

УДК 621.2.082.18

**А. О. Горленко**, академик академии проблем качества, д. т. н., профессор

**М. Ю. Шевцов**, аспирант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» г. Брянск, Россия  
Телефон: +7(906)5014632, E-mail: [bugi12@bk.ru](mailto:bugi12@bk.ru)

## УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Рассмотрена технология 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). Показано, что при термосиловом воздействии 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.*

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

**A. O. Gorlenko, M. Yu. Shevtsov**

## HARDENING OF THE FRICTION SURFACES OF THE COMBINED ELECTROMECHANICAL PROCESSING

*The technology of formation of wear-resistant surface layer by implanting materials based on tungsten carbide has been improved. The influence of implanted tungsten carbide powder on the formation of gradient wear-resistant structures in the friction surface of carbon steel formed during the implementation of the combined Electromechanical processing technology is investigated (IKEMO). It is shown that under thermal and force effects in the area of plastic deformation there takes place an intensive austenization of steel with the dissolution of tungsten carbide powder and the subsequent formation of finely dispersed composite structures as a result of decomposition of the supersaturated tungsten supercooled austenite.*

**Keywords:** *surface layer; wear resistance; electromechanical treatment; hardening; tungsten carbide; surface layer quality, tribotechnical tests.*

### 1. Введение

Карбиды вольфрама  $W_2C$  и  $WC$  достаточно широко и эффективно применяются при получении различных функциональных материалов. Данные карбиды обладают высокой твердостью, износостойкостью и тугоплавкостью, что является исключительным сочетанием свойств для создания износостойких и жаропрочных сплавов.

Целью проведения исследований в данной работе является выявление непосредственной взаимосвязи износостойкости цилиндрических поверхностей трения с условиями комбинированной электромеханической обработки.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Перед проведением экспериментальных исследований были подготовлены образцы и инструментальная оснастка. Технология ИКЭМО 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.

Общий вид установки для ИКЭМО представлен на рис. 1



Рисунок 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 применяемой стали 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).

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. Токотводящие шины изолированы от штоков. Под напряжением находятся только токотводящие шины, оси роликов и сами ролики. Направляющие, корпус, резцедержатель и станок изолированы.



Рисунок 2. Инструментальная оснастка для электромеханической обработки

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 «жаркас» 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 имплантирования 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 инструментальную головку. Измерение проводилось на динамометре цифровом *PCEFM-200*. Рабочая поверхность образцов перед проведением экспериментов подготавливалась 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 [1, 2] 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 имплантировании 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).

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



Рисунок 3. Процесс имплантирования карбида вольфрама

и охлаждения, и достигается высокая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [3].



Рисунок 4. Упрочнение при ЭМО

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. 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 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).

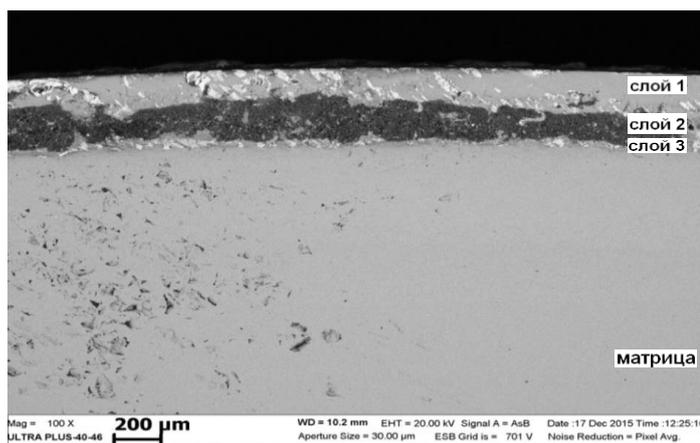


Рисунок 5. Структура поверхности стального образца, упрочненного карбидом вольфрама, x100

