

УДК 53.08: 004

Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости»

Комаров Ф.Ф.¹, Пилько В.В.¹, Кулешов В.Н.²

¹Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 29.03.2016

Принята к печати 25.10.2016

Переход точного машиностроения и приборостроения к широкому использованию наноразмерных структур и тонких слоев требует повышения локальности методов измерения по глубине материала. Унифицированные и общепризнанные стандарты методов измерения износостойкости и коэффициента трения слоистых структур и поверхностно-упрочненных материалов в настоящее время отсутствуют. Целью работы являлось создание универсальной машины трения, отличающейся максимально упрощенными требованиями к подготовке и геометрической форме образцов.

Важным требованием, предъявляемым к установке и методу измерения, является возможность измерения коэффициента трения и определения стойкости к износу покрытий и упрочненных слоев микронной и субмикронной толщины. Вторым важным требованием является воспроизведение в эксперименте ациклического процесса трения, максимально приближенного к реальным условиям эксплуатации узлов и деталей. Оба эти условия успешно реализуются при использовании метода «диск на плоскости». Использование метода «диск на плоскости» ведет к упрощению и повышению экспрессности измерений, минимизации используемых нагрузок на узел трения, снижению температуры трибопары, увеличению чувствительности и улучшению термостабилизации тензомоста.

Разработана, изготовлена и апробирована установка для исследования процессов трения и износа различных пар материалов в условиях, близких к эксплуатационным. Апробирована конструкция измерительной консоли с низкой величиной паразитных нагрузок на тензодатчики. Создан компьютеризированный программно-аппаратный комплекс для регистрации параметров процесса трения. Разработано программное обеспечение для обработки и хранения результатов эксперимента. Программное обеспечение совместимо с современными операционными системами *Windows*. Формат файлов для хранения результатов измерения коэффициента трения совместим с основными графическими редакторами и допускает математическую обработку средствами *Excel*. Последовательно изложены основные принципы анализа и обработки результатов. Приведены типичные результаты использования разработанной машины трения для измерения коэффициента трения и определения стойкости к износу массивных, однородных и поверхностно упрочненных материалов и сплавов с покрытиями.

Показана высокая эффективность созданного комплекса оборудования при исследовании и оптимизации процессов нанесения покрытий и модификации поверхностных слоев. Работоспособность комплекса подтверждена при исследовании модифицированных слоев и покрытий микронной толщины. Установлено, что коэффициент трения и износостойкость конструкционных материалов, тонких микрокристаллических упрочняющих покрытий и наноструктурированных слоев эффективно контролируется с помощью созданного комплекса.

Ключевые слова: измерительный комплекс, коэффициент трения, износостойкость.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Адрес для переписки:

Пилько В.В.

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: pilkow@mail.ru

Address for correspondence:

Pilko V.V.

A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University, Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: pilkow@mail.ru

Для цитирования:

Комаров Ф.Ф., Пилько В.В., Кулешов В.Н.

Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости».

Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 279–285.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

For citation:

Komarov F.F., Pilko V.V., Kuleshov V.N.

[Hardware and software complex for friction and wear investigations by the «disc on plate» method].

Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 279–285 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Hardware and software complex for friction and wear investigations by the «disc on plate» method

Komarov F.F.¹, Pilko V.V.¹, Kuleshov V.N.²

¹A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus

²Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus

Received 29.03.2016

Accepted for publication 25.10.2016

Abstract

Transition of the precision engineering and instrumentation to the widespread use of nanoscale structures and thin layers requires improved localization methods for measuring the depth of the material. Unified standards and the generally accepted methods for measuring the wear resistance and friction coefficient are not currently available. The aim of this work was the development of a universal friction machine with the simplified requirements for the preparation and the geometric shape of the sample and the opposing disc.

An important requirement for the equipment and the method of measurement is the ability to measure the friction coefficient and the determination of the wear resistance of coatings and hardened layers of micron and submicron thicknesses. Another important requirement is modeling in the experiment of acyclic friction process, as close as possible to the real operating conditions of components and parts. Both of these conditions are successfully realized by using the method of «disc on plate». Implementation of «disk on plate» method was used to simplify and improve the rapid measurement, and to minimize load on the friction assembly, reduce friction pair temperature, increase the sensitivity and improve the resistive bridge thermal stabilization.

The complex for the study of friction and wear processes of various materials pairs in conditions close to operational was manufactured and tested. The measuring console with a low value of the parasitic load on the measuring cell was designed. A computerized hardware and software system for the registration of the friction parameters of the process was developed. The software for processing and storage of experiment results was developed. The software is compatible with modern Windows operating systems. The file format for measurement results storage is compatible with the conventional graphic editors and could be processed by means of Excel. The main principles of the analysis and processing of the results are consequentially described. Typical results of usage of the developed machine for friction coefficient measurements and the determination of the wear resistance of massive, homogeneous surface-hardened materials and alloys with coatings are shown.

