

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.05

УДК 621.79; 669.10

В.Г. Гусев, Д.О. Кочетов

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИТРИДНЫХ И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ AISiCr И AISiT_i

Исследованы физико-механические свойства покрытий, нанесенных на подложку из стали 40Х. Покрытия получены с помощью вакуумной установки Unicoat 600SL, использующей магнетронное распыление в среде инертного газа.

Объектом исследования являются износостойкие антифрикционные покрытия, напыляемые на детали ролико-винтового механизма, работающие в тяжелых условиях, характеризующихся отсутствием смазки или ограниченного ее применения. При изучении и реализации нанесения покрытия основополагающим фактором, влияющим на стабильность физико-механических свойств структуры, является генерирование многокомпонентной металлической плазмы.

Целью исследований является создание работоспособных PVD-покрытий, обеспечивающих уменьшение коэффициента трения скольжения в кинематическом узле винт – ролик – гайка, высокую износостойкость деталей узла и увеличение коэффициента полезного действия ролико-винтового механизма.

В статье выполнен анализ и описан алгоритм расчета твердости покрытий. Нанесение покрытий осуществлялось согласно схеме 2D, при которой получали структуру с чередующимися слоями Cr, TiAlN, AlTiN, Ti, TiN.

Реализована также попытка получения определенного состава градиентно-слоистой структуры покрытия с плавным изменением состава компонентов по глубине поверхностного слоя, что, несомненно, улучшает механические характеристики покрытия. Однако в силу ряда специфических причин, природа которых подлежит дальнейшему изучению, положительного результата в этом направлении не получено.

Экспериментально подобраны режимы напыления наиболее прочного и износостойкого нитридного покрытия алюминий-кремний-титан (AlSiTi)N, свойства которого исследованы с использованием современного нанотвердомера Micro-Combi Tester (Швейцария). В результате выполненных исследований установлено, что нитрид алюминий-кремний-титана (AlSiTi)N является наиболее прочным и износостойким покрытием, которое рекомендуется наносить на рабочие поверхности деталей ролико-винтовых механизмов.

Ключевые слова: подложка, PVD-покрытие, нанотвердость, структура покрытия, износостойкость, механическая прочность, нанотвердомер, ролико-винтовой механизм, коэффициент трения, магнетронное распыление, плазма, режим напыления, алгоритм расчета твердости покрытия.

V.G. Gusev, D.O. Kochetov

Vladimir State University named under A.G. and N.G. Stoletovyh,
Vladimir, Russian Federation

PHYSIC-MECHANICAL CHARACTERISTICS RESEARCHING OF NITRIDE AND CARBON COVERINGS ON THE BASIS OF ALSICR AND ALSITI

Physical and mechanical properties of coatings applied on a substrate made from a steel 40X are investigated. The coatings are received by means of vacuum installation Unicoat 600SL, using magnetron dispersion in the environment of inert gas.

The researching object is a wear-resistant antifrictional coating, sprayed on roller-screw mechanism details, working in hard conditions of lubrication absence or its limited application. At study and realisation of coating process by the basic factor influencing on stability of structure physical and mechanical properties is a generation of multicomponent metal plasma.

The researching purpose is working out of the efficient PVD-coating providing reduction of a slippage friction coefficient in a kinematic knot screw-roller-nut, high wear-resistance of knot details and increasing in efficiency of roller-screw mechanism. In an article the analysis is made and the calculation algorithm of coating hardness is described.

The article describes the analysis and calculation algorithm of coatings hardness, implemented in software nanohardness Micro-Combi Tester (Switzerland). Coating has been carried out on the 2D method at which was obtained a structure with alternating layers Cr, TiAlN, AlTiN, Ti, TiN.

There was also a trying to get a gradient-layered coating structure with a define variation of components in a layer depth, which undoubtedly improves the coating mechanical characteristics. However, owing to a row of the specific reasons, which will be study in a future, positive result in this direction was not yet received.

