

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-21

Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой

Александр Олегович Горленко¹, д.т.н.

Михаил Юрьевич Шевцов², аспирант

^{1,2} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ bugi12@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0807-9537>

² mih09mmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5457-6342>

Аннотация. Рассмотрена технология и технологическая оснастка для формирования износостойкого поверхностного слоя имплантацией материалов на основе карбида вольфрама. Исследовано влияние имплантированного порошка карбида вольфрама на формирование в поверхности трения углеродистой стали градиентных износостойких структур, образующихся в процессе реализации технологии комбинированной электромеханической обработки (ИКЭМО). В следствии термосилового воздействия в зоне пластической деформации протекает интенсивная аустенизация стали с растворением порошка карбида вольфрама и последующим образованием композиционных высокодисперсных структур в результате распада пересыщенного вольфрамом переохлажденного аустенита. Проведены комплексные сравнительные испытания на трение и изнашивание конструкционной стали 45 с градиентной структурой упрочненной поверхности и достаточно дорогих и технологически сложных в получении современных износостойких покрытий, и материалов. Рассмотрен вопрос практического применения технологии ИКЭМО применительно к паре трения «ось спутника – спутник». Проведена оценка увеличения долговечности сопряжения «ось спутника – спутник» при реализации рассматриваемых методов обработки и заводской технологии. Представлены рекомендации к применению технологии комбинированной электромеханической обработки на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления.

Ключевые слова: поверхностный слой, износостойкость, электромеханическая обработка, упрочнение, карбид вольфрама, качество поверхностного слоя, триботехнические испытания

Для цитирования: Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Повышение износостойкости цилиндрических поверхностей трения комбинированной электромеханической обработкой // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 3 (153). С. 12–21. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-21

Wear resistance increase in cylindrical frictional interface using combined electromechanical processing

Alexander O. Gorlenko¹, D. Eng.

Mikhail Yu. Shevtsov², PhD student

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ bugi12@bk.ru

² mih09mmo@yandex.ru

Abstract. Processing technology and technological equipment for the formation of a wear-resistant surface layer by implanting materials based on tungsten carbide (WC), are viewed. The effect of implanted WC powder on the formation of gradient wear-resistant structures in the friction surface of carbon steel formed during the implementation of combined electromechanical processing (WRCEMP) technology, has been studied. Resulting from heat and pressure impact in the zone of plastic deformation, intensive austenization of steel occurs with dissolution of WC powder and subsequent formation of highly dispersed composite structures caused by the decomposition of undercooled tungsten-supersaturated austenite. Combined comparative friction and wear tests were carried out for structural steel 45 with a graded structure of a hardened surface and rather expensive and technologically- difficult to obtain modern wear-resistant coatings and materials. The issue of WRCEMP technology practical application used for the «axis of satellite – satellite» friction pair is viewed. An assessment of the durability increase of the «axis of satellite – satellite» interface during the implementation

of the considered processing methods and innovative technology was taken. Recommendations for the use of combined electromechanical processing technology at machine-building enterprises as a highly effective way to ensure and improve the performance of machine parts at the stage of their manufacture are given.

Keywords: surface layer, wear resistance, electromechanical processing, hardening, WC, surface layer quality, tribotechnical tests

For citation: Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. Wear resistance increase in cylindrical frictional interface using combined electromechanical processing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 3 (153). P. 12–21. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-21

Введение

Повышение износостойкости деталей машин, является главной проблемой, для всех областей техники. Повышение надежности машин и механизмов, безотказность и безопасность их работы, повышение эксплуатационных показателей, все это напрямую зависит от износостойкости деталей и узлов машин.

Параметры качества поверхностных слоев (макроотклонений, волнистости, шероховатости, физико-механических свойств) напрямую влияют на повышение эксплуатационных характеристик деталей. Режимы эксплуатации, повышенные нагрузки, скорости относительного перемещения являются основными факторами, влияющими на износ поверхности.

