

УДК 621.891

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ
«ШЕЙКА-ПОКРЫТИЕ-ВКЛАДЫШ»**

В. И. Кубич, Л. И. Ивченко, А. О. Щаднев

Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64, 69063, м. Запорожье, Украина. E-mail: reibung1@mail.ru

Определен вид регрессионной зависимости, которая может быть использована для оценки износостойкости трибосопряжения «шейка–покрытие–вкладыш» с исходными покрытиями, состоящими из комплекса материалов в составе оловянистой бронзы БрОФ4-0,25 и поверхностно-активной галлиево-индиевой среды, а также прогнозирования характера ее изменения, в зависимости от факторов влияния, свойственных условиям и режимам взаимодействия элементов.

Ключевые слова: трибосопряжение, износ, покрытие, износостойкость, тангенциальная прочность

TO THE MATHEMATICAL DESCRIPTION WEAR ELEMENTS TRIBOUNIT «NECK-COVER-LINER»

V. I. Kubich, L. T. Ivchenko, A. O. Schadnev

Zaporizhzhya National Technical University
vul. Zhukovsky, 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine. E-mail: reibung1@mail.ru

Determination of the regression dependence which can be used to assess the wear resistance friction pairs “neck-cover-liner” to the original coating of complex materials consisting of tin bronze BrOF4-0,25 and surface-active gallium-indium environment and prediction of its change, depending on factors of influence, peculiar to the conditions and modes of interaction of its elements.

Key words: tribounit, the neck, the cover, the liner, wear resistance

**ДО МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИБОЗ'ЄДНАННЯ
«ШІЙКА-ПОКРИТТЯ-ВКЛАДИШ»**

В. І. Кубіч, Л. Й. Івченко, О. О. Щаднів

Запорізький національний технічний університет
вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна. E-mail: reibung1@mail.ru

Визначено вид регресійної залежності, що може бути використана для оцінки зносостійкості трибоз'єднання «шійка–покриття–вкладиш» з вихідним покриттям з комплексу матеріалів у складі олов'янистої бронзи БрОФ4-0,25 та поверхнево-активної галієво-індієвої речовини, а також прогнозування характеру її зміни залежно від факторів впливу, які властиві умовам і режимам взаємодії елементів.

Ключові слова: трибоз'єднання, знос, покриття, зносостійкість, тангенціальна міцність

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Изнашивание элементов трибосопряжений определяется рядом факторов влияния, к которым относятся как свойства их приповерхностных слоев, так и условия взаимодействия – нагрузочный, скоростной режим, наличие смазочного материала. Установление функциональной зависимости между износостойкостью материалов элементов трибосопряжений и факторами, обуславливающими ее изменение в процессе их контактного взаимодействия, является важной научно-технической задачей.

Особенно это важно, когда в трибосопряжениях, лимитирующих ресурс работы изделия в целом, применяются композиционные материалы, при использовании которых на поверхности одного из элементов формируется исходное покрытие с прогнозируемыми высокими триботехническими характеристиками. К таким сопряжениям относятся группы сопряжений коленчатого вала ДВС – «шейка-вкладыш». Результаты ранее проведенных исследований позволили определить комплекс материалов в составе оловянистой бронзы БрОФ4-0,25 и галлиево-индиевой среды, использование которых позволяет фрикционно-механическим способом формировать на поверхности шеек исходные износостойкие покрытия [1, 2]. При этом полученные значения параметров изнашивания позволяют определить

значимый состав галлиево-индиевой среды. Однако вопросу определения вида функциональной зависимости между износостойкостью трибосопряжений с предлагаемыми материалами и факторами влияния на характер ее изменения внимание не уделялось.

В связи с вышеупомянутым целью работы является математическое описание процессов изнашивания в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш», что дополняет результаты ранее проведенных исследований и позволяет оценивать и прогнозировать его триботехническое состояние.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Математическое описание процессов изнашивания трибосопряжения с обработанной шейкой можно представить функциональной зависимостью, таковая определяет износостойкость как функцию физико-механических свойств покрытия шейки коленчатого вала и внешних факторов процесса изнашивания.