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

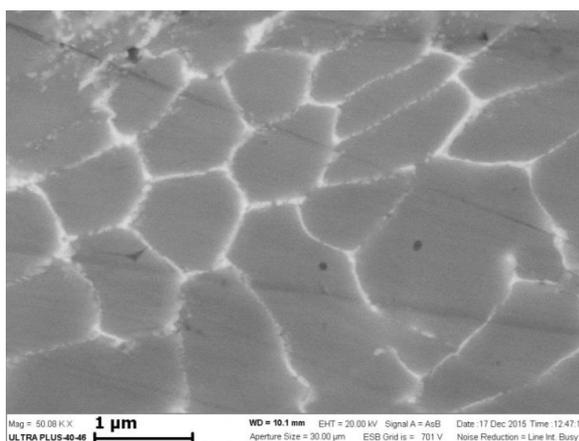


Рисунок 6. Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен), x50800

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

Таблица 1. – Микротвердость поверхностного слоя стали 45, упрочненного карбидом вольфрама

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

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 ана-

лиза «Микро-Анализ View». В табл. 1 приведены значениям микротвердости по Виккерсу для многослойной упрочненной градиентной структуры износостойкой поверхности.

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 электромеханическая обработка (ИКЭМО) – формирование имплантированного карбидами вольфрама поверхностного слоя на поверхности нетермообработанной стали 45 и последующее электромеханическое 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 [4].

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 давлениям, рассчитанным 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 ч.

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

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

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 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.

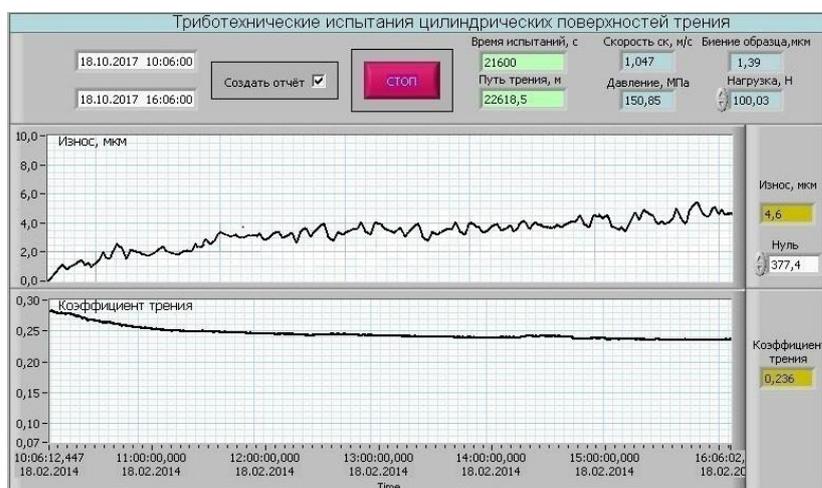


Рисунок 7. Результаты испытаний образца стали 45 после формирования имплантированного карбидами вольфрама слоя и последующего электромеханического упрочнения (ИКЭМО)

По результатам триботехнических испытаний установлено, что интенсивность изнашивания поверхности трения образцов стали 45 с градиентной структурой поверхностного слоя после имплантирования карбидами вольфрама и последующим электромеханическим 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 карбидов вольфрама (менее 1 мкм) различной морфологии (ячеистая сетка, нить, зерно) и как следствие, более высокие значения микротвердости.

#### **Заключение:**

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 имплантации и композиционного упрочнения порошком карбида вольфрама методом ИКЭМО, позволяет существенно повысить износостойкость поверхностей трения, что подтверждается триботехническими испытаниями.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Горленко, А. О. Технология создания износостойких поверхностных слоев с имплантированными материалами на основе карбида вольфрама. / А. О. Горленко, С. В. Давыдов // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – №1 (238) – С. 3-10.
2. Горленко, А. О. Технология имплантации материалов на основе карбида вольфрама с целью повышения износостойкости поверхностей трения / А. О. Горленко, С. В. Давыдов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – № 9 (63). – С. 3-9.
3. Горленко, А. О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электрохимической обработке / А. О. Горленко // Вестник БГТУ. – 2011. – № 3. – С. 4-8.
4. Горленко, А. О. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом / А. О. Горленко, М. И. Прудников // Справочник. Инженерный журнал. – Прил. 10. – 2009. – С. 22-24.
5. Gorlenko, A. O. Improving technology combined electromechanical processing / A. O. Gorlenko, M. Y. Shevtsov // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, Create Space, 2018. – Issue 9-1. – p. 56-61.

Поступила в редколлегию 11.05.18