При наличии вышеуказанных факторов существует необходимость в изучении и поиске новых технологических решений повышения износостойкости поверхностного слоя.

Использование дефицитных и дорогих конструкционных материалов во всем объеме изделия нецелесообразно, поэтому экономически обосновано использовать материалы со специальными покрытиями или измененным поверхностным слоем, обеспечивающими нужный комплекс свойств. Наиболее перспективным подходом в укрепляюще-отделочной обработке является использование методов, которые позволяют расширить возможности улучшения качества поверхностных слоев контактирующих цилиндрических поверхностей. Это необходимо для обеспечения минимального износа и поддержания закономерных изменений в качестве поверхности. Карбиды вольфрама W_2C и WC широко применяются для создания разнообразных функциональных материалов. Эти карбиды обладают высокой твердостью, износостойкостью и тугоплавкостью, что делает их идеальным выбором для

разработки износостойких и жаропрочных сплавов.

Цель данного исследования заключается в выявлении прямой связи между износостойкостью цилиндрических поверхностей трения и условиями комбинированной электро-механической обработки. Это позволит лучше понять, какие параметры и процессы влияют на износостойкость поверхностей и как можно оптимизировать эти процессы для повышения долговечности материалов. Дополнительно, важно учитывать, что использование упрочняюще-отделочной обработки не только повышает износостойкость, но также способствует улучшению других характеристик материалов, таких как прочность и стойкость к коррозии. Это открывает новые возможности для создания более долговечных и эффективных материалов для различных промышленных применений. Таким образом, исследования в области упрочняюще-отделочной обработки и применения карбидов вольфрама играют важную роль в развитии новых технологий и материалов, способствуя повышению эффективности производства и улучшению качества конечных продуктов.

Основное содержание и результаты работы

Перед проведением экспериментальных исследований были подготовлены образцы и приборы. Технология комбинированной электро-механической обработки (ИКЭМО) применяется в специальных, сложных технических установках, в состав которых входят: универсальный станок (используется для обработки рабочих машин) с соответствующими инструментами и устройствами для защиты обрабатываемой детали и подачи электроэнергии; высокий ток и низкое напряжение; промышленный блок преобразования энергии; блок управления режимом обработки; способы

замены и оказания помощи в охлаждении топлива; блок интерфейса ПК. Детали вне цилиндрических поверхностей трения (валы, оси, втулки, ролики, поршни) преимущественно изготавливают из конструкционных сталей и сплавов, к которым предъявляются следующие требования: высокая прочность, экономичность, низкая чувствительность к концентрации напряжений и способность справляться с термической обработкой. Одной из наиболее часто используемых сталей для таких деталей является сталь 45.

Нанесение карбидов вольфрама на поверхность при электромеханической обработке [1, 2] осуществляется определенными способами. Перед обработкой на поверхность наносят покрытие, предварительно смешанное в определенной пропорции с нелетучим графитовым смазочным материалом на основе литиевого мыла. При установке карбида вольфрама применялись следующие способы обработки: выходной ток 0,9 кА; напряжение 2,6 В; напряжение, создаваемое на поверхности детали, составляет 100 Н/мм².

Процесс имплантации показан на рис. 3. Частицы карбида вольфрама внедряются в образовавшийся верхний слой, укрепляя его. Затем там же в интенсивных режимах проводят электромеханическую обработку (ЭМО) (рис. 1).



Рис. 1. Процесс имплантирования карбида вольфрама

Fig. 1. The process of WC implantation

При ЭМО были использованы следующие режимы: сила тока 1,4 кА; напряжение 2,9 В; давление, создаваемое на поверхности детали 110 Н/мм². Эффект упрочнения при ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [3, 4].



Рис. 2. Упрочнение при электромеханической обработке

Fig. 2. Hardening during electromechanical processing

В результате проведения эксперимента установлено, что при комбинированной электромеханической обработке после проведения конечных измерений, диаметр образца остается в пределах поля допуска.