Анализ литературных источников показал, что износостойкость трибосопряжения как функция, обратная интенсивности изнашивания, носит степенной характер от определяющих факторов [3]:

$$K_{1-2} = K_0 \Theta^{m_0}, \quad (1)$$

где K_{Θ} – коэффициент, численно равный износостойкости при единичном значении фактора Θ и имеющий размерность $[K] = [\Theta]^{-m_{\Theta}}$, Θ и m_{Θ} – значение фактора и показателя степени при нем;

Например, в качестве фактора Θ может рассматриваться номинальное давление, твердость материала, время изнашивания, максимальная высота неровностей поверхностей, постоянная упругости истираемого материала.

Поскольку износостойкость сопряжения как функция отклика определяется большим числом факторов, то при составлении математического описания рассматривалось воздействие не самих факторов, а безразмерных комплексов, составленных из них. Тогда с учетом предположения о том, что функция (1) удовлетворяет требованиям непрерывности, гладкости и наличия одного экстремума, ее представляли в виде мультипликативной модели [3–6]:

$$K_{1-2} = A \Pi_1^{a_1} \Pi_2^{a_2} \dots \Pi_k^{a_k}, \quad (2)$$

где A – постоянный коэффициент, учитывающий влияние на износостойкость неучтенных факторов; $(\Pi_1^{a_1} - \Pi_k^{a_k})$ – безразмерные комплексы, составленные из факторов влияния; $(a_1 - a_k)$ – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем; k – количество комплексов.

Рассматривая комплексы $(\Pi_1^{a_1} - \Pi_k^{a_k})$ как обобщенные факторы исследуемого процесса и выразив каждый комплекс обобщенной переменной ($x_i = \Pi_i$), выражение (2) примет вид:

$$K_{1-2} = A x_1^{a_1} x_2^{a_2} \dots x_k^{a_k} = A \prod_{i=1}^k x_i^{a_i}, \quad (3)$$

где x_i – независимые безразмерные обобщенные параметры (переменные), которые используются в качестве управляемых факторов.

Приведенное уравнение (3) представляет собой основу для составления математического описания процесса изнашивания исследуемого сопряжения.

Для определения вида математического описания определены факторы, которые обуславливают процесс изнашивания исследуемого трибосопряжения при наличии граничной смазки в зоне трения, т.е. определяют износостойкость трибосопряжения. Такие факторы можно объединить в две группы [3, 7, 8].

К первой группе относятся факторы, определяющие свойства покрытия шейки:

- микроадгезионные: тангенциальная прочность адгезионной связи τ_n , МПа; толщина покрытия δ , мкм;
- шероховатость: параметр шероховатости R_a , мкм;
- фрикционные свойства сопряжения и параметры молекулярного взаимодействия тел: коэффициент трения.

Во вторую группу относят факторы, определяющие условия трения сопряжения:

- время приработки сопряжения t_n , с;
- номинальное давление в контакте p_a , МПа;
- скорость скольжения в контакте V , м/с.

В качестве факторов, определяющих микроадгезионные свойства и шероховатость покрытия шейки, определены тангенциальная прочность адгезионной связи τ_n , толщина покрытия δ , а также параметр шероховатости R_a . К факторам, определяющим условия трения, отнесены номинальное давление p_a и скорость скольжения V в фрикционном контакте шейки и вкладыша. Для выполнения требования однородности, обусловленного первой теоремой подобия, при выводе функциональной зависимости износостойкости учтен фактор времени – рассмотрено время приработки t_n исследуемого сопряжения.

С учетом выражения (2) функциональная зависимость износостойкости сопряжения от перечисленных факторов может быть представлена в виде:

$$K_{1-2} = B \left(\frac{t_n}{p_a} \right)^{b_1} \left(\frac{d}{V t_n} \right)^{b_2} \left(\frac{d}{R_a} \right)^{b_3} f^{b_4}, \quad (4)$$

где B, β_{1-4} – постоянные коэффициенты, определяемые в результате проведения экспериментальных исследований, как и значения переменных $\tau_n, \delta, R_a, t_n, f, \omega, p_a$.

