

УДК 621.2.082.18

DOI: 10.30987/article_5be14a250b8231.19036686

А.О. Горленко, М.Ю. Шевцов

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

Рассмотрена технология формирования износостойкого поверхностного слоя имплантированием 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 электро-механической обработки (ИКЭМО). Показано, что при термосиловом воздействии в зоне пластиче-

ской 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, электро-механическая обработка, упрочнение, карбид вольфрама, качество поверхности, триботехнические испытания.

A.O. Gorlenko, M.Yu. Shevtsov

MACHINERY WEAR-RESISTANCE INCREASE BY COMBINED ELECTRO-MECHANICAL TREATMENT

The purpose of the work consists in the wear-resistance increase in machinery friction surfaces through material implanting on the basis of tungsten carbide providing obtaining modified surface layers having improved physical and stress-strain properties comparing with wear-resistant coatings obtained in common ways of machining. The application of the technology of combined electro-mechanical treatment with material implantation on the basis of tungsten carbide is possible at engineering enterprises, enterprises of automobile industry, aerospace and defense industry as a high-performance method to ensure and increase machinery operation properties at the stage of their manufacturing.

The application of this processing technique of parts working under conditions of fretting-corrosion, boundary lubrication, and also where relative micro-displacements caused by vibration and shock loads application is efficient. It allows increasing life of parts and units used in machines in the course of operation.

During electro-mechanical processing a strengthening effect is obtained due to high speeds of heating and cooling realization and a high degree of austenite grain fineness which stipulates for fine-crystal structures at hardening a surface layer having high physical and stress-strain properties.

Key words: surface layer, wear-resistance, electro-machining, strengthening, tungsten carbide, surface quality, tribological tests.

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 повышение износостойкости поверхностей трения деталей машин имплантированием материалов на основе карбида вольфрама, обеспечивающих получение модифицированных поверхностных слоев, обладающих улуч-

шенными физико-механическими свойствами в сравнении с износостойкими покрытиями, полученными традиционными методами обработки.

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.



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. Наиболее часто применяемой сталью для таких деталей является сталь 45.

При выборе инструмента для электрохимической обработки были проанализированы существующие схемы обработки и инструментальное обеспечение к ним. В каждой схеме и каждом инструменте были найдены как положительные моменты, так и отрицательные. С учетом этого была разработана и изготовлена сдвоенная инструментальная головка (рис. 2).

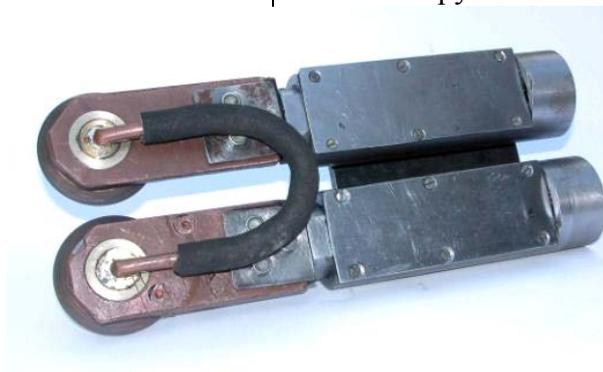


Рис. 2. Инструментальная оснастка для электрохимической обработки

Из 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) и при этом способе воздействия необходимы 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.

На основе опыта, полученного 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 применена жаропрочная сталь 95X18.

Перед проведением эксперимента была установлена зависимость между перемещением суппорта на токарном станке и создаваемой нагрузкой на инструментальной головке. Измерения проводились на цифровом динамометре *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 резцедержателе 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^2 .

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^2 . Эффект упрочнения при ЭМО достигается благодаря тому, что реализуются высокие скорости нагрева и охлаждения и достигается высо-

кая степень измельченности аустенитного зерна, которая обуславливает мелкокристаллические структуры закалки поверхностного слоя, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [3; 4].