The spraying regimes of the strongest and wear-resistant nitrid coating aluminium-silicon-titan (AlSiTi)N which properties are investigated on the modern nano hardness gauge Micro-Combi Tester (Switzerland) are experimentally selected. As a result of the executed researching it is installed that the strongest and wearproof coating is nitride of the aluminium-silicon-titan (AlSiTi)N which it is recommended to put on working surfaces of roller-screw mechanism details.

Keywords: substructure, PVD-coating, nano hardness, coating structure, wear resistance, mechanical strength, nano hardness gauge, roller-screw mechanism, friction coefficient, magnetron spraying, plasma, spraying regim, calculation algorithm of coating hardness.

Современная высокотехнологичная техника диктует жесткие требования к работе подвижных сопряжений, а также материалам и технологиям их изготовления. Например, перед конструкторами космических аппаратов возникали проблемы разрушения пар трения и выхода их из строя в результате адгезии поверхностей контактирующих металлов, испарения или замерзания смазки, адсорбции граничных пленок или разрушения оксидов. Всё это нередко приводило не только к отказам оборудования, но и гибели космонавтов [1].

Известными методами эту проблему решить не удается, поэтому со времен начала освоения околоземного и межпланетного пространства и до наших дней остаются актуальными твердые смазочные по-

крытия. Существует большое количество научных исследований в области трибологии, материаловедения, методологии нанесения покрытий [2–13], а также работ, свидетельствующих о повышении эксплуатационной надежности и работоспособности подвижных сопряжений деталей машин [14, 15] и др., но в научно-технической литературе по покрытиям редко встречаются данные о физико-механических характеристиках нанесенных покрытий.

В этой связи разработка состава покрытия, обладающего высокими прочностными, износостойкими и трибологическими свойствами, является актуальной научно-технической задачей. Это подтверждается рядом исследований, в которых выполнена разработка как состава самих покрытий, так и режимов их нанесения на подложку. Например, в работе [8] получены математические зависимости влияния режима плазменного напыления на трибологические и механические свойства антифрикционных покрытий на основе алюминия.

При анализе направлений научных поисков ученых в области нанесения покрытий, в том числе наноструктурированных, прослеживается целый ряд используемых материалов и технологий. В исследовании [11] разработано твердое смазочное покрытие на основе фторэластомера СКФ-32 и рассмотрено его формирование на металлической поверхности непрерывным излучением CO_2 -лазера, а в работе [10] экспериментально установлен эффект ионно-пучкового наноструктурирования поверхностного слоя, приводящий к одновременному повышению как прочности, так и пластичности материалов.

Большой интерес представляют многокомпонентные покрытия с заданным составом и равномерным распределением компонентов, нанокристаллические и аморфные покрытия, полученные методом магнетронного распыления.

Ключевым фактором в формировании последних является конструкция магнетрона и материал мишеней, в этой связи усовершенствован метод магнетронного распыления при помощи магнетрона с мозаичным катодом (мишенью). Совмещение физических методов модифицирования поверхности и нанесения покрытий имеет положительный эффект в образовании градиентно-слоистых трибологических покрытий. При выполнении настоящих исследований покрытия получали в результате реализации PVD-процесса (physical vapor deposition – физического осаждения из паровой фазы) на установке Unicoat 600SL

(НПФ «Элан-Практик», г. Дзержинск), внешний вид которой представлен на рис. 1. Перед нанесением покрытий осуществлялся комплекс подготовительных мероприятий, включающий в себя предварительную очистку, ультразвуковое обезжиривание в моющем растворе, промывку в дистиллированной воде и сушку. Процесс PVD-покрытия проводили в атмосфере инертного газа с содержанием реакционного газа – азота и/или метана при приложении к подложке отрицательного потенциала смещения $U_{см}$.



Рис. 1. Установка Unicoat 600SL для нанесения нанокompозитных покрытий: 1 – вакуумная камера; 2 – источники питания магнетронов; 3 – стойка управления

Для улучшения переноса частиц в камере создавали вакуум (10^{-3} Па). Заготовки совершали планетарное движение вокруг двух магнетронов, снабженных мишенями из химически чистых материалов – Cr (ЭРХ-1), сплав алюминия с кремнием АК12пч, титан (BT1-0).