В результате обработки на поверхности формируется трехслойная градиентная структура, состоящая из упрочненного слоя толщиной 180...220 мкм (рис. 3, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной 200...250 мкм (рис. 3, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной 20...40 мкм (рис. 3, слой 3) и матрицы, состоящей из нормализованной стали 45.

Слой 2 (см. рис. 3) представляет собой слабонасыщенный вольфрамом феррит, по границам зерен которого выделяется сетка карбида вольфрама. Следовательно, в процессе имплантирования и упрочнения, в слое 2 выделяется максимальное количество энергии, которое переводит систему в метастабильное

состояние с последующим образованием ячеистой структуры, что показано на рис. 4 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен).

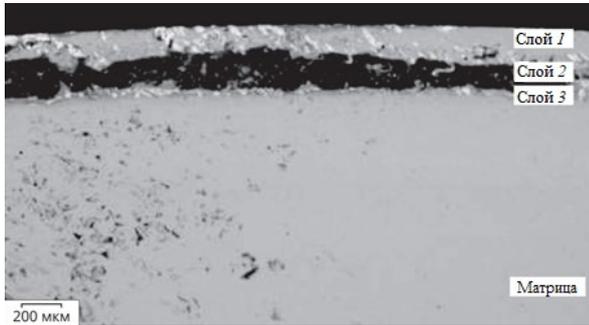


Рис. 3. Структура поверхности стального образца, упрочненного карбидом вольфрама, $\times 100$

Fig. 3. Surface structure of a steel sample hardened with WC, $\times 100$

Данные ячеистые структуры имеют ярко выраженное эвтектическое строение, однако, сетка состоит из нитевидных кристаллов карбида вольфрама, чередующихся с изолированными глобулярными высокодисперсными частичками карбида вольфрама (менее 1,0 мкм). Причем, сами нити эвтектической сетки состоят из коагулировавших дисперсных глобулей карбида вольфрама, образуя в целом, единую композиционную структуру.

В соответствии с известной диаграммой Fe – W, температура слоя 2 в процессе обработки превышает температуру 1060 °С, соответствующую перитектоидной реакции. В этих

температурных условиях протекает полиморфное превращение железа с образованием аустенита и растворением карбида вольфрама в аустените.

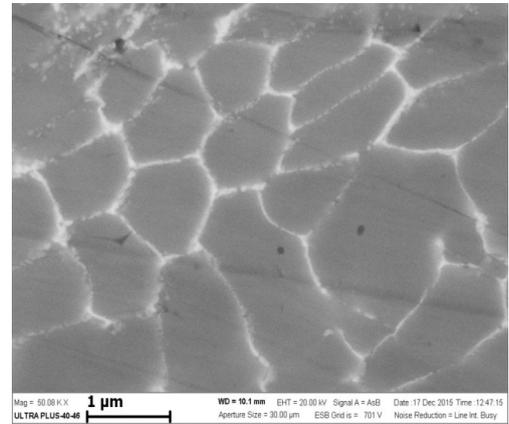


Рис. 4. Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2, $\times 50800$

Fig. 4. Cellular structure of undercooled austenite in layer 2, $\times 50800$

Микротвердость по Виккерсу измерялась на микротвердомере мод. ПМТ-3М. Измерение диагоналей отпечатков проводилось на микроскопе металлографическом инвертированном мод. Метам ЛВ-34 с применением автоматизированной системы анализа «Микро-Анализ View». Значениям микротвердости по Виккерсу для многослойной упрочненной градиентной структуры износостойкой поверхности приведены в табл. 1.

1. Микротвердость поверхностного слоя стали 45, упрочненного карбидом вольфрама

1. Microhardness of the surface layer of 45 steel reinforced with tungsten carbide (WC)

Микротвердость слоев HV, МПа			
Слой 1	Слой 2	Слой 3	Матрица
741...846	546...633	431...525	304...332

Для определения триботехнических показателей были проведены комплексные сравнительные испытания на трение и изнашивание конструкционной стали 45 с градиентной структурой упрочненной поверхности и достаточно дорогих и технологически сложных в

получении современных износостойких покрытий, и материалов.

