен близко к изотермической поверхности в $750^\circ C$, что делает вполне естественным неполное растворение цементита.

Металлографическое исследование тонкой внутренней структуры опытных образцов выявило сходство субструктурных особенностей внутреннего слоя, состоящего преимущественно из перлитных и ферритных составляющих (рис. 1). Под воздействием электромеханического упрочнения вследствие быстрого локального разогрева и последующего интенсивного охлаждения в узком приповерхностном слое возникает мелкоигольчатая мартенситовая структура наряду с ультратонким, практически не визуализируемым обычным травлением светло-серым слоем толщиной порядка 0,1 мм. Границы перехода между светлым участком и базовым материалом четко обозначены, свидетельствуя о резких отличиях физико-химических свойств указанных областей. Согласно данным рентгеноструктурного анализа, представленным в литературе [10, 11, 16, 17, 20], указанный светлый слой характеризуется присутствием высокодиспергированной мартенситной фазы и демонстрирует существенно повышенную микротвердость (около $H_p \approx 5360$ МПа). Наблюдаемые изменения связаны с формированием сложной ферритно-мартенситной структуры поверхностного слоя вследствие высокоскоростного нагрева и непродолжительности тепловых воздействий, препятствующих полному распаду ферритной составляющей. Ключевым параметром технологического процесса, оказывающим значительное влияние на степень распространения

фазовых переходов, выступает интенсивность протекающего электрического тока.

При реализации технологии ЭМУ специфические условия формирования аустенитной фазы принципиально отличаются от аналогичных процессов, наблюдаемых при традиционных способах закалки, например, токами высокой частоты или иных общепринятых методиках термообработки, что обуславливает ряд характерных особенностей данного метода.

1. Экстремально высокие темпы нагревания вызывают смещение границ фазовых переходов в сторону более высоких температурных режимов. Полное завершение реакции перлитно-аустенитного преобразования наблюдается при температурах, превышающих уровень начала аллотропического перехода структурно чистого феррита. Оптимальная температура закалки возрастает пропорционально увеличению градиента скорости теплового воздействия. При этом высокие скорости нагрева и последующее высокоскоростное охлаждение за счет отвода тепла внутрь обрабатываемой детали или дополнительного охлаждения зоны обработки приводит к образованию в тонком поверхностном слое мелкоигольчатого мартенсита, однако условия термической обработки не способствуют росту зерна ввиду крайне малой продолжительности нагрева и выдержки.

2. Структурные превращения (преобразования аустенита и перлита) в высокотемпературном микрообъеме упрочняемого поверхностного слоя происходят практически одновременно.

3. Перлитно-аустенитное преобразование протекает в температурном диапазоне, ширина которого увеличивается с ростом скорости нагрева, тогда как при традиционной закалке данное превращение осуществляется в достаточно узком диапазоне температур $A_{c1} + (30 - 50)^\circ C$.

4. Высокие темпы нагрева приводят к тому, что диффузионные механизмы перестроения объемно-центрированной кубической решетки избыточного феррита в гранецентрированную кубическую структуру аустенита могут не завершаться своевременно на границе раздела GS железо-углеродной диаграммы состояния, вызывая смещение критической точки $A_{с3}$ в область повышенных темпера-

Таблица 1. Влияние технологических режимов ЭМУ на плотность дислокаций
Table 1. Effect of electromechanical hardening process modes on dislocation density

№	Вид обработки	Верхний предел $\rho_D \cdot 10^{12}, \text{см}^{-2}$	Нижний предел $\rho_E \cdot 10^{11}, \text{см}^{-2}$	Истинное значение $\rho_{\text{ист}} \cdot 10^{11} \text{см}^{-2}$	Относительное изменение $\Delta \rho_{\text{ист}}, \%$
1	$I = 220 \text{ А}, P = 450 \text{ Н}, v = 3 \text{ м/мин}$	3,40	0,21	2,65	456
2	$I = 420 \text{ А}, P = 450 \text{ Н}, v = 3 \text{ м/мин}$	34,69	0,23	8,96	1777
3	$I = 220 \text{ А}, P = 650 \text{ Н}, v = 3 \text{ м/мин}$	1,76	0,22	1,98	315
4	$I = 420 \text{ А}, P = 650 \text{ Н}, v = 3 \text{ м/мин}$	1,96	0,28	2,33	390
5	$I = 220 \text{ А}, P = 450 \text{ Н}, v = 9 \text{ м/мин}$	2,45	0,25	2,48	420
6	$I = 420 \text{ А}, P = 450 \text{ Н}, v = 9 \text{ м/мин}$	5,87	0,31	4,25	791
7	$I = 220 \text{ А}, P = 650 \text{ Н}, v = 9 \text{ м/мин}$	1,80	0,20	1,92	302
8	$I = 420 \text{ А}, P = 650 \text{ Н}, v = 9 \text{ м/мин}$	25,25	0,25	7,98	1574
	Без обработки	0,15	0,14	0,48	