Рис. 4. Упрочнение при ЭМО

В результате эксперимента установлено, что при комбинированной электро-механической 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 $180...220 \text{ мкм}$ (рис. 5, слой 1), первого нижнего подслоя толщиной

$200...250 \text{ мкм}$ (рис. 5, слой 2), второго нижнего подслоя толщиной $20...40 \text{ мкм}$ (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.

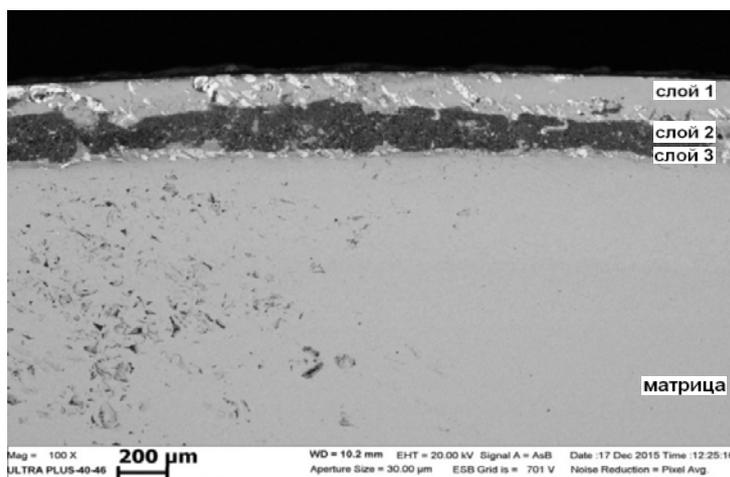


Рис. 5. Структура поверхности стального образца, упрочненного карбидом вольфрама, $\times 100$

Слой 2 (рис. 5) представляет собой слабо насыщенный 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).

Данная ячеистая структура имеет 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 дисперсных глобулей карбида вольфрама, образуя в целом единую композиционную структуру.

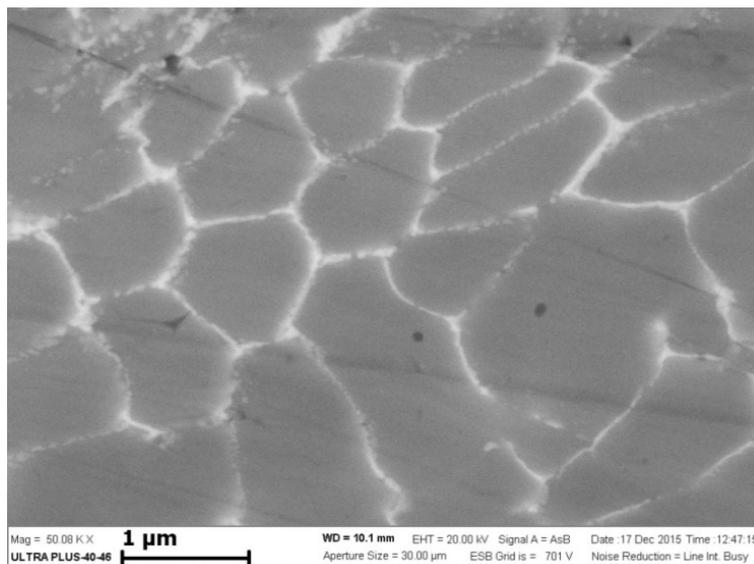


Рис. 6. Ячеистая структура переохлажденного аустенита в слое 2 (сетка карбида вольфрама по границам аустенитных зерен), x50800

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 металлографическом инвертированном микроскопе 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 из-

нашивание конструкционной стали 45 с градиентной структурой упрочненной поверхности и достаточно дорогих и техно-

логически сложных в получении современных износостойких покрытий и материалов.

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

ного 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 , мкм, – 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 описанных 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 электромеханическим упрочнением. Кривые износа для образцов стали P18 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.

Результаты триботехнических испытаний на модернизированной установке МИ-1М

Триботехническое свойство	Показатель	Значение показателя для образца			
		Сталь P18	Сталь P18 + Ti-Al-N	Сталь P18 + 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 имплантации карбидами вольфрама с 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 (и, как следствие, более высокие значения микротвердости) являются следствием композиционного упрочнения за счет формирования высокодисперсных карбидных структур на основе карбидов вольфрама (менее 1 мкм) различной морфологии (ячеистая сетка, нить, зерно).

