

УДК 678.019.3:621.793.184:620.3

СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТОПОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

К.Н. Полещенко¹, Д.Н. Коротаев², Е.Е. Тарасов³

¹ Омский институт (филиал) Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Омск, Россия;

² ФГБОУ ВО «СиБАДИ», Омск, Россия;

³ ФГУП «НПП «Прогресс», Омск, Россия.

Аннотация. *Исследованы структурно-морфологические особенности наноструктурных топокомпозиционных покрытий в зависимости от режимов ионно-плазменной обработки. Приведена классификация структурно-морфологических типов покрытий, содержащих нанопазы и нанокластерные образования. На основе результатов моделирования процессов поверхностного массопереноса изучены причины формирования наблюдаемых структурно-морфологических изменений. Даны рекомендации по целевому применению изделий и конструктивных элементов в соответствии со структурно-морфологическим типом покрытия.*

Ключевые слова: *структурно-морфологические особенности, наноструктурные топокомпозиционные покрытия, ионно-плазменная обработка, нанопазы, массоперенос, нанокластерные образования.*

Введение

Актуальность исследования обусловлена разработкой методов и технологий получения многофункциональных наноструктурных топокомпозиционных покрытий и материалов (НСТКПМ), применение которых позволяет существенно улучшить эксплуатационные свойства изделий и конструктивных узлов трибосопряжений [1-4]. Наноструктурные топокомпозиционные покрытия и материалы обеспечивают повышение надежности изделий и узлов за счет повышения усталостной прочности, износостойкости, сохраняют повышенную работоспособность в активных и агрессивных средах. При этом эксплуатационное поведение NSTKPM зависит от их структурно-морфологических характеристик, в том числе наличия в поверхностном слое специфических нанокластерных образований. Ранее было установлено, что посредством ионно-плазменного воздействия удастся формировать на поверхности изделий композиционные нанопокртия различного состава и толщины, а также получать различные типы структур [4]. Кроме того, на основе исследования триботехнических свойств материалов с наноструктурными топокомпозиционными покрытиями было установлено, что наибольшими технологическими возможностями применения обладают материалы с кластерно-гибридным типом структуры покрытий, которые формируются при комбинированном ионно-плазменном

воздействии в условиях интенсивной активации поверхности.

Работа посвящена исследованию влияния режимов ионно-плазменной обработки на изменение морфологии кластерно-гибридного покрытий с целью формирования требуемых структурно-морфологических типов наноструктурных топокомпозиционных покрытий для определенных условий эксплуатации модифицированных изделий и конструктивных элементов.

Методика эксперимента

Ионно-плазменная обработка осуществлялась на модернизированной установке ННВ-6.6 с использованием трехкатодной системы, позволяющая осуществлять активацию поверхности за счет ее распыления под разными углами, а также наносить покрытия различного состава [4].

Обработке подвергались образцы из сплавов и сталей ВТ8, ВТ3-1, ЭП109, 38Х2МЮА, широко используемые в машиностроении. Величина тока электродугового разряда при действии боковых катодов К₂ и К₃ [4] варьировалась в диапазоне $I = 40-180$ А, напряжение смещения изменялось в диапазоне $U = 30-200$ В. Давление в камере составляло $7 \cdot 10^{-10}$ мм. рт. ст. Составы используемых катодов: Ti, Al, Cr. В качестве рабочего газа использовался азот.

Для изучения морфологии рельефа поверхности использовался атомно-силовой микроскоп NTEGRA. Были получены трехмерные изображения поверхностей и их

профили в зависимости от варьируемых режимов ионно-плазменной обработки. На основе анализа полученных данных определялись соответствующие режимам ионно-плазменного воздействия структурно-морфологические типы покрытий.

Результаты эксперимента

Вид и профили поверхности наноструктурных топокомпозитных покрытий кластерно-гибридного типа показаны на рисунке 1.