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

тур. Образующийся таким образом аустенит обладает неравномерным распределением углерода внутри отдельных микроконтуров, характеризующихся высокими температурами. Последующее быстрое охлаждение в рамках процесса электромеханического упрочнения способствует повышению уровня дефектов в структуре, поскольку усиливаются эффекты фазового наклепа, подавляются релаксация напряжения и задерживаются процессы рекристаллизации, в результате чего сохраняется значительная доля дефектов γ -фазы. Эти факторы ведут к уменьшению размеров зёрен, увеличению плотности дислокаций и возрастанию упругих напряжений в кристаллической решётке. Результаты расчетов плотности дислокаций в зависимости от технологических режимов обработки приведены в табл. 1.

Формирующийся при этом мартенсит отличается меньшей степенью крупности частиц по сравнению с классическими видами закалки и представлен в основном игольчатой структурой малого размера или безыгольчатой формой. Помимо этого, мартенсит, полученный в результате ЭМУ, проявляет гетерогенность распределения углерода, что обеспечивает его увеличенную твёрдость относительно однородного мартенсита. Вследствие этого механические характеристики поверхностного слоя сталей после обработки ЭМУ качественно отличаются от соответствующих характеристик тех же материалов, подвергнутых иным видам термического упрочнения.

Для моделирования пространственного распределения температурных полей в локальных объёмах стали при проведении электромеханического упрочнения применялись вычислительные методы и специализированные программы. Выявленные закономерности (рис. 2) указывают на достижение необходимых температур фазовых переходов при скоростях обработки, начиная от $v \geq 3,0$ м/мин и минимальной силе тока $I \geq 350 - 400$ А.

Анализ распределения температурных полей показал, что в процессе обработки наблюдается постепенное увеличение температуры рабочего инструмента, что связано с отсутствием теплоотвода от рабочего инструмента или его незначительной величиной. Фрагменты визуализации мгновенного распределения температурных полей в глубь образца и рабочего инструмента представлены на рис. 3. В процессе обработки образца температура рабочего инструмента может увеличиваться более чем на 100°C , при этом на увеличение температуры су-

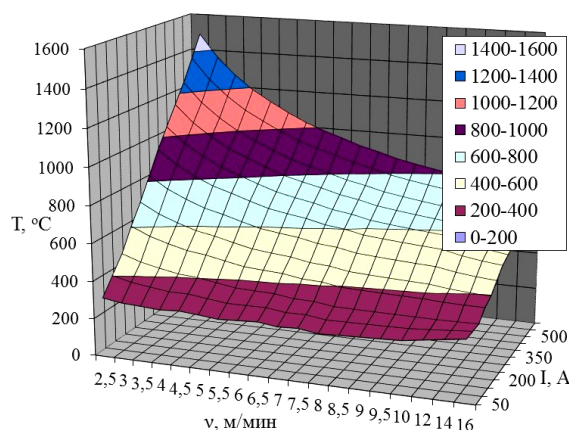


Рис. 2. Зависимость температуры в локальном микрообъеме при ЭМУ от значений силы тока и скорости обработки (упрочнения)

Fig. 2. Dependence of temperature in the local micro-volume during electromechanical hardening as a function of current and machining speed (hardening)

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

ществленное влияние будет оказывать прежде всего сила тока, усилие прижима инструмента, скорость обработки, исходная структура образца.

Аналогичные результаты были получены при моделировании и лабораторных исследованиях специальных сталей, ЭМУ которых осуществлялась на режимах с несколько меньшими значениями скорости упрочнения (обработки), величины силы тока, а также снижением скорости охлаждения поверхностного слоя. Такие режимы обработки позволили исследовать влияние теплопроводности материала и скорости распада твердых растворов на степень упрочнения.

Одним из недостатков ЭМУ является то, что оно не позволяет получить достаточно однородный упрочненный слой вдоль оси изделия. ЭМУ обеспечивает однородность по длине локального трека (витка), однако в промежутках между этими треками (витками) обеспечить однородность не представляется возможным. Наложение витков (треков) в процессе обработки на поверхность детали приводит к их частичному перекрытию, что приводит к возникновению локальных микрообъемов с повторной полной закалкой и неполной закалкой, а также зонами отпуска.