Для комплексных сравнительных испытаний износостойкости исследовались наружные цилиндрические поверхности образцов, изготовленных из сталей P18 и 45.

Комплексные сравнительные испытания образцов в условиях граничной смазки проводились на автоматизированной установке, созданной на базе машины трения МИ-1М, нормализованным методом с использованием нагружающего устройства оригинальной конструкции [5].

По результатам анализа регистрируемых параметров определялись следующие показатели триботехнических свойств: время приработки t_0 , ч; приработочный износ h_0 , мкм; среднее значение коэффициента трения в период нормального изнашивания f ; отношение максимального значения коэффициента трения в период приработки f_0 к f ; среднее значение интенсивности изнашивания в период нормального изнашивания $I_h = (h - h_0) / (L - L_0)$, где h – суммарная величина износа образца за время испытаний, мкм; L – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний, мкм; L_0 – путь трения, пройденный поверхностью образца за время приработки; значение интенсивности изнашивания за общее время испытаний $I_{h\Sigma} = h / L$.

Испытания образцов проводились при следующих условиях: скорость скольжения $v = 1,0$ м/с; нормальная сила нагружения $N = 100 \pm 0,5$ %, Н (соответствует давлению, рассчитанному по Герцу, порядка 150 МПа); вид первоначального контакта – пластический

насыщенный; вид смазки – граничная; вид смазывания – окунанием; ведущий вид изнашивания – усталостное; смазочный материал – масло индустриальное И – 20А (ГОСТ 20799-88); материал индентора – твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 6,0 ч.

Результаты испытаний образцов, обработанных с применением вышеописанных технологий на модернизированной установке МИ-1М представлены в табл. 2.

На рис. 5 в качестве примера приведены результаты испытаний образца с графиками изменения износа и коэффициента трения в режиме реального времени для стали 45, обработанной методом ИКЭМО. Сравнение результатов триботехнических испытаний образцов нормализованным методом показало, что минимальными значениями коэффициента трения, времени приработки и износа обладает сталь 45 с градиентной структурой поверхностного слоя с имплантированными карбидами вольфрама и последующим электромеханическим упрочнением. Кривые износа для образцов стали Р18 и с покрытиями систем Ti-Al-N и Mo-Cr-N характеризуются ускоренным ростом износа после износа покрытия. Кривая износа для образца стали 45 после ИКЭМО более стабильна.

2. Результаты триботехнических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

2. Results of tribotechnical testson the upgraded MI-1M installation

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца				
		Сталь Р18	Сталь Р18 + Ti-Al-N	Сталь Р18 + Mo-Cr-N	Сталь 45 + ИКЭМО	Сталь 45 + ЭМО
Прирабатываемость	t_0 , ч	1,12	0,58	0,75	0,45	2,93
	h_0 , мкм	7,50	1,30	1,50	1,70	6,00
	f_0/f	1,61	1,42	1,46	1,19	2,94
Антифрикционность	f	0,31	0,32	0,25	0,24	0,17
Износостойкость	h , мкм	16,1	9,70	9,60	4,6	7,50
	$I_h \cdot 10^{-10}$	3,44	3,12	3,09	1,44	0,82
	$I_{h\Sigma} \cdot 10^{-10}$	5,55	3,35	3,32	2,03	2,59

