

**А.О. Горленко**, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (Россия, 241035, Брянск, бул. 50 лет Октября, 7) (e-mail: bugi12@bk.ru)

**М.Ю. Шевцов**, аспирант, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (Россия, 241035, Брянск, бул. 50 лет Октября, 7) (e-mail: mih09mmo@yandex.ru)

**Е.В. Агеева**, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Россия, 305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94) (e-mail: ageeva-ev@yandex.ru)

# **ФОРМИРОВАНИЕ В ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ГРАДИЕНТНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*Целью проведения исследований в данной работе является повышение износостойкости поверхностей трения деталей машин имплантацией материалов на основе карбида вольфрама, обеспечивающих получение модифицированных поверхностных слоев, обладающих улучшенными физико-механическими свойствами в сравнении с износостойкими покрытиями, полученными традиционными методами обработки.*

*Технология имплантирования комбинированной электромеханической обработкой реализуется на специальной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий: из универсального станка (применяемого для механической обработки заготовок) с соответствующими инструментами и приспособлениями для закрепления обрабатываемой детали и подвода электрического тока большой силы и малого напряжения; силового блока для преобразования промышленного электрического тока; блока управления режимами обработки; средств коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды; блока сопряжения с ПЭВМ.*

*В процессе имплантирования частицы карбида вольфрама внедрялись в формируемый поверхностный слой, армируя его. Затем на этой же поверхности проводилась электромеханическая обработка на упрочняющих режимах.*

*Экспериментально установлено, что фактически поверхностный слой углеродистой стали 45 представляет собой градиентную структуру, похожую на структуру инструментальной стали Р18, причем с более высокой твердостью как следствие композиционного упрочнения выделяющимися карбидными фазами различной морфологии. Градиентная структура представляет собой ячеистый переохлажденный аустенит, стабилизированный вольфрамом и армированный карбидной сеткой, состоящей из агрегатированных высокодисперсных (менее 1 мкм) нитевидных и округлых частиц карбида вольфрама. Наличие градиентной структуры, имеющей плавный переход в основную металлическую матрицу стали 45, обеспечивает монолитную сцепляемость упрочненных слоев, которые не отслаиваются друг от друга в процессе изнашивания.*

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

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35

**Ссылка для цитирования:** Горленко А.О., Шевцов М.Ю., Агеева Е.В. Формирование в поверхности трения деталей машин градиентных износостойких структур с помощью комбинированной электромеханической обработки // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 5(80). С. 24-35.

\*\*\*

## **Введение**

В настоящее время в различных отраслях промышленности достаточно широко и эффективно применяются карбиды вольфрама  $W_2C$  и  $WC$  при получении различных функциональных материалов. Данные карбиды обладают высокой твер-

достью, износостойкостью и тугоплавкостью, что является исключительным сочетанием свойств для создания износостойких и жаропрочных сплавов [1–7].

Целью проведения исследований в данной работе является повышение износостойкости поверхностей трения дета-

лей машин имплантированием материалов на основе карбида вольфрама, обеспечивающих получение модифицированных поверхностных слоев, обладающих улучшенными физико-механическими свойствами в сравнении с износостойкими покрытиями, полученными традиционными методами обработки.

### Материалы и методики

Перед проведением экспериментальных исследований были подготовлены образцы и инструментальная оснастка. Технология имплантирования комбинированной электромеханической обработкой (ИКЭМО) реализуется на специаль-

ной установке, представляющей собой технологический комплекс, состоящий: из универсального станка (применяемого для механической обработки заготовок) с соответствующими инструментами и приспособлениями для закрепления обрабатываемой детали и подвода электрического тока большой силы и малого напряжения; силового блока для преобразования промышленного электрического тока; блока управления режимами обработки; средств коммутации и подвода смазывающе-охлаждающей технологической среды; блока сопряжения с ПЭВМ [8–12].

Общий вид установки для ИКЭМО представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид установки для ИКЭМО

Установка предназначена для поверхностного упрочнения и отделочной обработки цилиндрических поверхностей деталей машин, изготовленных из средне-, высокоуглеродистых, легированных сталей и высокопрочного чугуна. Применение переменного тока промышленной частоты (от управляемого источника питания) обеспечивает плавный переход твердости от поверхности к сердцевине, большую глубину упрочнения (до 2 мм),

высокую микротвердость упрочненного слоя (до 1000 HV), шероховатость поверхности (без отделочной обработки) в пределах  $Ra = 0,8 - 3,2$  мкм. Обработка цилиндрических поверхностей постоянным током производится, когда не требуется большая глубина упрочнения (до 0,6 мм), а необходимо значительное уменьшение значений параметров исходной шероховатости (до  $Ra = 0,2 - 0,4$  мкм).