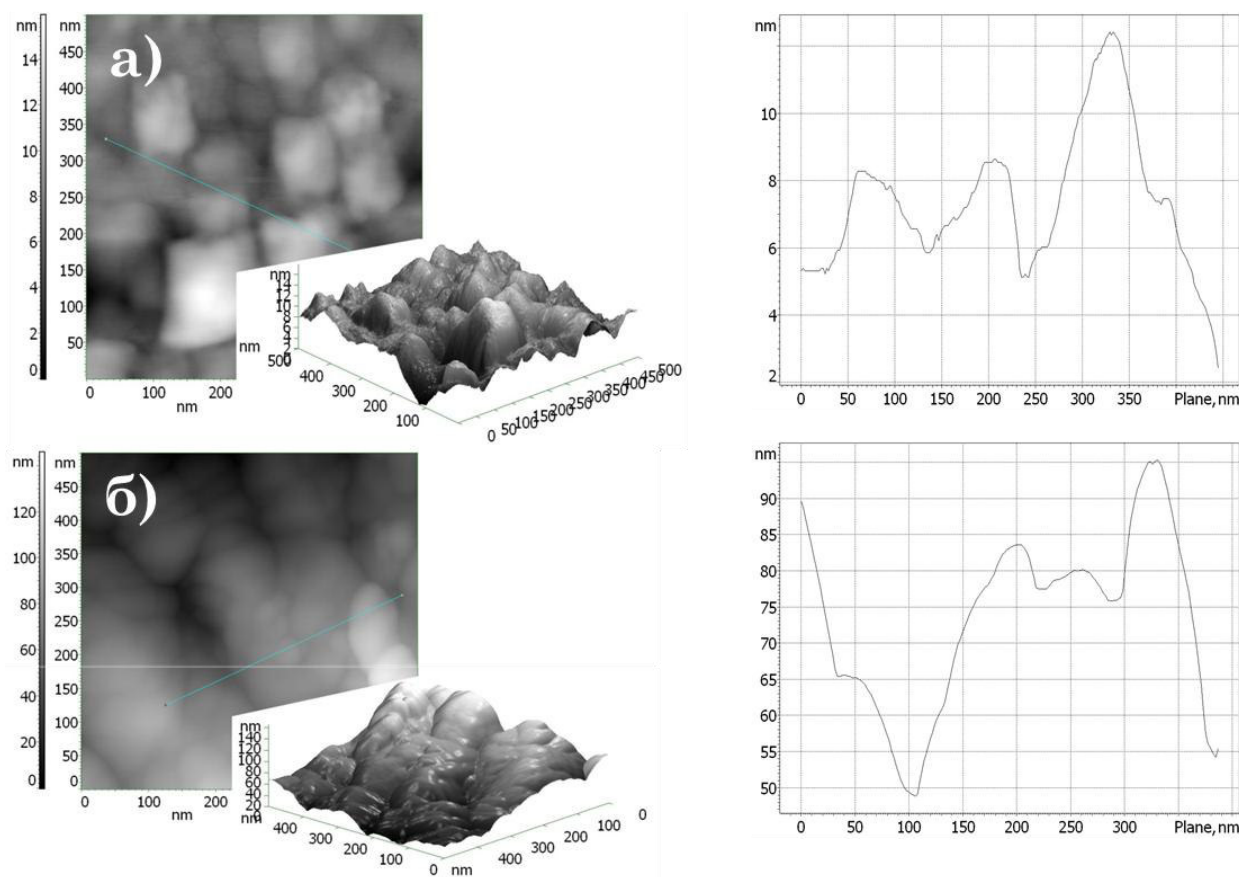


Рис. 1. Вид и профили поверхности наноструктурных топокомпозитных покрытий кластерно-гибридного типа: а) – изображение покрытия, полученного в условиях предварительной активации поверхности с последующим нанесением покрытия при величине тока электродугового разряда $I = 40$ А и напряжении смещения $U = 30$ В; б) – изображение покрытия, полученного в условиях предварительной активации поверхности с последующим нанесением покрытия при величине тока электродугового разряда $I = 120$ А и напряжении смещения $U = 100$ В.

Из рисунка 1 видно, что при росте тока разряда и напряжения смещения происходит переход от единичных кластеров (рис. 1, а) к формированию кластерных образований, при которых единичные кластеры явно неразличимы (рис. 1, б). Подобная тенденция

наблюдается и при дальнейшей интенсификации режимов ионно-плазменного воздействия, что позволяет классифицировать структурно-морфологические типы (СМТ) покрытий (рис. 2).