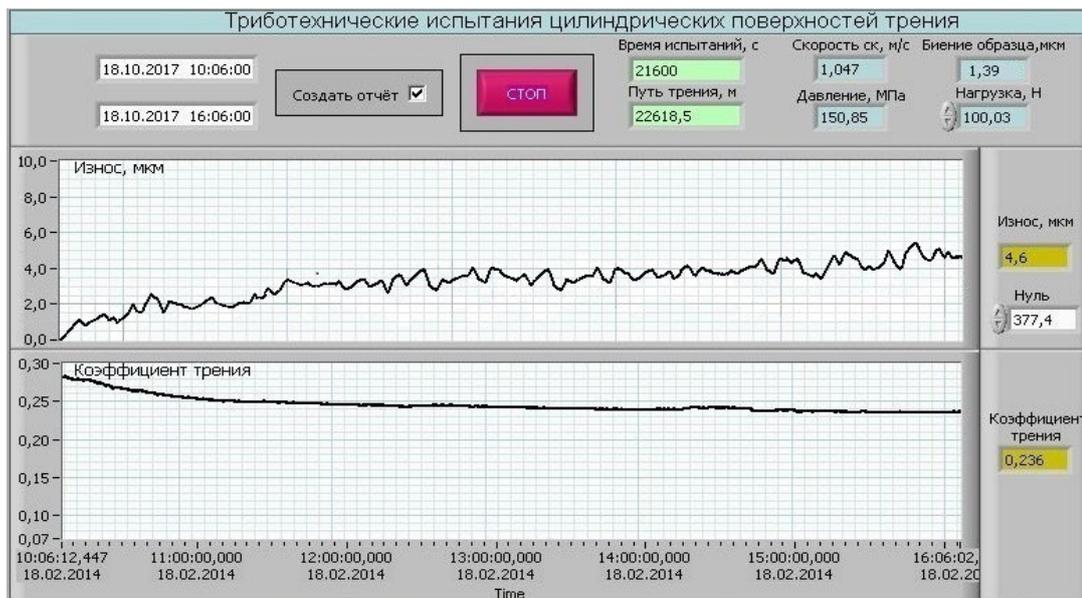


Рис. 5. Результаты испытаний образца стали 45 после формирования имплантированного карбидами вольфрама слоя и последующего электро-механического упрочнения (ИКЭМО)

Fig. 5. Test results of the 45 steel sample after the formation of a layer implanted with WC and subsequent electro-mechanical hardening (WRCEMP)

По результатам триботехнических испытаний установлено, что интенсивность изнашивания поверхности трения образцов стали 45 с градиентной структурой поверхностного слоя после имплантации карбидами вольфрама и последующим электро-механическим упрочнением в период нормального изнашивания меньше по сравнению (в скобках указаны значения для общего времени испытаний):

- с термообработанными образцами – в 2,4 (2,7) раза;
- с образцами после PVD (покрытие системы Ti-Al-N) – в 2,2 (1,7) раза;
- с образцами после PVD (покрытие системы Mo-Cr-N) – в 2,1 (1,6) раза.

Таким образом, высокие показатели износостойкости градиентной структуры поверхностного слоя стали 45 с имплантированными карбидами вольфрама являются следствием композиционного упрочнения за счет формирования высокодисперсных карбидных структур на основе карбида вольфрама (менее 1,0 мкм) различной морфологии (ячеистая сетка, нить, зерно) и как следствие, более высокие значения микротвердости.

Технологические возможности и рекомендации по применению технологии ИКЭМО

Технология ЭМО основана на сочетании термического и силового воздействий, что приводит к изменению физико-механических и микрогеометрических показателей поверхностного слоя деталей, изготовленных из средне-, высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна (повышению твердости и прочности, снижению высотных параметров шероховатости и т. д.), позволяет повысить (в 1,5 – 3,0 раза) эксплуатационные показатели обрабатываемых деталей (износостойкость, контактную жесткость и прочность, предел выносливости, теплостойкость, фреттингостойкость). Технологическая оснастка, состоящая из двухроликовой головки, закрепляемой в резцедержателе, и средств коммутации, позволяет использовать технологию ЭМО мобильно в совокупности с любым токарным станком.