Детали с наружными цилиндрическими поверхностями трения (валы, оси, втулки, ролики, поршни) в основном изготавливают из конструкционных и легированных сталей, к которым предъявляются следующие требования: высокая прочность, хорошая обрабатываемость, малая чувствительность к концентрации напряжений, а также способность подвергаться термической обработке. Одной из наиболее часто применяемых сталей для таких деталей является сталь 45.

При выборе инструмента для электромеханической обработки были проанализированы существующие схемы обработки и инструментальное обеспечение к ним. В каждой схеме и в каждом инструменте были найдены как положительные моменты, так и отрицательные. Учитывая это, была разработана и изготовлена вдвоенная инструментальная головка (рис. 2).



Рис. 2. Инструментальная оснастка для электромеханической обработки

Из-за соображений электробезопасности и потери энергии, особенно при обработке крупных деталей, подвод тока осуществляется через два ролика-электрода. Так как горизонтальное положение роликов не обеспечивает обработку в начале детали (контактирует только один ролик) и значительно увеличивает ширину инструмента, было выбрано вертикальное расположение роликов. Токоподводящие шины изолированы от штоков. Под напряжением находятся только токоподводящие шины, оси роликов и сами ролики. Направляющие, корпус, резцедержатель и станок изолированы.

Так как инструмент для упрочнения деталей электромеханической обработкой

работает в жестких условиях (высокие температурные и силовые нагрузки), а так же при этом способе воздействия необходима высокая электрическая проводимость материала инструмента, теплопроводность и достаточная твердость и износостойкость контактной поверхности, то наиболее целесообразным является применение в качестве материала инструмента тугоплавких металлов с насыщением объема материалами на основе меди (псевдосплавы). Был применен псевдосплав, который представляет собой пористый «каркас» в виде «губки» из карбида вольфрама, пропитанный медью.

Основываясь на полученном опыте при создании инструментальной оснастки

для электромеханической обработки, была разработана и изготовлена инструментальная оснастка для имплантации порошка карбида вольфрама. Она также состоит из двух роликов, только вместо псевдосплава применены ролики из жаропрочной стали 95X18.

Перед проведением эксперимента была установлена зависимость между перемещением суппорта на токарном станке и создаваемой нагрузкой на инструментальной головке. Измерения проводились на динамометре цифровом *PCE FM-200*. Рабочая поверхность образцов перед проведением экспериментов обрабатывалась точением.

Для чистовой обработки образцов после упрочнения была разработана и изготовлена шлифовальная головка, применяемая для установки на токарный станок. Она состоит из углошлифовальной машины мощностью 1300 Вт с настройкой режимов резания, прикрепленной к оправке для установки в резцедержатель

станка, вместо отрезного круга закрепляется шлифовальный круг.

Имплантирование карбидов вольфрама в поверхностный слой при электромеханической обработке [8, 9] производится на определенных режимах. На поверхность перед обработкой они наносятся обмазкой, предварительно размешанные в определенной пропорции с консистентным графитным смазочным материалом на основе литиевого мыла.

При имплантации карбида вольфрама применялись следующие режимы обработки: выходная сила тока 0,9 кА; напряжение 2,6 В; давление, создаваемое на поверхности детали 100 Н/мм<sup>2</sup>.

Процесс имплантирования показан на рис. 3. Частицы карбида вольфрама внедряются в формируемый поверхностный слой, армируя его. Затем на этой же поверхности проводится электромеханическая обработка (ЭМО) на упрочняющих режимах (рис. 4).