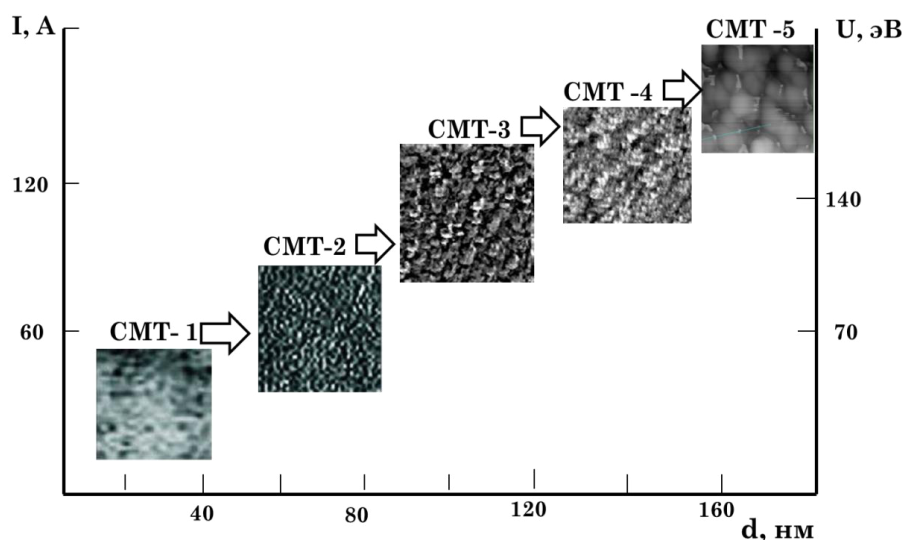


Рис. 2. Изменение морфологии покрытий в зависимости от режимов ионно-плазменной обработки

Обсуждение результатов эксперимента

При анализе причин наблюдаемых структурно-морфологических изменений поверхности покрытий при интенсификации режимов ионно-плазменной обработки следует учитывать, что формирование того или иного структурно-морфологического типа определяется соотношением скоростей следующих конкурирующих процессов: скоростью роста зародышей фаз (наночастиц) и скоростью распыления поверхности. Скорость роста наночастиц, на первый взгляд, должна зависеть от скорости осаждения покрытия при действии катода K_1 [4], расположенного перпендикулярно поверхности обрабатываемого образца. Однако было установлено, что скорость роста фаз при ионно-плазменной обработке с использованием катодов K_2 и K_3 , расположенных под углом относительно обрабатываемой поверхности, примерно на три порядка выше. В этом случае, по-видимому, повышение скорости роста фаз и формирование кластерных образований, определяется процессами столкновения, развивающимися на поверхности образцов. В условиях одновременного действия двух боковых катодов становится возможным проявление «перекрестных» эффектов. Первый связан с дополнительной ионизацией плазменных потоков вблизи поверхности вследствие их «перемешивания» и образованием многозарядных ионов в плазме. Второй обусловлен развитием столкновений вследствие поверхностного массопереноса за счет встречных потоков

осаждаемого вещества. Перекрестные эффекты могут инициировать развитие каскадных явлений с образованием ударных импульсов и термических пиков. Указанные явления могут способствовать повышению скорости твердофазных химических реакций с образованием дополнительных зародышей наночастиц и усиленному массопереносу, приводящему к наблюдающимся трансформациям профилей (рис. 1) и изменениям морфологии поверхности покрытий при интенсификации режимов ионно-плазменной обработки (рис. 2). Поскольку при перекрестных столкновениях создаются сильнонеравновесные условия, о чем свидетельствует образование наблюдаемых наночастиц, для анализа особенностей поверхностного массопереноса вполне обоснованным является привлечение представлений локально-неравновесной термодинамики [5].

Результаты моделирования

Согласно положениям расширенной необратимой термодинамики, использующей в качестве новых независимых переменных диссипативные потоки, массоперенос в локально-неоднородных системах описывается уравнением Максвелла-Каттанео:

$$J + \tau_D \frac{\partial J}{\partial t} = -D \nabla C, \quad (1)$$

где J – поток массы, τ_D – время релаксации потока, D – коэффициент

диффузии, C – концентрация имплантированных ионов, t – время.