К улучшенным показателям ЭМО относятся: электробезопасность; материало- и энергоёмкость; мобильность и удобство эксплуатации; диапазон регулирования режимов обработки (плотности тока, скорости

обработки, давления инструмента); выходные параметры процесса ЭМО (параметры микрогеометрии поверхности детали, физико-механические свойства, глубина упрочнения и др.).

Метод ИКЭМО может применяться для цилиндрических и сферических ответственных деталей автомобилей, а так же для ходовых винтов станков, глобоидных червяков рулевого управления автомобиля, цилиндрических и конических резьбовых соединений (с метрической и трубной резьбой); вырубных пуансонов; поверхностей деталей, образованных металлизацией, напылением, нанесением покрытий, наплавкой, наваркой.

Эффективно применение технологии ИКЭМО таких деталей, работающих в

условиях фреттинг-коррозии, как сопряжения «вал – подшипник качения», «корпусная деталь – подшипник качения», где происходят относительные микроперемещения вследствие вибраций и приложения ударных нагрузок в процессе эксплуатации машин. Таким же воздействием подвергаются детали автотракторных, строительных и горных машин.

Применение результатов исследования к паре трения «сателлит – ось сателлита».

Сателлит изготавливается из стали 35ХМНЛ с 580 НV_{исх} (после механических операций зубообработки и цементации), ось сателлита редуктора моста шасси БАЗ изготавливается из стали Л30 с 450 НV и имеет крестообразную форму рис. 6.



Рис. 6. Применение технологии ИКЭМО для повышения износостойкости узла трения «сателлит – ось сателлита»

Fig. 6. Application of WRCEMP technology to increase the wear resistance of the friction unit «axis of satellite – satellite»

Сталь Л30 была заменена сталью 45Х с изменением конфигурации детали на разъемные две оси (рис. 7) и изготовлен опытный образец оси сателлита. После чего производилось имплантирование материалов на основе карбида вольфрама с последующей электрохимической обработкой в соответствии с методологией проведения исследований.

Проводились сравнительные испытания износостойкости пары трения «ось сателлита – сателлит». В качестве технологических методов обработки цилиндрической поверхности рассматривались оригинальная технология изготовления оси сателлита.



Рис. 7. Ось сателлита дифференциала

Fig. 7. Differential satellite axis

3. Параметры качества поверхностного слоя деталей дифференциала моста

3. Quality parameters of the surface layer of the differential parts of the bridge

Деталь пары трения и метод ее упрочнения	Параметры качества поверхностного слоя				
	Ra , мкм	Rp , мкм	$Rmax$, мкм	Sm , мкм	tm , %
Ось сателлита (заводской вариант)	1,6	4,9	8,8	40	52
Ось сателлита с ИКЭМО	1,4	4,3	11	139	54

Параметры качества поверхностного слоя деталей данной пары трения после обработки представлены в табл. 3, а результаты сравнительных испытаний износостойкости – на рис. 8.

Результаты испытаний показывают, что при ИКЭМО с закономерным изменением плотности тока износ цилиндрической поверхности является минимальным и практически равномерным.

Произведем оценку относительного увеличения долговечности данного сопряжения при реализации рассматриваемых методов обработки (рис. 9) по сравнению с заводским вариантом.

Относительный нормальный износ:

$$W = W / [\tilde{W}],$$

где $[W]$ – величина допустимого износа сопряжения.

Тогда $\tilde{W} = 1,0$ при $W = [W]$.

Относительный ресурс работы до достижения допустимого износа пары трения:

$$\tilde{t}_i = 1 / \tilde{J}_{ti},$$

где $J_{ti} = J_{ti} / J_{t4}$.

Значение относительного ресурса работы сопряжения до достижения допустимого износа представлено на рис. 8, из которого следуют значения \tilde{W} , \tilde{t}_i – соответственно относительные величины допустимого износа и ресурса пары трения. Пробег автомобиля до замены дифференциала относительного увеличения долговечности при реализации рассматриваемого метода обработки по сравнению с заводским вариантом: $\tilde{t}_3 / \tilde{t}_i = 1,79$ раза.