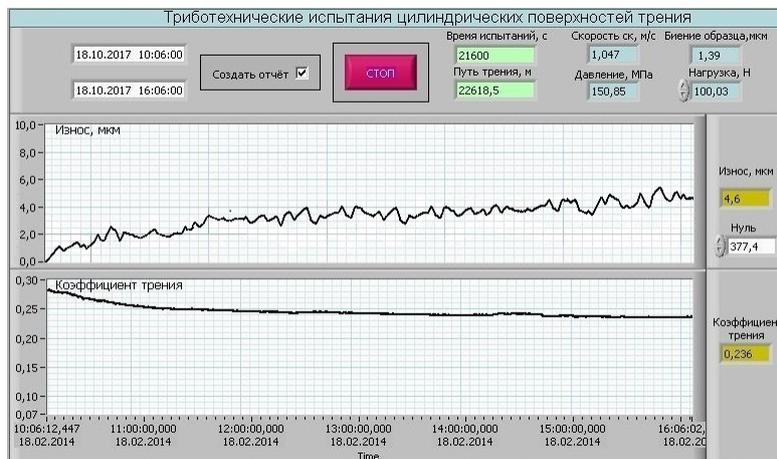


Рис. 7. Результаты испытаний образца стали 45 после формирования имплантированного карбидами вольфрама слоя и последующего электромеханического упрочнения (ИКЭМО)

Выводы:

1. Фактически поверхностный слой углеродистой стали 45 представляет собой градиентную структуру, похожую на структуру инструментальной стали P18, причем с более высокой твердостью вследствие 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 9 (63). – С. 3-9.
3. Горленко, А.О. Упрочнение поверхностей трения деталей машин при электромеханической

1. Gorlenko, A.O. Technique for formation of wear-resistant surface layers with implanted materials based on tungsten carbide / A.O. Gorlenko, S.V. Davydov // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2017. – No.1(238). – pp. 3-10.
2. Gorlenko, A.O. Technique of material implantation based on tungsten carbide to wear-resistance increase of friction surfaces / A.O. Gorlenko, S.V. Davydov // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.9(63). – pp. 3-9.
3. Gorlenko, A.O. Friction surface strengthening in machinery at electro-machining / A.O. Gorlenko //

обработке / А.О. Горленко // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 3. – С. 4-8.

4. Gorlenko, A.O. Improving technology combined electromechanical processing / A.O. Gorlenko, M.Y.Shevstov // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. – Is. 9-1. – P. 56-61.
5. Горленко, А.О. Триботехнические испытания поверхностей деталей нормализованным методом / А.О. Горленко, М.И. Прудников // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – Прил. 10. – С. 22-24.

Bulletin of Bryansk State Technical University. 2011. – No.3. – pp. 4-8.

4. Gorlenko, A.O. Improving technology combined electromechanical processing / A.O. Gorlenko, M.Y.Shevstov // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2018. – Is. 9-1. – P. 56-61.
5. Gorlenko, A.O. Tribological tests of parts surfaces by normalized method / A.O. Gorlenko, M.I. Prudnikov // *Reference Book. Engineering Journal*. – 2009. – App.10. pp. 22-24.

Статья поступила в редакцию 19.07.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного аграрного университета

Погонышев В.А.

Статья принята к публикации 10.10.18.

Сведения об авторах:

Горленко Александр Олегович, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: bugi12@bk.ru.

Шевцов Михаил Юрьевич, аспирант кафедры «Детали машин» Брянского государственного технического университета, e-mail: mih09mmo@yandex.ru.

Gorlenko Alexander Olegovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Motor Transport”, Bryansk State Technical University, e-mail: bugi12@bk.ru.

Shevtsov Mikhail Yurievich, Post graduate student of the Dep. “Machinery”, Bryansk State Technical University, e-mail: mih09mmo@yandex.ru.