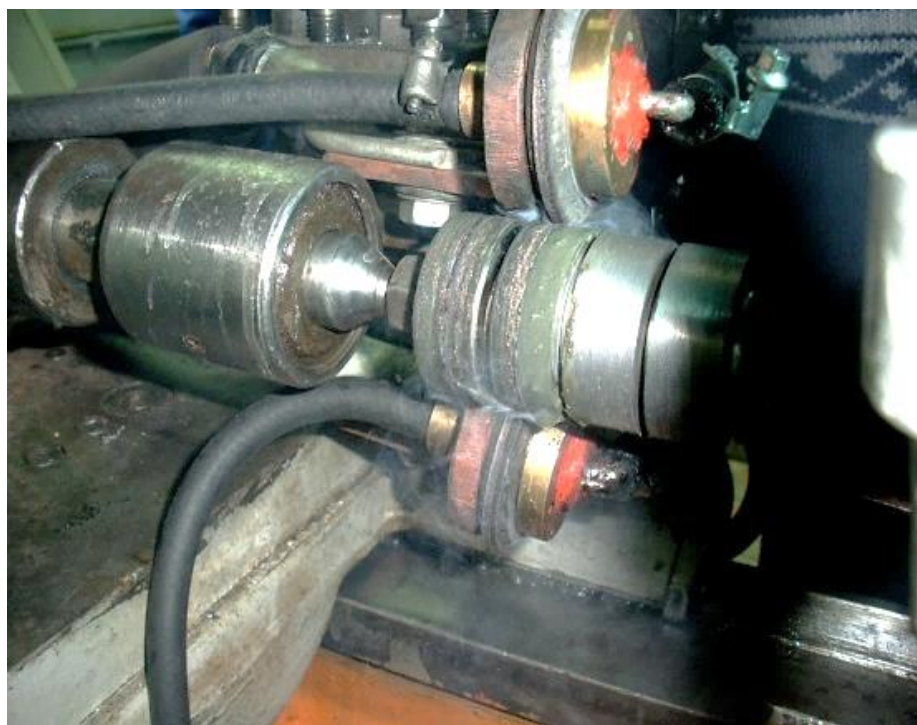


Рис. 3. Процесс имплантирования карбида вольфрама



При ЭМО были использованы следующие режимы: сила тока 1,4 кА; напряжение 2,9 В; давление, создаваемое на поверхности детали 110 Н/мм<sup>2</sup>. Эффект упрочнения при ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения, и дости-

гается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [10, 11].



Рис. 4. Упрочнение при ЭМО

### Результаты и их обсуждение

В результате проведения эксперимента установлено, что при комбинированной электрохимической обработке после проведения 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. 5, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной (200...250) мкм (рис. 5, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной (20...40) мкм (рис. 5, слой 3) и матрицы, состоящей из нормализованной стали 45.

Слой 1 (рис. 5) представляет собой смесь частиц карбида вольфрама  $WC$  в стальной основе. Следовательно, в процессе имплантирования происходит пластическое перемешивание карбида вольфрама в объеме стали в твердофазном состоянии.

Слой 2 (рис. 5) 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 (рис. 6).

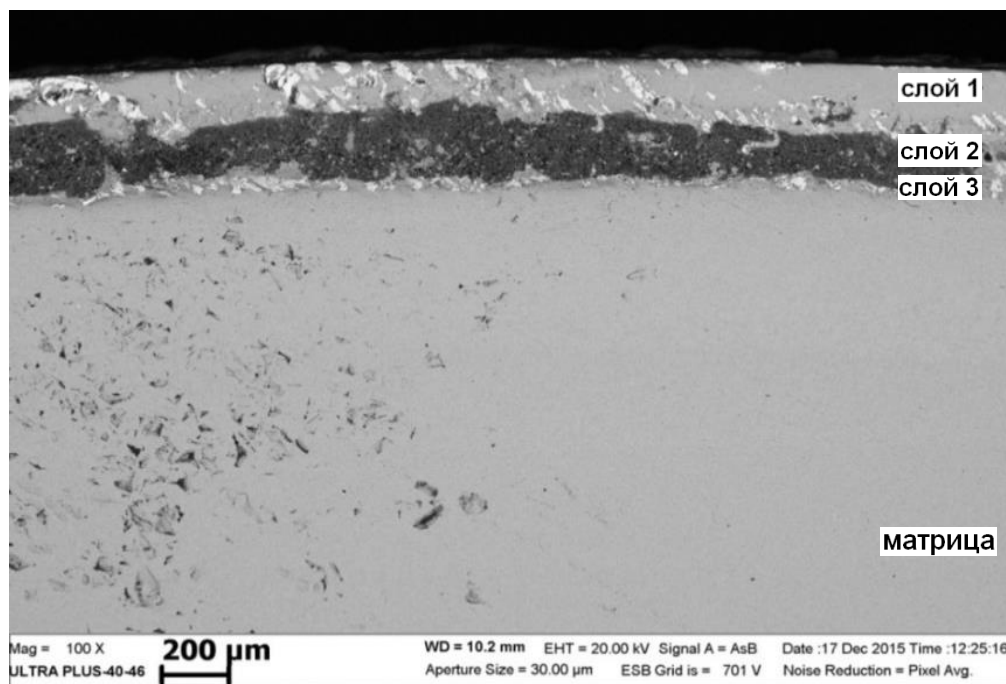


Рис. 5. Структура поверхности стального образца, упрочненного карбидом вольфрама,  $\times 100$