The high efficiency of the created equipment complex during investigation of coatings, optimization of coating depositing processes and the modification of the surface layers are shown in the study. The efficiency of the complex was confirmed by the study of the modified layers and micron thickness coatings. It was found that the friction coefficient and wear resistance of construction materials, modified thin microcrystalline layers and nanostructured coatings was effectively controlled by using of the created complex.

Keywords: measurement complex, friction coefficient, wear resistance.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Адрес для переписки:

Пилько В.В.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: pilkow@mail.ru

Address for correspondence:

Pilko V.V.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University, Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: pilkow@mail.ru

Для цитирования:

Комаров Ф.Ф., Пилько В.В., Кулешов В.Н.
Программно-аппаратный комплекс для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости».
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 3. – С. 279–285.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

For citation:

Komarov F.F., Pilko V.V., Kuleshov V.N.
[Hardware and software complex for friction and wear investigations by the «disc on plate» method].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 3, pp. 279–285 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-3-279-285

Введение

Актуальной задачей точного машиностроения является сбережение энергии и ресурсов. Как одно из перспективных направлений решения задачи зарекомендовало себя использование новых материалов [1], материалов с модифицированным поверхностным слоем [2] либо с нанесенным на поверхность покрытием [3]. Вследствие многофакторности процессов обработки и нанесения неизбежно возникает задача их оптимизации. В большинстве случаев задача сводится к поиску экстремумов износостойкости и коэффициента трения [4, 5]. Экспрессное определение этих важных величин позволяет интенсифицировать процессы оптимизации. Наметившиеся в последнее время тенденции перехода к наноразмерным структурам и тонким слоям [6, 7] вынуждают повышать локальность методов измерения по глубине материала. Унифицированные и общепризнанные стандарты методов измерения износостойкости и коэффициента трения материалов для точного машиностроения и приборостроения в настоящее время отсутствуют. Перспективным способом решения проблемы представляется унификация требований к испытываемым образцам слоистых структур и поверхностно-упрочненных материалов и контртелу. Основными источниками новой научной информации при исследованиях служат величина коэффициента трения и диапазон ее изменения в зависимости от времени испытания.

Среди используемых в настоящее время установок для трибологических исследований прототипом разработки могут послужить машины трения [8, 9]. Обе машины корректно определяют осевую нагрузку, но обладают рядом недостатков, среди которых наиболее существенными являются:

- сложная форма образца;
- проблема корректного определения дистанции трения;
- сложность термостабилизации механического контакта.

Целью данной работы было создание трибометрического комплекса, позволяющего устранить указанные выше недостатки.

Основные результаты и их обсуждение

Установлено, что для решения поставленных задач наиболее эффективным методом исследования коэффициента трения и износостойкости

является контакт вращающегося диска (контртело) и неподвижной плоскости (образец) при сохранении неизменными основных параметров испытаний.

Метод характеризуется:

- простой формой образца;
- возможностью использования смазывающих и охлаждающих агентов;
- широким диапазоном и высокой точностью контроля нагрузки и силы трения;
- высокой эффективностью при исследовании покрытий и модифицированных слоев;
- максимальной приближенностью испытаний к реальным условиям эксплуатации;
- возможностью получения основных характеристик процессов трения и износа.

Схема разработанной экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Установка смонтирована на станине 10, снабженной виброопорами 11. Контртело в виде диска с полированным ребром изготавливают из материала, наиболее точно воспроизводящего условия эксплуатации образцов. В условиях данного эксперимента использовано контртело из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Диск 2 приводится во вращение с постоянной скоростью 0,33 оборота в секунду синхронным двигателем типа РД–09 через редуктор. Точность стабилизации скорости вращения определяется стабильностью частоты сети переменного тока, линейная скорость контртела рассчитывается исходя из его диаметра. Образец 1, предварительно отбалансированный в равновесии с помощью подвижного противовеса 7, прижимается к диску усилием калиброванного разновеса 3, размещенного точно над осью вращения 8. В процессе трения предусмотрена возможность частичного погружения диска в рабочую жидкость, служащую для смазки, удаления продуктов износа и охлаждения контртела.

При работе устройства сила трения вызывает деформации упругой стальной пластины, снабженной четырьмя тензоэлементами, два из которых подвергаются сжатию, а два – растяжению. Тензоэлементы соединены в температурно-компенсированную мостовую схему 12, одна диагональ которой запитана от высокостабильного источника напряжения. Со второй диагонали снимается электрический сигнал, пропорциональный величине силы трения в паре. Паразитный сигнал, возникающий вследствие асимметрии плеч моста, компенсируется потенциостатом.