Безразмерные комплексы выражения (4) имеют определенный физический смысл. Первый комплекс характеризует относительную тангенциальную адгезионную прочность, второй комплекс численно равен линейному износу покрытия на пути трения в 1 м в течении 1 с, третий комплекс характеризует относительную толщину покрытия.

При анализе зависимости (4) можно предварительно сделать вывод о том, что износостойкость сопряжения пропорциональна тангенциальной прочности адгезионной связи и толщине формируемого покрытия. Для повышения износостойкости целесообразно уменьшать давление элементов пары трения, скорость скольжения во фрикционном контакте и параметр шероховатости поверхности шейки коленчатого вала. Приведенные выводы не противоречат теоретическим положениям и результатам экспериментальных работ, представленным в литературных источниках [3, 4, 8].

Выравнивание полученной зависимости (4) позволяет представить ее в виде линейного полинома:

$$y = b_0 + \sum_{k=1}^4 b_k X_k, \quad (5)$$

где $y = \ln K_{1-2}$; $b_0 = \ln B$; $X_1 = \ln \left(\frac{t_n}{p_a} \right)$;

$X_2 = \ln \left(\frac{d}{V t_n} \right)$; $X_3 = \ln \left(\frac{d}{R_a} \right)$; $X_4 = \ln f$; $b_k = b_k$; b_0, b_k

– неизвестные коэффициенты уравнений (4) и (5).

Результаты экспериментов [2] по оценке влияния состава компонентов сплавов на характеристики элементов сопряжений позволили определить значения факторов влияния, входящих в функциональную зависимость (4) (табл.1), и составить систему из пяти уравнений (5).

Каждое из уравнений дает соотношения значений безразмерных комплексов, определяющих величину износостойкости для каждого отдельного опыта.

Таблица 1 – Экспериментальные значения факторов влияния безразмерных комплексов

Наименование	Сплав с содержанием индия, %, ат.				
	19	17	13	8	6
$I_{1-2}, 10^6$	20,63	18,47	17,92	16,12	15,26
δ , мкм	4,69	4,79	4,83	4,88	4,66
τ_n , МПа	66,2	65,1	57,6	49,3	46,5
p_a , МПа	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
f	0,04	0,044	0,05	0,04	0,1
t_n , с	540	600	780	720	840
V , м/с	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84

Решая такую систему уравнений, определены значения коэффициентов b_0, b_k и вид регрессионной зависимости износостойкости трибосопряжения от факторов влияния. Значения толщины покрытия δ определены расчетным путем, исходя из толщины сформированного покрытия ≈ 5 мкм и значений линейного износа ролика Δh_2 [2]:

$$\begin{cases} 16,84 = b_0 + 4,29b_1 - 18,42b_2 + 2,82b_3 - 3,22b_4 \\ 16,73 = b_0 + 4,28b_1 - 18,47b_2 + 2,84b_3 - 3,12b_4 \\ 16,70 = b_0 + 4,16b_1 - 18,72b_2 + 2,85b_3 - 2,99b_4 \\ 16,59 = b_0 + 4,00b_1 - 18,64b_2 + 2,86b_3 - 3,22b_4 \\ 16,56 = b_0 + 3,94b_1 - 18,93b_2 + 2,81b_3 - 2,3b_4 \end{cases} \quad (5)$$

Решая полученную систему уравнений матричным способом, с помощью программы *Mathcad* определены значения коэффициентов: $b_0=13,697$; $b_1=0,71$; $b_2=-0,627$; $b_3=-4,555$; $b_4=-0,432$.

Тогда линейный полином примет, следующий вид:

$$y = 13,697 + 0,71X_1 - 0,627X_2 - 4,555X_3 - 0,432X_4, \quad (6)$$

В результате преобразования уравнения (А.3) получена регрессионная зависимость износостойкости трибосопряжения от факторов влияния:

$$K_{1-2} = e^{13,697} \left(\frac{t_n}{p_a} \right)^{0,71} \left(\frac{d}{Vt_n} \right)^{-0,627} \left(\frac{d}{Ra} \right)^{-4,55} f^{-0,432}, \quad (7)$$

где $e=2,718... -$ основание натурального логарифма.