Данные ячеистые структуры имеют ярко выраженное эвтектическое строение, однако сетка состоит из нитевидных кристаллов карбида вольфрама, чередующихся с изолированными глобулярными высокодисперсными частицами

карбида вольфрама (менее 1 мкм). Причем, сами нити эвтектической сетки состоят из коагулировавших дисперсных глобулей карбида вольфрама, образуя в целом единую композиционную структуру.

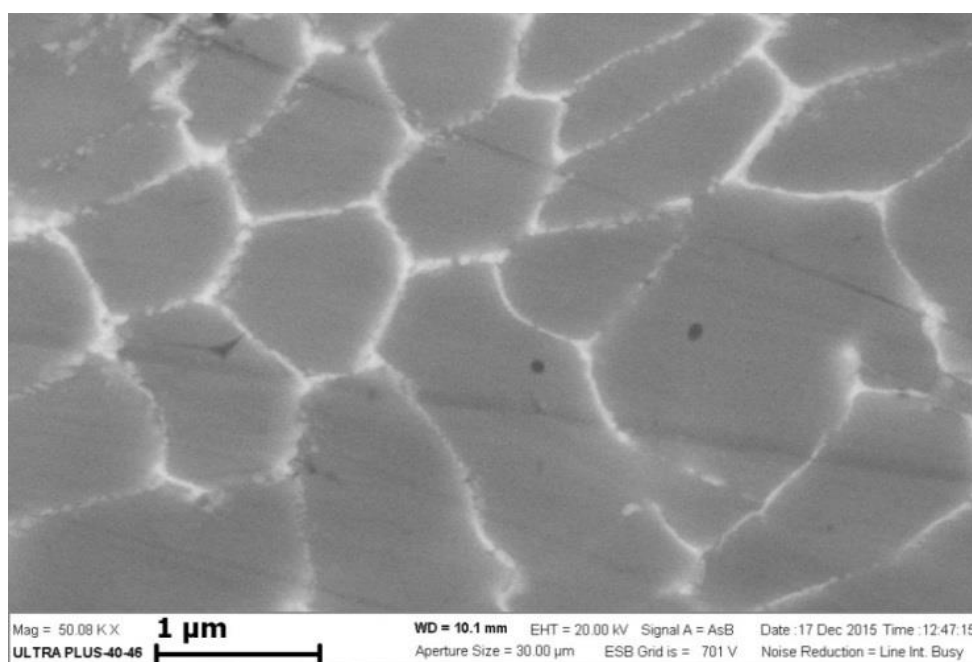


Рис. 6. Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен),  $\times 50800$

В соответствии с известной диаграммой  $Fe - W$ , температура слоя 2 в процессе обработки превышает температуру  $1060^{\circ}C$ , соответствующую перитектоидной реакции. В этих температурных условиях протекает полиморфное превращение железа с образованием аустенита и растворением карбида вольфрама в аустените.

Аналогичная структура наблюдается при переходе слоя 2 в слой 3 (рис. 5), который намного тоньше слоя 1, но также насыщен частицами карбида вольфрама.

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». В табл. 1 приведены значения микротвердости по Виккерсу для многослойной упрочненной градиентной структуры износостойкой поверхности.

Таблица 1

Микротвердость поверхностного слоя стали 45, упрочненного карбидом вольфрама

Микротвердость слоев, $HV$			
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, с применением следующих технологий:

– объемная закалка, низкотемпературный отпуск (сталь P18);

– объемная закалка, низкотемпературный отпуск (сталь P18) + покрытие с твердо-растворным упрочнением из соединений с разным типом межатомных связей системы  $Ti-Al-N$  толщиной 3 мкм, нанесенное с применением технологии  $PVD$  (в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока);

– объемная закалка, низкотемпературный отпуск (сталь P18) + покрытие с многофазной структурой системы  $Mo-Cr-N$  толщиной 3 мкм, нанесенное с применением технологии  $PVD$  (в вакууме с помощью электродугового источника плазмы и сепарации плазменного потока);

– комбинированная электрохимическая обработка (ИКЭМО) – формирование имплантированного карбидами вольфрама поверхностного слоя на поверхности не термообработанной стали 45 и последующее электрохимическое упрочнение обрабатываемой поверхности.