Пробег автомобиля до замены дифференциала примерно составляет 60 тыс. км. Из рис. 8 видно, что при ИКЭМО пробег шасси до

замены дифференциала составит 107,4 тыс. км, что соответствует повышению долговечности почти в два раза.

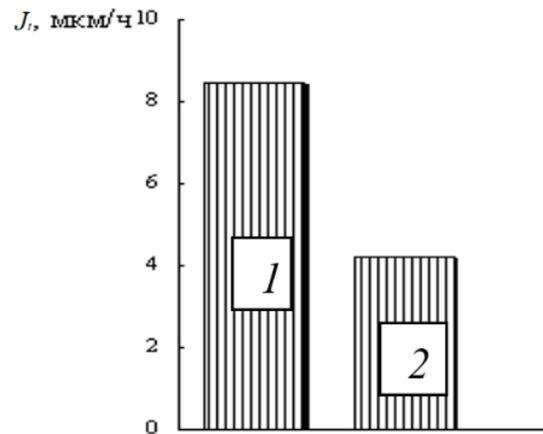


Рис. 8. Суммарная скорость изнашивания сопряженных сфер пары трения «ось сателлита – чашка корпуса дифференциала»: 1 – заводской вариант; 2 – ИКЭМО

Fig. 8. The total wear rate of the connected spheres of the friction pair «satellite axis – differential housing cup»: 1 – factory version; 2 – WRCEMP

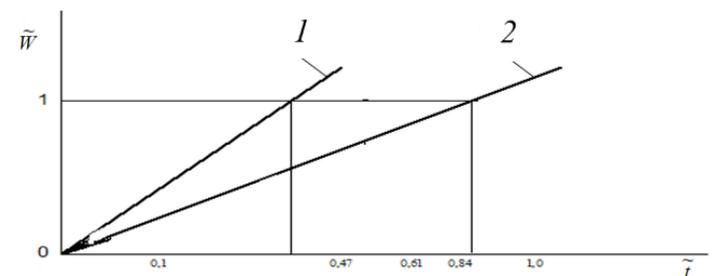


Рис. 9. Относительное увеличение долговечности и ресурса пары трения «ось сателлита – сателлит»: 1 – заводской вариант; 2 – ИКЭМО

Fig. 9. Relative increase in the durability and resource of the «axis of satellite–satellite» friction pair: 1 – factory version; 2 – WRCEMP

Выводы

1. Технология комбинированной электро-механической обработки, включающая формирование слоев, имплантированных карбидами вольфрама, с последующим электромеханическим упрочнением обрабатываемой поверхности (ИКЭМО), основана на сочетании термического и силового воздействий на поверхность обрабатываемой детали, что приводит к улучшению физико-механических и микрогеометрических показателей качества поверхностного слоя (повышению твердости и прочности, уменьшению высотных параметров шероховатости и т. д.) и, как следствие, к повышению эксплуатационных показателей деталей, в частности износостойкости, контактной жесткости и прочности, предела выносливости, теплостойкости, фреттингостойкости.

2. Снижение интенсивности изнашивания обрабатываемых ответственных деталей приводит к повышению их ресурса и соответственно надежности.

3. Модификация поверхности трения стали за счет образования на ней поверхностного слоя, имплантированного и композиционно упрочненного карбидами вольфрама, наряду с формированием подслоя, состоящего из ячеистого переохлажденного аустенита, стабилизированного вольфрамом и армированного сеткой из карбида вольфрама, состоящей из агрегатированных наноразмерных частиц карбида вольфрама методом ИКЭМО позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

4. Наличие многослойной структуры, имеющей общую металлическую матрицу основы материала, обеспечивает монолитную сцепляемость упрочненных слоев без нарушения сплошности в процессе изнашивания при значительных динамических нагрузках, что также подтверждается триботехническими испытаниями.