Полученная регрессионная зависимость является математическим описанием процесса изнашивания элементов трибосопряжения «шейка-покрытие-вкладыш». Анализ коэффициентов показал, что по степени влияния на изменение износостойкости факторы располагаются в следующей последовательно-

сти: относительная толщина покрытия \rightarrow относительная тангенциальная прочность адгезионной связи \rightarrow линейный износ покрытия и коэффициент трения.

Адекватность математического описания процесса изнашивания определялась по критерию Фишера – K_{fe} . В результате обработки экспериментальных и теоретических значений износостойкости дисперсия адекватности $D_a=2,38 \cdot 10^6$, средняя дисперсия всего эксперимента $D_{cp}=0,14 \cdot 10^6$, экспериментальное значение критерия Фишера $K_{fe}=17$. При доверительной вероятности 0,95 и числа степеней свободы $q_1=n-d=5-4=1$; $q_2=n(m-1)=5(2-1)=5$ теоретическое значение критерия Фишера $K_{ft}=23$.

Поскольку $K_{fe} < K_{ft}$ ($17 < 23$), то полученное математическое описание адекватно, т.е. описывает изучаемый процесс.

Полученная зависимость может быть использована для прогнозирования характера изменения и оценки износостойкости трибосопряжений с исследуемыми материалами в зависимости от факторов влияния, свойственных условиям и режимам их взаимодействия. В качестве примера приведены пространственные диаграммы износостойкости в зависимости от изменения значений факторов влияния (рис. 1).

На рис. 1,а изображен вид поверхности, характеризующей характер изменения износостойкости трибосопряжений в зависимости от степени влияния процентного состава компонентов галлиево-индиевой среды, обуславливающего значения τ_n и процессы в контактных слоях взаимодействующих материалов.

Наличие минимума в значениях толщины покрытия может быть обусловлено изменением механических свойств, прежде всего самого медьсодержащего покрытия:

- при $\tau_n=46,5$ МПа изнашивание покрытия обусловлено недостаточной химической активностью галлия для образования прочных когезионных связей в его формирующейся структуре;

- при $\tau_n=66,2$ МПа изнашивание покрытия обусловлено податливостью его формирующейся структуры – пластичностью, возможным переносом элементов структуры на поверхность колодки за счет активизации процессов схватывания на локальных микроучастках.

Приведенное может указывать на смену механизма изнашивания покрытия при изменении содержания индия в сплавах.

Повышение износостойкости трибосопряжения может быть вызвано увеличением степени активности структурных элементов покрытия - галлия, индия к поверхности их антифрикционного слоя – эффектом адсорбционного снижения прочности связей уже в его структуре. За счет этого возможно пластифицирование материала слоя и создания условий деформирования без накопления дефектов, приводящих к разрушениям. При этом не исключается возможность переноса элементов образующейся структуры слоя на поверхность покрытия.

Максимальные значения износостойкости обусловлены максимальной прочностью адгезионной связи покрытия с подложкой основного материала

$\tau_n=66,2$ МПа и минимальным значением коэффициента трения $f=0,04$ при сосредоточении процессов изнашивания в слоях покрытия $\delta \approx 1$ мкм.