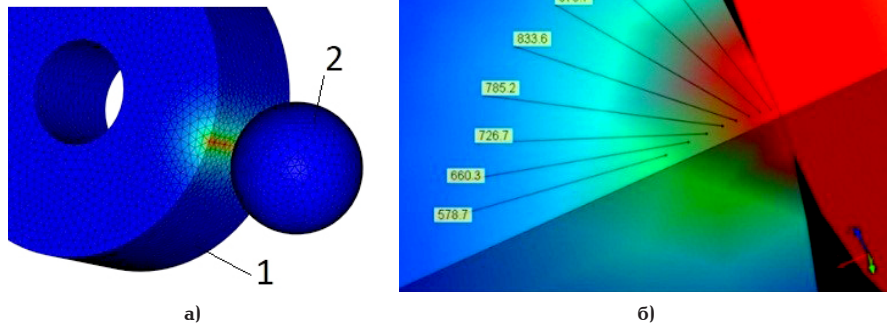


Рис. 3. Фрагменты визуализации мгновенного распределения температурных полей в глубь образца и рабочего инструмента: а) 1 — обрабатываемая деталь (диск), 2 — рабочий инструмент в форме сферы; б) мгновенное распределение температур
 Fig. 3. Visualization fragments of the instantaneous temperature field distribution within the sample and working tool: а) 1 — workpiece (disk), 2 — spherical working tool; б) instantaneous temperature distribution

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

В поперечном сечении вала наблюдается, что первый виток (трек) (рис. 4) на обрабатываемой поверхности имеет закаленную область abc . Вторым витком (треком) в сечении имеет область термического воздействия dfe . Зона перекрытия dec — область повторного термического воздействия на объем первого трека вторым треком, и имеет узкую полосу отпуска вдоль линии de (на рисунке штриховая линия). Таким образом ЭМО состоит из однородно закаленных треков (витков), разделенных между собой тонкими полосами дважды закаленного и в итоге отпущенного материала.

Анализ поперечного к оси вала микрошлифа показал одинаковую по глубине зону термического воздействия в любой из треков (витков), продольный микрошлиф дает наложенные друг на друга закаленные слои (рис. 5). Микротвердость полученных упрочненных треков (витков) вдоль оси обрабатываемой детали изменяется в определенной зависимости. Примерные значения твердости поверхностного слоя после ЭМУ и средние значения глубины упрочненного слоя для различных сталей представлены в табл. 2.

Для некоторых деталей многоцелевых гусеничных и колесных машин (МГКМ), работающих в определенных условиях, ширина отпущенной зоны на поверхности может негативно сказываться на последующей эксплуатации детали в трибоузле. Поэтому необходимо точно определить расположение и размер отпущенной зоны при обработке различных материалов и на различных режимах.

На рис. 5 представлен продольный разрез детали, по поверхности которого движется рабочий инструмент, производя ЭМУ на заданную глубину. Первый виток, образованный на поверхности вала под рабочим инструментом, образует характерный закаленный след I . Зона полной закалки ограничивается изотермой A' , зона неполной закалки — изотермой B' .

Подобную картину получаем при втором обороте вала, но при частичном перекрытии вторым витком первого закаленного первоначально объема, который подвергается вторично тепловому воздействию.

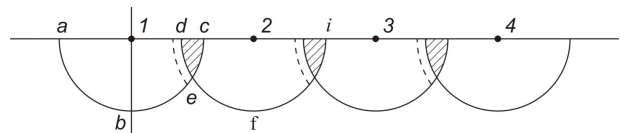


Рис. 4. Сечение обработанной поверхности детали, где 1, 2, 3, 4 — номера треков
 Fig. 4. Cross-section of the machined surface of the part, where 1, 2, 3, 4 are track numbers

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

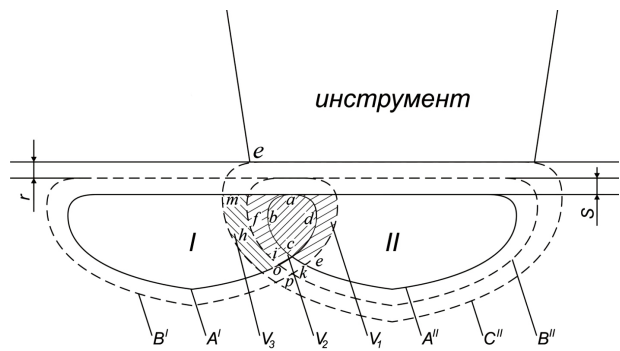


Рис. 5. Продольный разрез поверхностного слоя детали
 Fig. 5. Longitudinal section of the surface layer of the part

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

Изотерма A'' второго витка обеспечивает полную закалку (повторную) материала в области, ограниченной $abcd$. В этой зоне материал по мере продвижения электрода будет претерпевать сначала отпуск, затем нагрев с переходом в область однородных твердых растворов, и после ухода с него рабочего инструмента закалится.