Схема нанесения покрытий изображена на рис. 2, а магнетрон с титановой мишенью – на рис. 3.

При нанесении покрытия использовались несбалансированные магнетроны 1, в которых магнитное поле для увеличения ионизации реализовано с помощью постоянных магнитов на основе неодима. В каждый магнетрон устанавливается мишень 2 из материала, который требуется для получения необходимого состава покрытия. Осаждае-

мые детали 3 совершают планетарное движение (вращаются вокруг своей оси со скоростью $\omega_1 = 5 \text{ мин}^{-1}$, а также вокруг магнетронов со скоростью $\omega_2 = 10 \text{ мин}^{-1}$). Толщина покрытий, полученных при осаждении в таком режиме, составила 50 нм.

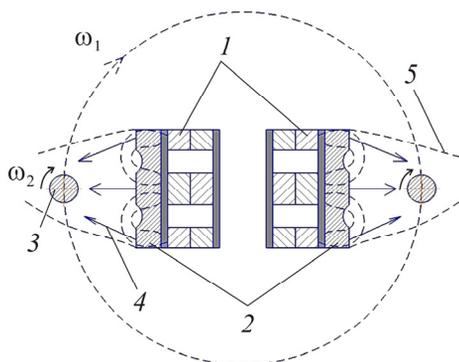


Рис. 2. Схема нанесения нанопокрyтия



Рис. 3. Магнетрон с титановой мишенью

В результате бомбардировки ионами аргона из мишеней 2 выбиваются электроны распыляемого материала 4, которые, ускоряясь в электрическом поле, созданном потенциалом $U_{см}$ порядка 40–70 В, внедряются в поверхность деталей 3.

Магнитное поле 5 заставляет электроны материала мишени двигаться по циклоиде, при этом электрон находится в «ловушке», покинуть которую он может в результате столкновения с другой частицей.

Этот процесс многократно повторяется до тех пор, пока электрон не покинет область действия магнитного и электрического поля. В конечном счете эффективность распыления увеличивается.

Покрyтия наносили согласно режимам (табл. 1).

Параметры, приведенные в табл. 1: $p_{баз}$ – базовое давление в камере, при котором осуществлялся технологический процесс, Па; Q_n – значение натекания газов при откачке, $scst$ ($scst$ – внесистемная единица измерения расхода газа, равная $1 \text{ см}^3/\text{мин}$); p_p – давление газа в камере при проведении технологической операции, Па; I_d – ток разряда, А; $U_{см}$ – напряжение смещения, В; T – время операции, мин; $\nu_{вр}$ – частота вращения, мин^{-1} ; p_1 – давление на входе в форвакуумный агрегат, Па; p_2 – давление на выходе диффузионного насоса, Па; p_4 – давление на входе диффузионного насоса, Па; I_i – сила электрического

тока при ионной очистке, А; Q_{Ar} – расход аргона, сссм; $I_{см}$ – сила тока смещения, А; U_d – напряжение разряда, В; h_m – глубина эрозии мишени, мм.

Таблица 1

Режимы нанесения покрытий

Технологическая операция	Определяющие параметры	Контролируемые параметры
Откачка вакуумной камеры	$p_{баз} = 0,18$ Па $Q_n = 0,2$ сссм	p_1 p_2 p_4
Ионная очистка изделий	$p_p = 0,18$ Па $I_d = 1,5...3,0$ А $U_{см} = 600...1000$ В $T = 5...15$ мин	I_i Q_{Ar}
Нанесение металлического подслоя	$p_p = 0,18$ Па $I_d = 15...18$ А $U_{см} = 40...70$ В $T = 25...30$ мин	$I_{см}$ U_d Q_{Ar}
Нанесение реактивного слоя	$p_p = 0,18$ Па $I_d = 15...18$ А $U_{см} = 40...70$ В $T = 120...130$ мин $v_{вр} = 10...12$ мин ⁻¹	$I_{см}$ U_d Q_{Ar} h_m
Остывание изделий	$p_p = 0,18$ Па $T = 15...20$ мин	Q_{Ar}

Микротвердость покрытий измеряли на нанотвердомере Micro-Combi Tester фирмы CSM (Швейцария).