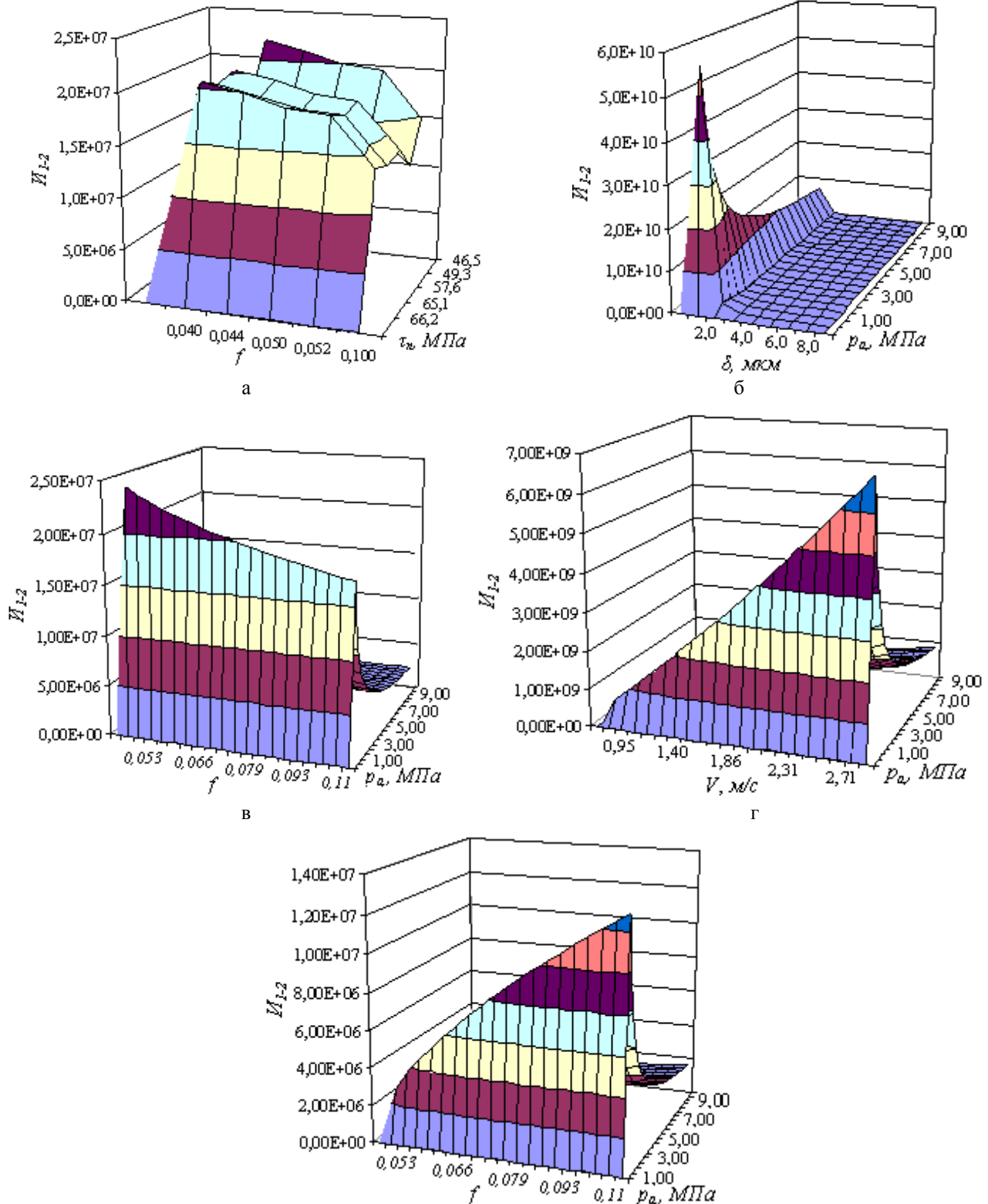


Рисунок 1 – Пространственные диаграммы износостойкости трибосопряжений «шейка-покрытие-вкладыш» при различных условиях и режимах взаимодействия их материалов:

- а – $\delta=4,6-4,9$ мкм; $t_n=540-840$ с; $f=0,04-0,11$, $\tau_n=46,5-66,2$ МПа; $V=0,84$ м/с; $p_a=0,9$ МПа;
- б – $\delta=1-8$ мкм; $t_n=120-1440$ с; $f=0,04$, $\tau_n=66,2$ МПа; $V=2,0$ м/с; $p_a=0,5-8,0$ МПа;
- в – $\delta=2$ мкм; $t_n=120-1440$ с; $f=0,11$, $\tau_n=66,2$ МПа; $V=0,84-2,9$ м/с; $p_a=0,5-9,0$ МПа;
- г – $\delta=5$ мкм; $t_n=300$ с; $f=0,04-0,11$, $\tau_n=66,2$ МПа; $V=2,0$ м/с; $p_a=0,5-9,0$ МПа
- д – $\delta=5$ мкм; $t_n=120-1440$ с; $f=0,04-0,11$, $\tau_n=66,2$ МПа; $V=2,0$ м/с; $p_a=0,5-9,0$ МПа

Также наблюдаются максимальные значения износостойкости при $\tau_n=46,5$ МПа, однако коэффициент трения 0,04 в трибосопряжении по результатам эксперимента соответствовал 0,1, при этом наблюдался повышенный износ антифрикционного слоя вкладыша, и было указано на смену механизма изнашивания структур исходного материала.