Изотерма B'' может обеспечить лишь неполную закалку материала в зоне между кривыми abc и fik в том случае, если при предшествующем отпуске успеет произойти явная дифференциация цементита и α -раствора. При малом времени термомеханического воздействия можно предпо-

Таблица 2. Значения твердости и глубины упрочнения поверхностного слоя ЭМУ различных сталей
Table 2. Hardness and hardening depth values of the surface layer of electromechanical hardening steels

Марка стали	Примерные значения твердости поверхностного слоя после обработки		Среднее значение глубины упрочненного слоя δ , мм
	HV, МПа	HRC	
Сталь 20, 15, 25	4100	42	0,5
Сталь 20Г, 30Г	5000	48	1,2
Сталь 35, 30, 40	5400	50	1,6
Сталь 45, 40Х, 50	6400	58	2,1
Сталь ШХ9, ШХ15	6700	61	1,4
У8, У7	7000	62	1,9
У10, У11, У12	10000	69	2,0

Источник / Source: разработано авторами / compiled by the authors

жить образование раствора цементита в α -растворе и мартенсита.

Проводя анализ влияния нагрева на ранее закаленный материал в тех местах, где температуры ниже A_{c1} , т.е. там, где возможен отпуск, необходимо учесть, кроме температуры, время теплового воздействия и скорость перехода из менее стабильных структур в более стабильные для различных марок сталей.

Время теплового воздействия при ЭМО чрезвычайно мало, при этом воздействие электрическим током препятствует коагуляции цементита, что позволяет предположить наличие заметных изменений в закаленной структуре трека / при обработке смежного трека в небольшом интервале температур от 500 до 700 °С для обычных углеродистых сталей. В случае обработки специальных закаляющихся сталей возможная зона отпуска будет несколько меньше. На рис. 5 зона отпуска находится между кривыми f_{ik} и m_{hop} .

В случае попытки выровнять структуру по продольной оси изделия последующим отпуском необходимо учесть относительную скорость, с которой при данной температуре одна структура переходит в другую, более стабильную (например, мартенсит в троостит, троостит в сорбит и т. д.).

Исходя из того, что мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе или механическую смесь мельчайших частиц цементита в α -растворе, можно представить отпуск как нарастающий во времени процесс коагуляции частиц цементита.

Структуры мартенсита, троостита, сорбита в данном случае будут иметь разную величину кристаллов цементита — от субмикроскопическую до явно видимых в микроскоп при средних увеличениях. Энергетически троостит отличается от сорбита большим сосредоточением свободной поверхностной энергии, так как в первом отношении суммарной поверхности кристаллов цементита к суммарному же их объему больше, чем во втором.

Немаловажным для поверхностных слоев является и наличие определенных по знаку остаточных напряжений. Рассредоточение остаточных напряжений после поверхностной термической обработки имеет важное значение, так как элементарные закаливаемые микрообъемы, остающиеся после прохождения рабочего инструмента, имеют возможность компенсировать происходящие в них изменения объема за счет находящихся рядом микрообъемов материала. Создающиеся в момент термомодеформационного воздействия внутренние упру-

гие напряжения в закаливающихся микрообъемах могут частично или полностью устраняться благодаря пластической деформации в смежных, нагретых выше A_{c3} , объемах обрабатываемого материала.

Согласно проведенным исследованиям [10–12, 20], было выявлено, что повышение силы тока в процессе фрикционно-электрического взаимодействия сопровождается снижением глубины проникновения и абсолютных значений компрессии остаточных напряжений. Это явление обусловлено повышением температуры нагрева металла, вызванным увеличением силы тока, что увеличивает пластичность материала и стимулирует ориентированное растяжение зёрен поверхностного слоя вдоль направления приложения силы трения. Напротив, обработка без тока или при низких уровнях силы тока приводит к возникновению остаточных напряжений сжатия, связанного с эффектом холодного наклепа и увеличением объема металла без фазовых преобразований.