В процессе приложения внешней нагрузки P индентор, представляющий собой четырехгранную алмазную пирамиду Виккерса, проникает вглубь покрытия перпендикулярно к поверхности образца. Нагрузку на индентор равномерно увеличивали от нуля до 0,05 Н, после чего она равномерно уменьшалась, при этом исследуемый поверхностный слой частично или полностью упруго восстанавливался.

Данные о нагрузке и перемещении регистрировали в ходе всего испытания с частотой 10 Гц и выводили на экран компьютера.

Программное обеспечение нанотвердомера автоматически вычисляет твердость H и модуль упругости E в соответствии с методикой Оливера–Фарра:

$$H = \frac{P_{\max}}{A},$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка; A – площадь контакта индентора с образцом;

$$E = E^* (1 - \nu_s^2),$$

где E^* – эффективный модуль упругости системы покрытие – индентор; ν_s – коэффициент Пуассона, для покрытия он равен 0,3.

Эффективный модуль упругости определяется по формуле

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}},$$

где E_r – приведенный модуль упругости; ν_i – коэффициент Пуассона индентора, $\nu_i = 0,07$; E_i – модуль упругости индентора (для алмаза модуль равен 1140 ГПа).

Приведенный модуль упругости определяли по формуле

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \cdot S}{2 \cdot \beta \cdot \sqrt{A_p} (h_c)},$$

где S – контактная жесткость при максимальной нагрузке; β – геометрический фактор, $\beta = 1,012$; A_p – проекционная площадь контакта; h_c – глубина контакта индентора с образцом при максимальной нагрузке.

Еще одна, не менее важная характеристика покрытия, необходимая для оценки его износостойкости, – величина упругого восстановления W_e , которая определяется по формуле

$$W_e = \frac{h_m - h_r}{h_m},$$

где h_m – максимальная глубина проникновения индентора; h_r – глубина проникновения индентора после снятия нагрузки.

Данные измерений по полученным покрытиям приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения инденторной твердости и модуля упругости покрытий при глубинах проникновения индентора h_m и h_r

Покрытия	Параметры				
	H_{IT} , ГПа	E_{IT} , ГПа	E^* , ГПа	h_m , мкм	h_r , мкм
(AlSiCr)N	49,344	422,506	464,292	0,21	0,079
(AlSiTi)N	51,34	438,770	482,160	0,20	0,070
(AlSiCr)C:H	23,97	221,620	243,540	0,34	0,190
(AlSiTi)C:H	21,32	160,530	176,410	0,39	0,200

Для оценки износостойкости покрытий используют индекс пластичности H_{IT}/E^* ; коэффициент H_{IT}^3/E^{*2} , отражающий сопротивление пластической деформации, и коэффициент упругого восстановления W_e . Значения этих величин для каждого покрытия приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры износостойкости покрытий

Покрытия	H_{IT}/E^*	H_{IT}^3/E^{*2}	W_e
(AlSiCr)N	0,106	0,557	0,62
(AlSiTi)N	0,106	0,582	0,65
(AlSiCr)C:H	0,098	0,280	0,44
(AlSiTi)C:H	0,121	0,311	0,49

Сравнением полученных результатов установлено, что наиболее износостойким является покрытие с более высокими значениями индекса пластичности, сопротивления пластической деформации и коэффициента упругого восстановления, а именно: нитрид алюминия-кремния-титана (AlSiTi)N, который рекомендуется для нанесения на детали планетарных ролико-винтовых передач и других механизмов, работающих в приближенных условиях трения и износа.

Для применения деталей ролико-винтовых механизмов в условиях высокой тепловой напряженности необходимы покрытия более сложного состава, при этом отдельные слои покрытия должны обеспечивать надежное функционирование механизма в условиях высоких температур.