Образцы с покрытиями на основе  $Ti-Al-N$  и  $Mo-Cr-N$  были изготовлены в ООО «НПФ «Плазмацентр» (г. Санкт-Петербург).

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  $h$ , мкм – суммарная величина износа образца за время испытаний;  $L$ , мкм – путь трения, пройденный поверхностью образца за время испытаний;  $L_0$  – 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  $v = 1$  м/с; нормальное усилие 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 мате-

риал – масло индустриальное И – 20А (ГОСТ 20799 – 88); материал индентора – твердый сплав ВК8; общее время испытаний каждого образца – 6 ч.

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

На рис. 7 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 электрохимическим 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.

Таблица 2

Результаты триботехнических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

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



По результатам триботехнических испытаний установлено, что интенсивность изнашивания поверхности трения образцов, изготовленных из стали 45 с градиентной структурой поверхностного слоя после имплантирования карбидами вольфрама и последующим электромеханическим упрочнением в период нормального изнашивания меньше по срав-

нению (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.

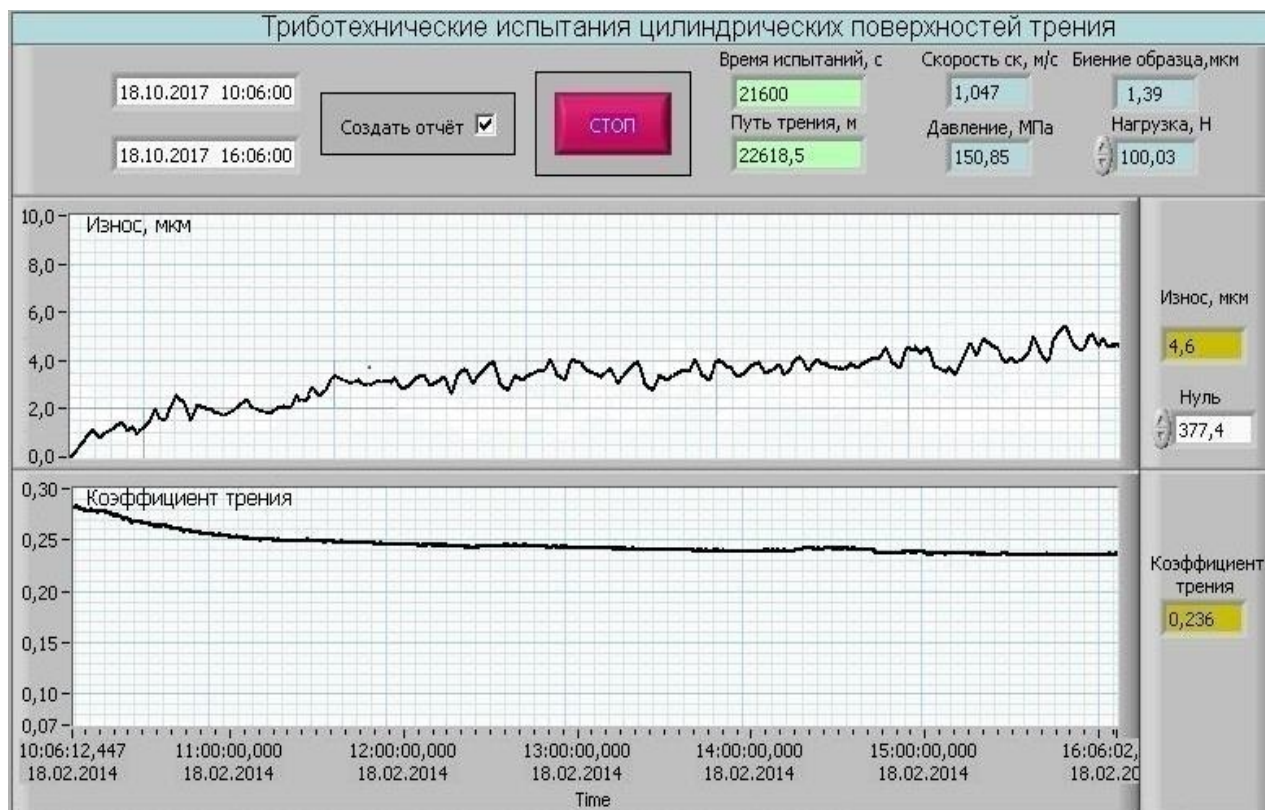


Рис. 7. Результаты испытаний образца стали 45 после формирования имплантированного карбидами вольфрама слоя и последующего электромеханического упрочнения (ИКЭМО)