Экспериментально подтверждено, что воздействие ЭМУ провоцирует возникновение пластической деформации в поверхностном слое материала. Механизм возникновения напряжений является достаточно сложным, и распределение механических напряжений в указанном слое при воздействии ЭМУ остаётся недостаточно изученным. Оценка характера распределения напряжений проводилась исходя из предположения о плоской напряжённой области, при которой угол отражения пика (210) составлял $2\theta = 82^\circ 40'$ для упрочнённых образцов и $2\theta = 82^\circ 50'$ для образцов, прошедших обработку и последующее испытание на износ. Расчёт величины изменения межплоскостного расстояния $\Delta d/d$ составил $3,43 \cdot 10^{-3}$, что соответствует величине эквивалентных касательных напряжений σ_{tan} , равной:

$$\sigma_{tan} = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta d}{d}.$$

Знак полученного результата свидетельствует о наличии сжимающих напряжений.

Анализируя результаты экспериментов, установлено, что режимы энергоподвода в процессе ЭМУ различным образом влияют на параметры шероховатости и трибологические характеристики поверхностей трения. На рис. 6 показаны кривые зависимостей параметра шероховатости R_a от величины силы тока в процессе ЭМО, для стали 38ХС. Общим для всех зависимостей является снижение высоты микронеровностей при увеличении силы тока до 400–450 А, при которой наблюдается минималь-

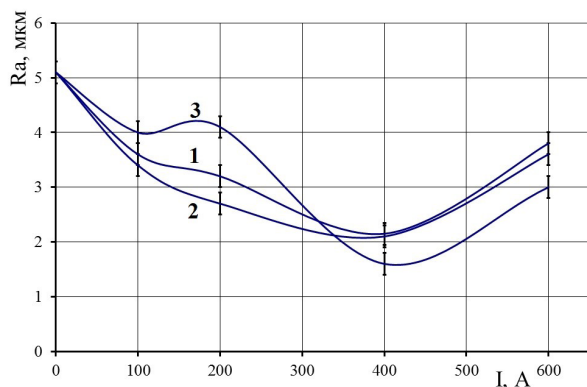


Рис. 6. Зависимость шероховатости от силы тока:
1 — $P = 650$ Н, $v = 3$ м/мин; 2 — $P = 650$ Н, $v = 9$ м/мин;
3 — $P = 450$ Н, $v = 9$ м/мин

Fig. 6. Roughness versus current:

1 — $P = 650$ Н, $v = 3$ м/мин; 2 — $P = 650$ Н, $v = 9$ м/мин;
3 — $P = 450$ Н, $v = 9$ м/мин

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

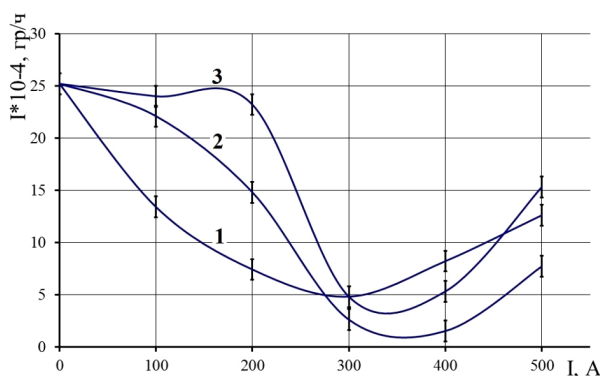


Рис. 7. Зависимость скорости изнашивания от силы тока:
1 — $P = 650$ Н, $v = 9$ м/мин; 2 — $P = 450$ Н, $v = 9$ м/мин;
3 — $P = 450$ Н, $v = 3$ м/мин

Fig. 7. Wear rate versus current:

1 — $P = 650$ Н, $v = 9$ м/мин; 2 — $P = 450$ Н, $v = 9$ м/мин;
3 — $P = 450$ Н, $v = 3$ м/мин

Источник / Source: разработано авторами /
compiled by the authors

ная величина параметра шероховатости R_a , и для различных скоростей обработки и силы деформации составляет R_a 1,6...2,2 мкм. С увеличением силы тока более 450 А высота микронеровностей возрастает.

Усиление нагрузки и ускорение процесса упрочнения приводят к интенсификации темпов изнашивания в стационарном состоянии трения, а после завершения этапа притирки наблюдается рост износа. Однако повышение силы тока оказывает обратное влияние, приводящее к снижению скорости изнашивания, причём этот эффект наиболее ярко проявляется именно при изменении силы тока среди прочих регулируемых факторов. Зависимость скорости изнашивания от силы тока при различных скоростях обработки и силах деформации имеют схожий характер (рис. 7) для стали 40Х. При увеличении силы тока до $I = 220$ А наблюдается снижение скорости изнашивания; минимальная скорость изнашивания при различных величинах силы деформации и скорости обработки достигается при величине силы тока $I = 300 \dots 380$ А, скорость изнашивания возрастает при дальнейшем увеличении силы тока.