Исследование процессов миграции атомов вдоль поверхности проводилось с использованием волновой модели массопереноса, основанной на уравнении Максвелла-Каттанео, являющегося основополагающим для неравновесных условий. Вклад бародиффузии в массоперенос учитывалось с помощью

слагаемого $D_T \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x}$, здесь $D_T = DV_\theta / (kT)$, где D – коэффициент термической

диффузии, P – давление, V_θ – изменение объема, приходящееся на один атом за счет термической диффузии, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Ударная волна моделировалась в виде солитонного профиля

$P(x, t) = P_0 \exp^{-2}((x - st) / x_0)$, где P_0 – амплитуда ударной волны, s – скорость ее распространения, x_0 – полуширина волны. Вклад в изменение концентрации компонентов за счет термодиффузии учитывался с помощью слагаемого

$$\frac{k_1}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x},$$

где k_1 – термодиффузионное отношение, связанное с энергией активации термодиффузии.

Изучение вклада в радиационно-стимулированный массоперенос температуры и градиента давления осуществлялось посредством варьирования времени релаксации τ , шага по времени t , амплитуды ударной волны P_0 , периода возникновения импульса w_0 , числа импульсов N_i и скорости движения границы U потока.

Формула для изменения координаты поверхности имеет вид:

$$w = \int_0^t u_g(\tau) d\tau \quad (2)$$

где $u_g(\tau)$ скорость движения границы в момент времени t .

В качестве граничных условий на подвижной границе w задавались значения концентрации в данной координате в предшествующий момент времени.

Начальные условия для значений концентрации и потока принимались на основе типичных профилей поверхности (рис. 3). В качестве допущения принималось положение о соответствии профилей профилям распределения концентрации того или иного элемента покрытия.

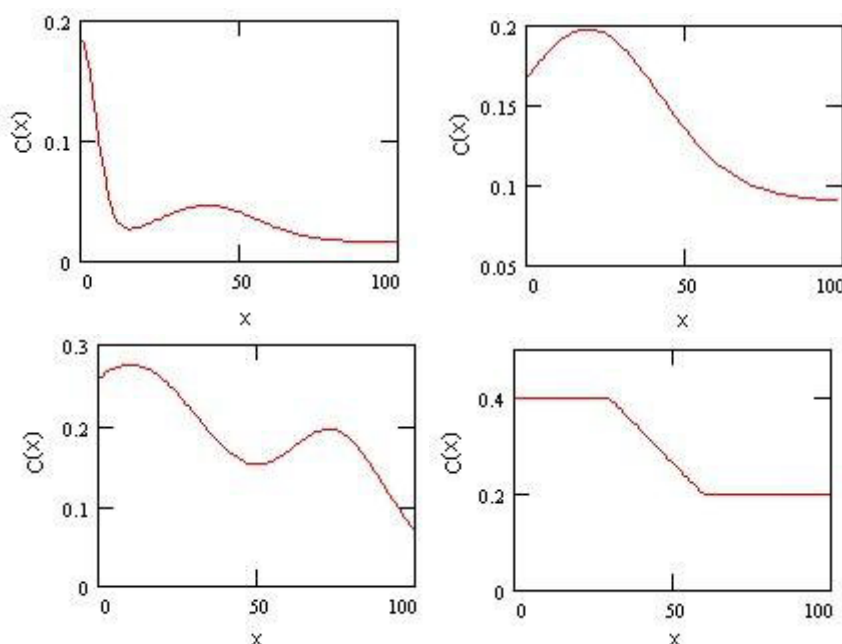


Рис. 3. Исходные профили

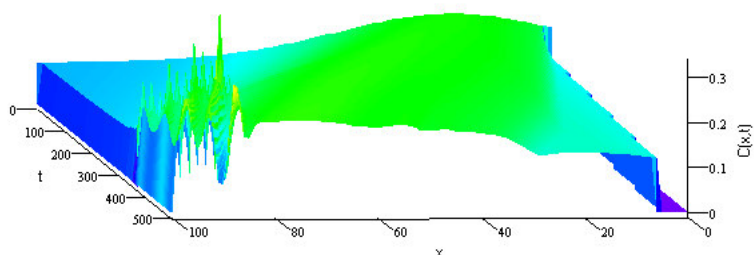


Рис. 4. Поверхность концентрации в координатах пространства x и времени t для профиля 1а. Режим моделирования: количество импульсов $N=5$; период подачи импульса $F=5$; амплитуда давления 30