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 карбидов вольфрама (менее 1 мкм) различной морфологии (ячеистая сетка, нить, зерно) и как следствие, более высокие значения микротвердости.

## Выводы

1. Фактически поверхностный слой углеродистой стали 45 представляет собой градиентную структуру, похожую на структуру инструментальной стали P18, причем с более высокой твердостью как следствие композиционного упрочнения выделяющимися карбидными фазами различной морфологии.

2. Градиентная структура представляет собой ячеистый переохлажденный аустенит, стабилизированный вольфрамом и армированный карбидной сеткой, состоящей из агрегатированных высокодисперсных (менее 1 мкм) нитевидных и округлых частиц карбида вольфрама.

3. Наличие градиентной структуры, имеющей плавный переход в основную металлическую матрицу стали 45, обеспечивает монолитную сцепляемость упрочненных слоев, которые не отслаиваются друг от друга в процессе изнашивания.

4. Модификация поверхности трения стали 45 за счет имплантирования и композиционного упрочнения порошком карбида вольфрама методом ИКЭМО позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

#### Список литературы

1. Свойства порошков из отходов твердых сплавов ВК8 и Т15К6, полученных методом электроэрозионного диспергирования / Р.А. Латыпов, А.Б. Коростелев, Е.В. Агеев, Б.А. Семенихин // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 7. С. 2-6.

2. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. Метод получения наноструктурных порошков на основе системы WC-Co и устройство для его осуществления // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 5. С. 39-42.

3. Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А. Исследование микротвердости порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения

высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2011. № 1 (46). С. 78-80.

4. Состав и свойства порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов: монография / Е.В. Агеев, Р.А. Латыпов, Б.А. Семенихин, Е.В. Агеева. Курск, 2011. 122 с.

5. Исследование физико-технологических свойств порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Д.Н. Романенко, В.Б., Тригуб В.В. Самойлов, Е.В. Агеева // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-2. С. 336-340.

6. Фазовый состав частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутиловом спирте / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, С.С. Гулидин, Е.В. Агеев, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 20-25.

7. Порошки, полученные электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов - перспективный материал для восстановления деталей автотракторной техники / Е.В. Агеев, В.Н. Гадалов, Е.В. Агеева, Р.В. Бобрышев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 182-189.

8. 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.

9. Горленко А.О., Давыдов С.В. Технология имплантирования материалов на основе карбида вольфрама с целью повышения износостойкости поверхностей

трения // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 9 (63). С. 3 – 9.

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

11. 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. P. 56 – 61.

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

*Поступила в редакцию 06.09.18*

UDC 621.2.082.18

**O. A. Gorlenko**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Bryansk State Technical University (Russia, 241035, Bryansk, 50 Let Oktyabrya boul., 7) (e-mail: bugi12@bk.ru)

**M. Yu. Shevtsov**, Post-Graduate Student, Bryansk State Technical University (Russia, 241035, Bryansk, 50 Let Oktyabrya boul., 7) (e-mail: mih09mmo@yandex.ru)

**E. V. Ageeva**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Russia, 305040, Kursk, 50 Let Oktyabrya str., 94) (e-mail: ageev-ev@yandex.ru)

#### **THE FORMATION OF THE FRICTION SURFACE OF MACHINE PARTS OF WEAR RESISTANT GRADIENT STRUCTURES BY MEANS OF COMBINED ELECTROMECHANICAL PROCESSING**

*The purpose of research in this work is to increase the wear resistance of friction surfaces of machine parts by implanting materials based on tungsten carbide, providing a modified surface layers with improved physical and mechanical properties in comparison with wear-resistant coatings obtained by traditional methods of processing.*