Заключение

Путём комплексного использования методов металлографии и рентгеновского структурного анализа выявлены качественные и количественные закономерности изменения свойств поверхностных слоёв стальных образцов в зависимости от режима электромеханического упрочнения, обусловленного изменениями фазового состава, микроструктурной организации, плотности дислокаций и уровня внутренних напряжений.

Проведённые исследования позволили оценить влияние индивидуальных параметров ЭМУ на показатели износостойкости поверхностных слоёв деталей, входящих в состав трибосистем, установить функциональные зависимости вышеуказанных характеристик от скорости движения инструмента в процессе обработки, величины приложенной нагрузки и силы пропускаемого электрического тока. Применение ЭМУ даёт возможность уменьшить показатель шероховатости поверхности в четыре раза, повысить уровень микротвёрдости в 3,0–3,5 раза и увеличить износостойкость трибосопряжения минимум в 3–5 раз.

Проведённые лабораторные исследования показали, что ЭМУ обеспечивает более высокую работоспособность исследуемого трибозула и позволяет увеличить его ресурс в несколько раз.

Исследованиями установлено, что для ЭМУ характерно одновременное наличие разнородных структур в поверхностном слое, распределённых по поверхности, которые могут подвергаться отпуску, при этом отпуск может способствовать получению в закаленном слое неоднородной структуры. Экспериментальные исследования подтвердили данное предположение.

Полученные результаты расширяют существующие научные знания о механизмах структурных преобразований, происходящих в поверхностных областях стальных образцов при применении электромеханического упрочнения, и предоставляют практические рекомендации по внедрению указанного метода финишной упрочняющей обработки конструкционных сталей с целью улучшения механических и функциональных характеристик элементов узлов трения МГК.

Список источников / References

1. Альгин В. Б., Блюменштейн В. Ю., Васильев А. С. [и др.]. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин: монография. Минск: Белорусская наука, 2010. 109 с. ISBN 978-985-08-1238-4. EDN: RBAYTX.
- Al'gin V. B., Blyumenshteyn V. Yu., Vasil'yev A. S. [et al.]. Tekhnologicheskiye i ekspluatatsionnyye metody obespecheniya kachestva mashin. Minsk, 2010. 109 p. ISBN 978-985-08-1238-4. EDN: RBAYTX. (In Russ.).
2. Киричек А. В. Повышение эффективности упрочняющих технологий // Справочник. Инженерный журнал. 2004. № 3 (84). С. 15–20. EDN: SGEFGP.
- Kirichek A. V. Povysheniye effektivnosti uprochnyayushchikh tekhnologiy. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*. 2004;3(84):15–20. EDN: SGEFGP. (In Russ.).
3. Мышкин Н. К., Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии: монография. Москва: Физматлит, 2007. 368 с. EDN: RXGTNL.
- Myshkin N. K., Petrokovets M. I. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskkiye prilozheniya tribologii. Moscow, 2007. 368 p. EDN: RXGTNL. (In Russ.).