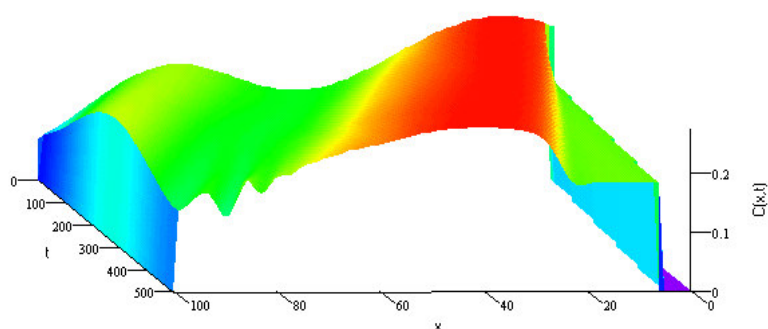


Рис. 5. Поверхность концентрации в координатах пространства x и времени t для профиля 1b. Режим моделирования: количество импульсов $N=5$; период подачи импульса $F=15$; амплитуда давления 10

Полученные результаты свидетельствуют, что для каждого из представленных структурных состояний проявляется эффект существования устойчивых динамических состояний. Согласно результатам моделирования при трансформации различных исходных профилей наблюдается единая закономерность, проявляющаяся в виде образования выраженных максимумов на разных расстояниях вдоль поверхности.

Результаты моделирования, приведенные на рисунках 4, 5 свидетельствуют, что инициирование поверхностного массопереноса, достигаемого с использованием дополнительных катодов K_2 и K_3 , приводят к

появлению концентрационных неоднородностей вдоль обрабатываемой поверхности что, тем самым, повышает вероятность формирования нанокластерных образований в локальных высокодефектных областях и наблюдаемым эффектам «слияния» кластеров с получением кластерных конгломератов.

Проведение комплексных триботехнических исследований в широких условиях трибомеханического контакта позволили разработать рекомендации по целевому использованию изделий и конструктивных элементов в соответствие со структурно-морфологическим типом покрытия (табл.1)

Таблица 1 – Условия эксплуатации трибосопряжений

№ п/п	Структурно-морфологический тип покрытия	Рекомендуемые условия эксплуатации
1	CMT-1	Водородное изнашивание
2	CMT-2	Адгезионное изнашивание
3	CMT-3	Усталостное изнашивание
4	CMT-4	Фреттинг-коррозия
5	CMT-5	Абразивное и эрозионное изнашивание

Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено, что структурно-морфологические особенности формирования наноструктурных топокомпозиционных покрытий в значительной степени определяются процессами поверхностного массопереноса, инициируемого действием плазменных потоков за счет использования расположенных под углом относительно обрабатываемой поверхности катодов. Создаваемые в результате такого воздействия концентрационные неоднородности способствуют образованию нанофаз, а при интенсификации режимов ионно-плазменной обработки приводят к появлению нанокластерных образований – конгломератов наночастиц. Тем самым открываются новые возможности управления структурно-чувствительными характеристиками данных покрытий как в направлении повышения их пластичности, так и повышения их прочности. Проведенные комплексные исследования триботехнических свойств изделий с покрытиями позволили разработать технологические рекомендации по целевому применению определенных структурно-морфологических типов покрытий в условиях преобладающих видов изнашивания и поверхностного разрушения.

Библиографический список

1. Гринберг, П.Б. Метод получения наноструктурированных топокомпозиционных для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования / П.Б. Гринберг, В.Н. Горюнов, К. Н. Полещенко, Е.Е. Тарасов // Вестник Омского университета. – 2012. – № 2 (64). – С. 253-258.
2. Гринберг, П.Б. Технология нанесения наноструктурированных металлопокрытий на резинотехнические изделия / П.Б. Гринберг, К.Н. Полещенко, В.И. Суриков, Е.Е. Тарасов // Вестник Омского университета. – 2012. – № 2 (64). – С. 249-252.
3. Гринберг, П.Б. Инновационные методы и технологии повышения ресурса трибосопряжений / П.Б. Гринберг, В. Н. Горюнов, К.Н. Полещенко, Е.Е. Тарасов // Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации: матер. Международного конгресса – Омск: СибАДИ, 2013. – Кн. 3. – С.352-355.
4. Гринберг, П.Б. Разработка и получение наноструктурных топокомпозиционных / П.Б. Гринберг, Д.Н. Коротаев, К.Н. Полещенко, В.И. Суриков // Вестник СибАДИ – 2015. вып. 3 (43). – С.39-45.
5. Соболев, С.Л. Процессы переноса и бегущие волны в локально – неравновесных

системах / С.Л. Соболев // Успехи физических наук. – 1991. – Т.161 – № 3. – С. 1095 – 1106.