5. Применение данной технологии возможно на машиностроительных предприятиях в качестве высокоэффективного способа обеспечения и повышения эксплуатационных показателей деталей машин на стадии их изготовления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология создания износостойких поверхностных слоев с имплантированными материалами на основе карбида вольфрама. Справочник // Инженерный журнал. 2017. № 1 (238). С. 3–10.

2. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология имплантации материалов на основе карбида вольфрама с целью повышения износостойкости поверхностей трения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2016. № 9 (63). С. 3–9.

3. Горленко А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке // Вестн. БГТУ. 2011. № 3. С. 4–8.

4. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Y. Improving technology combined electromechanical processing // Journal of Advanced Research in Technical Science. North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. Issue 9-1. pp. 56–61.

5. Горленко А.О., Прудников М.И. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом // Справочник. Инженерный журнал. Прил. 10. 2009. С. 22–24.

6. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

7. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.

8. Давыдов С.В., Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Износостойкая поверхность трения углеродистой стали, упрочненная порошком карбида вольфрама // Технология машиностроения и материаловедение: материалы Междунар. науч.-практ. Конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. № 1. С. 71–80.

9. Горленко А.О., Шевцов М.Ю. Повышение износостойкости деталей машин имплантацией материалов на основе карбида вольфрама // Молодежь и системная модернизация страны: Сб. науч. статей 2-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых в 4 т. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. Т. 4. С. 129–134.

10. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология создания износостойких поверхностных слоев с имплантированными материалами на основе карбида вольфрама. Справочник // Инженерный журнал. 2017. № 1 (238). С. 3–10.

11. Горленко А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической обработке // Вестн. БГТУ. 2011. № 3. С. 4–8.

REFERENCES

1. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Technology for creating wear-resistant surface layers with implanted materials based on tungsten carbide. Guide // Engineering magazine. 2017, No. 1 (238), pp. 3–10.

2. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Technology of implanting materials based on tungsten carbide for increasing wear resistance of frictional surfaces // Science intensive

technologies in mechanical engineering. 2016, No. 9 (63), pp. 3–9.

3. Gorlenko A.O. Hardening of frictional surfaces of machine parts under electromechanical processing // Vestnik of BSTU, 2011, No. 3, pp. 4–8.

4. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Y. Improving technology combined electromechanical processing // Journal of Advanced Research in Technical Science. North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. Issue 9-1. pp. 56–61.

5. Gorlenko A.O., Prudnikov M.I. Tribotechnical testing of machine element surfaces by a normalized method // Guide. Engineering magazine. Supplement 10, 2009, pp. 22–24.

6. Suslov, A.G. The Quality of surface layer of machine parts, Moscow: Mashinostoenie, 2000, 320 p.

7. Suslov A.G. Technological support of parameters of the state of the surface layer of parts. Moscow: Mashinostoenie, 1987, 208 p.

8. Davydov S.V., Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. Wear-resistant frictional surface of carbon steel, hardened

with tungsten carbide (WC) powder // Technology of mechanical engineering and materials science: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk: SRC MB, 2017. No. 1. pp. 71–80.

9. Gorlenko A.O., Shevtsov M.Yu. Wear resistance increase for machine parts by implanting materials based on tungsten carbide // Youth and systemic modernization of the country: Collection of scientific articles, proceedings of the 2nd International Scientific Conference of Students and Young Researchers in 4 vols. Kursk: CJSC «University Book», 2017, vol. 4, pp. 129–134.

10. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Technology for creating wear-resistant surface layers with implanted materials based on tungsten carbide. Guide // Engineering magazine, 2017, No. 1 (238), pp. 3–10.

11. Gorlenko A.O. Hardening of frictional surfaces of machine parts under electromechanical processing // Vestnik of BSTU, 2011, No. 3, pp. 4–8.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 27.02.2024.

The article was submitted 07.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; assepted for publication 27.02.2024.