*The technology of implanting a combined Electromechanical treatment is implemented on a special installation, which is a technological complex consisting of: a universal machine (used for machining workpieces) with the appropriate tools and devices for fixing the workpiece and the supply of electric current of high power and low voltage; power unit for the conversion of industrial electric current; control unit processing modes; means of switching and supply of lubricating-cooling technological medium; unit interface with PC.*

*In the process of implanting tungsten carbide particles were introduced into the formed surface layer, reinforcing it. Then, on the same surface, Electromechanical treatment was carried out on the reinforcing modes.*

*It is experimentally established that in fact the surface layer of carbon steel 45 is a gradient structure similar to the structure of tool steel P18, and with a higher hardness as a consequence of the composite hardening of the released carbide phases of different morphology. The gradient structure is a cellular supercooled austenite stabilized by tungsten and reinforced with a carbide mesh consisting of aggregated highly dispersed (less than 1  $\mu\text{m}$ ) filamentous and rounded tungsten carbide particles. The presence of a gradient structure with a smooth transition to the main metal matrix of steel 45 provides monolithic adhesion of hardened layers that do not peel off from each other during wear.*

**Key words:** surface layer; wear resistance; Electromechanical treatment; hardening; tungsten carbide; surface layer quality; tribotechnical testing.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-5-24-35

**For citation:** Gorlenko O. A., Shevtsov M. Yu., Ageeva E. V. The Formation of the Friction Surface of Machine Parts of Wear Resistant Gradient Structures by Means of Combined Electromechanical Processing. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 5(80), pp. 24-35 (in Russ.).

\*\*\*

## Reference

1. Latypov R.A., Korostelev A.B., Ageev E.V., Semenixin B.A. Svoystva poroshkov iz otxodov tverdyx splavov VK8 i T15K6, poluchennykh metodom elektroerozionnogo dispergirovaniya. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik*, 2010, no. 7, pp. 2-6.
2. Ageev E.V., Semenixin B.A., Latypov R.A. Metod polucheniya nanostrukturnykh poroshkov na osnove sistemy WC-Co i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii*, 2010, no. 5, pp. 39-42.
3. Ageev E.V., Semenixin B.A., Latypov R.A. Issledovanie mikrotverdosti poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergировaniem tverdogo splava. *Vestnik Federalnogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet im. V.P. Goryachkina*, 2011, no. 1 (46), pp. 78-80.
4. Ageev E.V., Latypov R.A., Semenixin B.A., Ageeva E.V. Sostav i svoystva poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergированием otxodov tverdyx splavov. *Kursk*, 2011, 122 p.
5. Ageev E.V., Gadlov V.N., Romanenko D.N., Trigub V.B., Samojlov V.V., Ageeva E.V. Issledovanie fiziko-tekhnologicheskikh svoystv poroshkov, poluchennykh elektroerozionnym dispergированием tverdogo splava. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2011, no. 12-2, pp. 336-340.
6. Ageeva E.V., Altuxov A.Yu., Gulidin S.S., Ageev E.V., Goroxov A.A. Fazovyy sostav chastic poroshka, poluchennogo elektroerozionnym dispergированием splava VK8 v butilovom spirte. *Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tehnologii*, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25.
7. Ageev E.V., Gadlov V.N., Ageeva E.V., Bobryshev R.V. Poroshki, poluchennyye elektroerozionnym dispergированием otxodov tverdyx splavov - perspektivnyj material dlya vosstanovleniya detalej avtotraktornoj tekhniki. *Izvestiya Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 182-189.
8. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Tekhnologiya sozdaniya iznosostojkix poverkhnostnykh sloev s implantirovannymi materialami na osnove karbida volframa. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*, 2017, no.1 (238), pp. 3 – 10.
9. Gorlenko A.O., Davydov S.V. Tekhnologiya implantirovaniya materialov na osnove karbida volframa s celyu povysheniya iznosostojkosti poverkhnostej treniya. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2016, no. 9 (63), pp. 3 – 9.
10. Gorlenko A.O. Uprochnenie poverkhnostej treniya detalej mashin pri elektromexanicheskoy obrabotke. *Vestnik BGTU*, 2011, no. 3, pp. 4 – 8.
11. 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, is. 9-1, pp. 56 – 61.
12. Gorlenko A.O., Prudnikov M.I. Tribotexnicheskie ispytaniya poverkhnostej detalej normalizovannym metodom. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal*, 2009, pr. 10, pp. 22 – 24.