STRUCTURAL-MORPHOLOGICAL FEATURES OF NANOSTRUCTURAL TOPOKOMPOZITNY COVERINGS OF TRIBOTECHNICAL APPOINTMENT

K.N. Poleshchenko, D.N. Korotaev, E.E. Tarasov

Abstract. Structural-morphological features nanostructural the topokompozitnykh of coverings depending on the modes of ion-plasma processing are investigated. Classification of structural-morphological types of the coverings containing nanophases and nanocluster educations is given. On the basis of results of modeling of processes of a superficial mass transfer the reasons of formation of observed structural-morphological changes are studied. Recommendations about target application of products and constructive elements in compliance with structural-morphological type of a covering are made.

Keywords: structural-morphological features, nanostructural topokompozitny coverings, ion-plasma processing, nanophases, mass transfer, nanocluster educations.

References

1. Grinberg P.B., Goryunov V.N., Poleschenko K.N., Tarasov E.E. Metod polucheniya nanostrukturirovannih topokompozitov dlya povisheniya nesushchei sposobnosti konstruktivnykh elementov energooborudovaniya [A method of receipt of nanostructured topokompozit for increase in the bearing capability of structural elements of the power equipment]. *Vestnik omskogo universiteta*, 2012, no. 2 (64), pp.253 - 258.
2. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Surikov V.I., Tarasov E.E. Tehnologiya naneseniya nanostrukturirovannih metallopokritii na rezinotekhnicheskie izdeliya [Technology of drawing nanostructured metal coatings on rubber products]. *Vestnik omskogo universiteta*. – 2012, no. 2(64), pp.249-252.
3. Grinberg P.B., Goryunov V.N., Poleschenko K.N., Tarasov E.E. Innovacionnie metody i tehnologii povisheniya resursa tribosopryazhenii [Innovative methods and technologies of increase in a resource of tribosopryazheniye]. *Arhitektura. Stroitelstvo. Transport. Tehnologii. Innovacii. Mater. Mejdunarodnogo kongressa*, Omsk, SibADI, 2013. Kn. 3. pp.352 - 355.
4. Grinberg P.B. Korotaev D.N., Poleschenko K.N., Surikov V.I. Razrabotka i poluchenie nanostrukturnykh topokompozitov [Development and receipt of nanostructural topokompozit]. *Vestnik SibADI*. Voi. 3(43), 2015, pp.39 - 45.
5. Sobolev S.L. Processi perenosa i beguschie volni v lokalno – neravnovesnykh sistemah.[Processes of transfer and the running waves in locally – nonequilibrium systems]. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1991, T.161, no. 3, pp. 1095 – 1106.

Полещенко Константин Николаевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор, профессор Омского института (филиала) Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова (644009, г. Омск, ул. 10 лет Октября, 195/18, e-mail: omsk@rea.ru).

Коротаев Дмитрий Николаевич (Россия, Омск) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Эксплуатация и ремонт автомобилей ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: drums99@mail.ru).

Тарасов Евгений Евгеньевич (Россия, Омск) – ФГУП НПП «Прогресс». (644018, г. Омск, ул. Кордная 5-я, 4, e-mail: info@progress-omsk.ru).

Poleshchenko Konstantin Nikolaevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, professor, professor of Omsk institute (branch) of Plekhanov Russian Academy of Economics (644009, Omsk, to st. is 10 years of October, 195/18, e-mail: omsk@rea.ru).

Korotaev Dmitry Nikolaevich (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical sciences, the associate professor, professor of the Operation chair and car repairs of The Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI) (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: drums99@mail.ru).

Tarasov Evgeniy Evgen'evich (Russian Federation, Omsk) – federal state unitary enterprise NPP Progress. (644018, Omsk, Kordnaya St. the 5th, 4, e-mail: info@progress-omsk.ru).