Список литературы

1. Григорьев А.Я., Мышкин Н.К. Твердые смазки // *Химия и жизнь*. – 2014. – № 1. – С. 34–39.
2. Блинков И.В. Наноструктурированные износостойкие покрытия на основе многокомпонентных нитридов, получаемые методом вакуумно-дугового ионно-плазменного осаждения // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 546–553.
3. Блинков И.В. Керамико-металлические (TiN–Cu) наноструктурные ионно-плазменные вакуумно-дуговые покрытия для режущего твердосплавного инструмента // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2013. – № 2. – С. 54–59.
4. Верещака А.А., Верещака А.С., Григорьев С.Н. Многослойно-композиционные наноструктурированные покрытия для режущих инструментов, работающих в тяжелых условиях // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2012. – № 12. – С. 3–11.
5. Верещака А.А. Разработка процесса ассистируемого фильтруемого вакуумно-дугового осаждения // *Вестник Брян. гос. техн. унта*. – 2014. – № 3. – С. 10–13.
6. Электронно-ионно-плазменные методы наноструктурирования поверхностного слоя сплавов на основе титана и алюминия / А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, Е.А. Петрикова [и др.] // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 10-й Международ. конф.* – Минск, 2013. – С. 257–259.
7. Латушкина С.Д. Вакуумно-дуговые нанокристаллические покрытия на основе нитрида титана // *Перспективные материалы*. – 2014. – № 6. – С. 49–54.
8. Рассказова Н.А. Оптимизация параметров антифрикционного покрытия вкладышей подшипников судовых дизелей при плазменном напылении: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2006. – 22 с.
9. Семенов А.П. Перспективы применения новых методов нанесения износостойких и антифрикционных покрытий // *Теория трения, износа и проблемы стандартизации*. – Брянск, 1978. – С. 346–354.
10. Сергеев В.П. Ионно-плазменное наноструктурирование поверхностных слоев высокопрочных сталей и сплавов и нанесение наноструктурных покрытий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Томск, 2011. – 40 с.

11. Тескер С.Е. Разработка и исследование антифрикционных полимерных покрытий на основе фторэластомера СКФ-32: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2001. – 16 с.
12. Тополянский П.А., Тополянский А.П. Прогрессивные технологии нанесения покрытий – наплавка, напыление, осаждение // Технологии обработки поверхности. – 2011. – № 4(73). – С. 63–67.
13. Ширяев С.А. Разработка метода получения многокомпонентных покрытий в магнетроне с мозаичным катодом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2002. – 20 с.
14. Криони Н.К. Повышение работоспособности по триботехническим параметрам высокотемпературных подвижных сопряжений с твердыми покрытиями: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2005. – 40 с.
15. Oliver W.C., Pharr G.M. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // Journal of Materials Research. – 1992. – Vol. 7, № 6. – P. 1564–1583.

References

1. Grigor'ev A.Ia., Myshkin N.K. Tverdye smazki [Solid greasings]. *Khimiia i zhizn'*, 2014, no. 1, pp. 34-39.
2. Blinkov I.V. Nanostrukturirovannye iznosostoikie pokrytiia na osnove mnogokomponentnykh nitridov, poluchaemye metodom vakuumno-dugovogo ionno-plazmennogo osazhdeniia [The nanostructured wearproof coverings on the basis of multicomponent nitrides received by method of vacuum and arc ion-plasma sedimentation]. *Fizikokhimiia poverkhnosti i zashchita materialov*, 2012, vol. 48, no. 6, pp. 546-553.
3. Blinkov I.V. Keramiko-metallicheskie (TiN–Cu) nanostrukturnye ionno-plazmennye vakuumno-dugovye pokrytiia dlia rezhushchego tverdosplavnogo instrumenta [Keramiko-metallichesky (TiN–Cu) nanostructural ion-plasma vacuum and arc coverings for the cutting hard-alloy tool]. *Izvestiia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2013, no. 2, pp. 54-59.
4. Vereshchaka A.A., Vereshchaka A.S., Grigor'ev S.N. Mnogosloinokompozitsionnye nanostrukturirovannye pokrytiia dlia rezhushchikh instrumentov, rabotaiushchikh v tiazhelykh usloviiakh [Multilayeredly-composite nanostructured coverings for the cutting tools working under trying conditions]. *Uprochniaiushchie tekhnologii i pokrytiia*, 2012, no. 12, pp. 3-11.