Последнее определялось процентным содержанием компонентов в галлиево-индиевой среде. На рис. 1,б-г приведены прогнозируемые износостойкости трибосопряжений в зависимости от изменения нагрузки и скорости скольжения в зоне трения. Диаграммы указывают на следующее. Максимальные значения износостойкости трибосопряжения могут быть обусловлены минимальным износом покрытия $\delta \leq 2$ мкм при близких к минимальным нагрузкам и частотах вращения образцов, при которых возможны проявление свойств покрытия. При этом значения коэффициента трения находятся в пределах 0,04-0,11.

По мере изнашивания слоев покрытия и образующихся в них структур износостойкость трибосопряжения снижается до значений, характерных для первоначально формирующихся структур в слое $\delta \approx 1$ мкм.

ВЫВОДЫ. Рассмотренные в работе подходы к математическому описанию процессов контактного взаимодействия материалов элементов трибосопряжений позволили определить вид регрессионной зависимости износостойкости от факторов влияния, обуславливающих изнашивание элементов трибосопряжений «шейка-покрытие-вкладыш».

ЛІТЕРАТУРА

1. Пат. № 2060300. Российская Федерация, МПК⁶ С23С26/00. Способ фрикционно-механического нанесения антифрикционного покрытия / А.М. Колчаев, В.Б. Степанов; заявитель и патентообладатель Рязанское высшее военное автомобильное инженерное училище. – № 93057526/02; заявл.28.12.93; опубл. 20.05.96, Бюл. 17/2000.
2. Про вплив вмісту компонентів галієво-індієвого середовища на триботехнічні характеристики трибозеднання/ В.І. Кубіч, Л.Й. Івченко // Проблеми тертя та зношування. – 2009. – Вип. № 52 – С. 92–101.
3. Справочник по триботехнике: в 3-х т. Т.1. Теоретические основы /Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
4. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пуч-

ков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

5. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М., 1980. – 228 с.

6. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д.Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.

7. Авдонькин Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей. – М.: Транспорт, 1985. – 215 с.

8. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). – М.: Издательство МСХА, 2002. – 632 с.

REFERENCES

1. Path. № 2060300. Russia, МПК6 S23S26/00. Methodoffrictionmechanicaspark antifriction coating / А.М. Kolchaeв, V.B. Stepanov; applicant and patentee Ryazan Higher MilitaryAutomotive Engineer Noe College. – № 93057526/02; zayavl. 28.12.93, publ. 05.20.1996, Bull. 17/2000 [in Russian].
2. On the influence of components content helium-indium environment on the tribological characteristics of tribo connection / V.I. Kubich, L. J. Ivschenko // Problems offriction and wear. – 2009. – Vol. № 52. – P. 92–101 [in Ukrainian].
3. Reference Tribotechnique: 3 Vols V.1 Theoretical Foundations / under total. Ed. M. Hebden, A.V. Chichinadzde. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 400 p. [in Russian].
4. Friction and wear in extreme environments: Reference/ J.N. Drozdov, V.G. Pavlov, V.N. Pauchkov. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 224 p. [in Russian].
5. Planning and analysis of experiments for solving friction and wear / Y.A. Evdokimov, V.I. Kolesnikov, A.I. Teterin. – М., 1980. – 228 p. [in Russian].
6. Modeling friction and wear in machines / E.D. Brown, J.A. Evdokimov, A.V. Chichinadze. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 191 p. [in Russian].
7. Theoretical Foundations of technical exploitation of automobiles / F.N. Avdonkin. – М.: Transport, 1985. – 215 p. [in Russian].
8. Tribotechnique (design, manufacture and operation of machines) / D.N. Garkun. – М.: Publishing МСХА, 2002. – 632 p. [in Russian].

Стаття надійшла 18.04.2011.

Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Саленком О.Ф.