4. Суслов А. Г., Шалыгин М. Г. Технологическое уменьшение времени приработки поверхностей трения // Научные технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 42–48. EDN: GGOTXO.
- Suslov A., Shalygin M. Echnological running-in time reduce for friction surfaces. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2024;3(153):42–48. EDN: GGOTXO. (In Russ.).
5. Сафонов С. В., Смоленцев В. П., Портных А. И. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: монография в 5 т. Москва: Спектр, 2014. Т. 3. С. 365–405. EDN: MAKWRF.
- Safonov S. V., Smolentsev V. P., Portnykh A. I. Povysheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley putem modifikatsii poverkhnostnogo sloya. *Progressivnyye mashinostroitel'nyye tekhnologii, oborudovaniye i instrument*. In 5 vols. Vol. 3. Moscow, 2014. P. 365–405. EDN: MAKWRF. (In Russ.).
6. Памфилов Е. А., Пилюшина Е. А., Пыриков П. Г., Тяпин С. В. Обеспечение работоспособности соединений гидросистем технологических машин // Системы. Методы. Технологии. 2012. №1 (13). С. 33–38. EDN: PBDLTP.
- Pamfilov E. A., Pilyushina G. A., Pyrikov P. G., Tyapin S. V. Operability assurance of the joints of production machines hydraulic systems. *Systems. Methods. Technologies*. 2012;1(13):33–38. EDN: PBDLTP. (In Russ.).
7. Айзикович С. М., Александров В. М., Аргатов И. И. [и др.]. Механика контактных взаимодействий: монография. Москва: Физматлит, 2001. 670 с. ISBN 5-9221-0154-4. EDN: RIVBHQ.
- Ayzikovich S. M., Aleksandrov V. M., Argatov I. I. [et al.]. *Mekhanika kontaknykh vzaimodeystviy*. Moscow, 2001. 670 p. ISBN 5-9221-0154-4. EDN: RIVBHQ. (In Russ.).
8. Федоров В. П., Суслов А. Г., Нагоркин М. Н. Технологическое обеспечение физико-механических свойств поверхностного слоя деталей финишной электромеханической обработкой // Научные технологии в машиностроении. 2020. № 12 (114). С. 22–30. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-12-22-30>. EDN: GNREPK.
- Fedorov V., Suslov A., Nagorkin M. Technological support of physical-mechanical properties surface layer in parts at electro-mechanical finishing. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2020;12(114):22–30. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-12-22-30>. EDN: GNREPK. (In Russ.).
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>. EDN: ZEVWNT.
- Fedorova L. V., Fedorov S. K., Ivanova Y. S., Lompas A. M. Technological principles of increasing wear resistance of parts by electromechanical surface hardening. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2017;9(690):85–92. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2017-9-85-92>. EDN: ZEVWNT. (In Russ.).
10. Аскинази Б. М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. Москва: Машиностроение, 1989. 140 с.
- Askinazi B. M. *Uprochneniye i vosstanovleniye detaley mashin elektromekhanicheskoy obrabotkoy*. Moscow, 1989. 140 p. (In Russ.).
11. Багмутов В. П., Паршев С. Н., Дудкина Н. Г., Захаров И. Н. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация: монография. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с. ISBN 5-02-031735-7. EDN: SCBBFH.
- Bagmutov V. P., Parshev S. N., Dudkina N. G., Zakharov I. N. *Elektromekhanicheskaya obrabotka: tekhnologicheskiye i fizicheskiye osnovy, svoystva, realizatsiya*. Novosibirsk, 2003. 318 p. ISBN 5-02-031735-7. EDN: SCBBFH. (In Russ.).
12. Эдигаров В. Р. Поверхностная фрикционно-электрическая обработка алюминиевых сплавов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 10 (727). С. 47–53. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-47-53>. EDN: NSUCHY.
- Edigarov V. R. Surface friction-electric treatment of aluminum alloys. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2020;10(727):47–53. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2020-10-47-53>. EDN: NSUCHY. (In Russ.).
13. Эдигаров В. Р., Литай Е. В. Финишная антифрикционная электромеханическая обработка деталей // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2015. № 3 (68). С. 6–15. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2015-3-6-15>. EDN: UHTHKV.
- Edigarov V. R., Litau E. V. Parts finishing antifriction electromechanical machining. *Obrabotka Metallov / Metal Working and Material Science*. 2015;3(68):6–15. <https://doi.org/10.17212/1994-6309-2015-3-6-15>. EDN: UHTHKV. (In Russ.).
14. Яковлев С. А., Жиганов В. И. Комбинированная обработка стальных и чугуновых поверхностей изделий // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2002. № 7. С. 71–73. EDN: SNDDDED.
- Yakovlev S. A., Zhiganov V. I. Combined processing of steel and cast iron surfaces of products. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2002;7:71–73. EDN: SNDDDED. (In Russ.).
15. Эдигаров В. Р., Алимбаева Б. Ш., Анохин С. Ю. Повышение износостойкости поверхностного слоя деталей комбинированной электромеханической обработкой с отпускком // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 10–14. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-10-14>. EDN: VOTLCR.
- Edigarov V. R., Alimbaeva B. Sh., Anokhin S. Yu. Improving wear resistance of surface layer of parts combined with electromechanical processing with tempering. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020;2(170):10–14. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2020-170-10-14>. EDN: VOTLCR. (In Russ.).
16. Яковлев С. А., Жиганов В. И. Электромеханическая обработка на токарно-винторезных станках // СТН. 2000. № 6. С. 11–16. EDN: JCEBBX.
- Yakovlev S. A., Zhiganov V. I. *Elektromekhanicheskaya obrabotka na tokarno-vintoreznykh stankakh*. *STIN*. 2000;6:11–16. EDN: JCEBBX. (In Russ.).
17. Надольский В. О., Яковлев С. А., Павлов А. В. Высокопроизводительная трехфазная электромеханическая обработка деталей // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 5. С. 38–40. EDN: IBOTGL.
- Nadolsky V. O., Yakovlev S. A., Pavlov A. V. High-performance three-phase electromechanical processing of parts. *Tekhnika v Sel'skom Khozyaystve*. 2007;5:38–40. EDN: IBOTGL. (In Russ.).
18. Федоров С. К., Власов М. В., Гаврилов Д. В. Увеличение ресурса оборудования электромеханической поверхностной закалкой // Главный механик. 2021. № 1. С. 10–14. <https://doi.org/10.33920/pro-2-2101-01>. EDN: WOBBWF.
- Fedorov S. K., Vlasov M. V., Gavrilov D. V. Increasing the service life of the equipment by electromechanical surface quenching. *Chief Mechanical Engineer*. 2021;1:10–14. <https://doi.org/10.33920/pro-2-2101-01>. EDN: WOBBWF. (In Russ.).
19. Морозов А. В. Повышение износостойкости тонкостенных втулок при объемном электромеханическом дорновании // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 2 (88). С. 87–90. EDN: OPVFBN.
- Morozov A. V. Povysheniye iznosostoykosti tonkostennykh vtulok pri ob'yemnom elektromekhanicheskom dornovanii. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2012;2(88):87–90. EDN: OPVFBN. (In Russ.).
20. Багмутов В. П., Дудкина Н. Г., Захаров И. Н. [и др.]. Влияние структуры и свойств поверхностного слоя на усталостную прочность закаленных сталей, упрочненных комбинированной электромеханической обработкой // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2019. Т. 62,