5. Vereshchaka A.A. Razrabotka protsessa assistiruемого fil'truемого вакуумно-дугового осаждения [Development of process of the assisted filtered vacuum and arc sedimentation]. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 10-13.

6. Klopotov A.A., Abzaev Iu.A., Petrikova E.A. [et al.]. Elektronno-ionno-plazmennye metody nanostrukturirovaniia poverkhnostnogo sloia splavov na osnove titana i aliuminiia [Electronic ion-plasma methods of nanostructuring a blanket of alloys on the basis of the titan and aluminum]. *Materialy 10-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Vzaimodeistvie izlucheniia s tverdym telom"*. Minsk, 2013, pp. 257-259.

7. Latushkina S.D. Vakuumno-dugovye nanokristallicheskie pokrytiia na osnove nitrida titana [Vacuum and arc nanocrystal coverings on the basis of nitride of the titan]. *Perspektivnye materialy*, 2014, no. 6, pp. 49-54.

8. Rasskazova N.A. Optimizatsiia parametrov antifriktsionnogo pokrytiia vkladyshei podshipnikov sudovykh dizelei pri plazmennom napylenii [Optimization of parameters of an antifrictional covering of inserts of bearings of ship diesels at a plasma dusting]. Abstract of Ph. D. thesis. Vladivostok, 2006. 22 p.

9. Semenov A.P. Perspektivy primeneniia novykh metodov naneseniia iznosostoikikh i antifriktsionnykh pokrytii [Prospects of application of new methods of drawing wearproof and antifrictional coverings]. *Teoriia treniia, iznosa i problemy standartizatsii*. Briansk, 1978, pp. 346-354.

10. Sergeev V.P. Ionno-plazmennoe nanostrukturirovanie poverkhnostnykh sloev vysokoprochnykh stali i splavov i nanesenie nanostrukturnykh pokrytii [Ion-plasma nanostructuring blankets high-strength staly both alloys and drawing nanostructural coverings]. Abstract of doctor's degree thesis. Tomsk, 2011. 40 p.

11. Tesker S.E. Razrabotka i issledovanie antifriktsionnykh polimernykh pokrytii na osnove ftorelastomera SKF-32 [Development and research of antifrictional polymeric coverings on the basis of a ftorelastomer of SKF-32]. Abstract of Ph. D. thesis. Volgograd, 2001. 16 p.

12. Topolianskii P.A., Topolianskii A.P. Progressivnye tekhnologii naneseniia pokrytii – naplavka, napylenie, osazhdenie [Progressive technologies of drawing coverings – a surfacing, a dusting, sedimentation]. *Tekhnologii obrabotki poverkhnosti*, 2011, no. 4(73), pp. 63-67.

13. Shiriaev S.A. Razrabotka metoda polucheniia mnogokomponentnykh pokrytii v magnetrone s mozaichnym katodom [Development of a

method of receiving multicomponent coverings in the magnetron with the mosaic cathode]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2002. 20 p.

14. Krioni N.K. Povyshenie rabotosposobnosti po tribotekhnicheskim parametram vysokotemperaturnykh podvizhnykh sopriazhenii s tverdymi pokrytiiami [Increase of working capacity in tribotechnical parameters of high-temperature mobile interfaces with hard coatings]. Abstract of doctor's degree thesis. Moscow, 2005. 40 p.

15. Oliver W.C., Pharr G.M. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, no. 6, pp. 1564-1583.

Получено 12.03.2016

Об авторах

Гусев Владимир Григорьевич (Владимир, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; e-mail: prof_gusev@mail.ru.

Кочетов Денис Олегович (Владимир, Россия) – магистрант кафедры «Технологии машиностроения» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; e-mail: dencrown@yandex.ru.

About the authors

Vladimir G. Gusev (Vladimir, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Vladimir State University named under A.G and N.G. Stoletovyh; e-mail: prof_gusev@mail.ru.

Denis O. Kochetov (Vladimir, Russian Federation) – Master Student, Department of Mechanical Engineering Technology, Vladimir State University named under A.G and N.G. Stoletovyh; e-mail: dencrown@yandex.ru.