Bagmutov V. P., Dudkina N. G., Zakharov I. N. [et al.]. Influence of structure and properties of surface layer on fatigue durability of hardened steels strengthened by combined electromechanical treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(6):438 – 450. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-438-445>. EDN: JTGVHC. (In Russ.).

Вклад авторов:

В. Р. Эдигаров. Постановка цели и задач исследования, анализ состояния вопроса, разработка математической модели влияния технологических режимов обработки на температуру в зоне термомеханического упрочнения, анализ результатов экспериментальных исследований, формулирование выводов.

Б. Ш. Алимбаева. Проведение металлографического анализа, исследование микроструктуры, подготовка текста статьи, подготовка графических материалов.

Authors' contribution:

Vyacheslav R. Edigarov. Setting of the research goal and objectives, analysis of the problem, development of a mathematical model of the effect of technological processing modes on the temperature in the thermal deformation hardening zone, analysis of experimental results, formulation of conclusions.

Botagoz Sh. Alimbaeva. Conducting the metallographic analysis, studying the microstructure, preparing the text of the article, preparing graphic materials.

Информация об авторах:

ЭДИГАРОВ Вячеслав Робертович, доктор технических наук, доцент, начальник кафедры «Двигатели» Омского автобронетанкового инженерного института, г. Омск.

SPIN-код: 7037-1707

AuthorID (РИНЦ): 722161

AuthorID (SCOPUS): 57214824180

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5504-448X>

e-mail: edigarovs@mail.ru

АЛИМБАЕВА Ботагоз Шайдуловна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Военная архитектура, автоматизированные системы проектирования, естественнонаучные дисциплины» Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева, г. Санкт-Петербург.

SPIN-код: 5553-2107

AuthorID (РИНЦ): 766754

e-mail: botagoz.alimbaeva@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

При подготовке данной рукописи авторы не использовали генеративный искусственный интеллект или аналогичные автоматизированные инструменты.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 01.06.2026; принята к публикации 22.06.2026.

Information about the authors:

EDIGAROV Vyacheslav Robertovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Engine Department, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute, Omsk.

SPIN-code: 7037-1707

AuthorID (RSCI): 722161

AuthorID (SCOPUS): 57214824180

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5504-448X>

e-mail: edigarovs@mail.ru

ALIMBAEVA Botagoz Shaidulovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Military Architecture, Computer-Aided Design Systems, Natural Sciences, Military Institute (Engineering and Technical), Military Educational Institution of Logistics named after General of the Army A. V. Khrulyov, Saint Petersburg.

SPIN-code: 5553-2107

AuthorID (RSCI): 766754

e-mail: botagoz.alimbaeva@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The authors have read and approved the final manuscript.

The authors did not use the Artificial Intelligence or similar automated tools in the article.

The article was submitted 10.04.2026; approved after reviewing 01.06.2026; accepted for publication 22.06.2026.