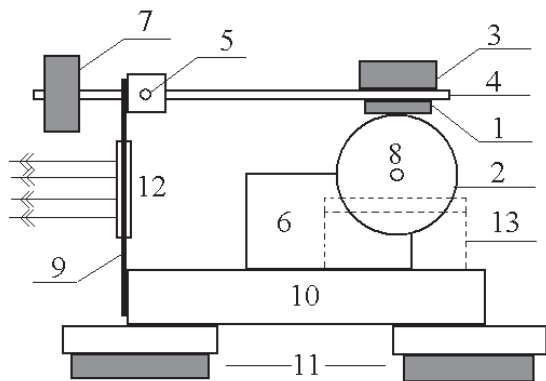


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования коэффициента трения и износостойкости материалов в паре «диск – плоскость»: 1 – исследуемый образец; 2 – диск; 3 – нагрузка; 4 – консоль; 5 – ось качания; 6 – двигатель с редуктором; 7 – балансир; 8 – ось вращения; 9 – упругая стальная пластина; 10 – станина; 11 – виброопоры; 12 – тензоэлементы; 13 – ванна с рабочей жидкостью (при необходимости)

Figure 1 – The assembly of the experimental circuit for the «disc – plate» pair friction coefficient and the wear resistance measurements: 1 – testing sample; 2 – disc; 3 – load; 4 – console; 5 – oscillation axis; 6 – motor with speed reducer; 7 – equalizer; 8 – rotation axis; 9 – elastic steel plate; 10 – frame; 11 – antivibration mountings; 12 – strain gauge transducers; 13 – bathtub with operating liquid (optional)

Сигнал обрабатывается в режиме реального времени АЦП – платой *ICP DAS PIO-821H*, подключенной к системной шине персонального компьютера (ПК) с установленным драйвером *PIO-821 Series Classic Driver* версии не ниже 1.0.1. Минимально рекомендуемая конфигурация ПК:

- процессор *Intel Pentium* (или совместимый);
- операционная система *Windows XP*.

Данные поступают в специально разработанную для трибологических испытаний программу регистрации напряжения «*Tribology Logger 2013 v.1.00*». Основное диалоговое окно программы выполнено стандартными средствами *Delphi* и содержит полный набор опций, свойственных обычным планшетным потенциометрам-регистраторам. Программное обеспечение производит:

- регистрацию зависимости напряжения от времени с сохранением на накопителе и отображением графика зависимости на экране ПК;
- отображение ранее сохраненных зависимостей на экране ПК, вывод их на принтер;

– экспорт зависимостей в текстовый файл.

Для калибровки тензомоста предусмотрена возможность приложения силы по нормали к упругой пластине с помощью калиброванных разновесов. Время испытаний фиксируется системным таймером и выдерживается постоянным для всех образцов. Дистанция трения при необходимости определяется расчетным путем, исходя из диаметра используемого контртела. По истечении времени испытаний производится определение геометрических размеров трека износа оптическими методами и определяется величина объемного износа. При необходимости данные текстового файла с учетом результатов калибровки могут быть обработаны программными продуктами типа *Origin* и позволяют определить интегральное значение работы сил трения. Основные параметры и условия испытаний:

- толщина исследуемого слоя 1–10 мкм;
- толщина образца не менее 3 мм;
- диаметр контртела 30–60 мм;
- точность контроля величины коэффициента трения $\pm 0,02$;
- точность контроля дистанции трения $\pm 1\%$;
- величина осевой нагрузки $0,05\text{--}1,00 \pm 0,01\text{ Н}$;
- скорость вращения $0,33 \pm 0,03$ оборотов в секунду;
- интегральная температура пары трения $20\text{--}78\text{ }^\circ\text{C}$;
- линейная скорость контртела $0,03\text{--}0,06\text{ м/с}$.

Апробация методики осуществлена в ряде разноплановых экспериментов, отдельные типичные результаты приводятся ниже.

При оптимизации параметров процесса нанесения слоев триботехнического назначения проводились измерения коэффициента трения нержавеющей стали с покрытием из модифицированного наноструктурирующими компонентами нитрида титана. Типичный результат измерений коэффициента трения представлен на рисунке 2.

Уместно заметить, что высокое значение коэффициента трения может быть обусловлено в ряде случаев интенсивным износом контртела и не является критичным, к примеру, для покрытий режущего инструмента при черновой обработке.

После регистрации временной зависимости коэффициента трения возникший трек износа может быть исследован оптическими методами и путем профилометрии. Ниже приводится пример

сравнительных испытаний на стойкость к износу образцов двух типов нержавеющей стали.

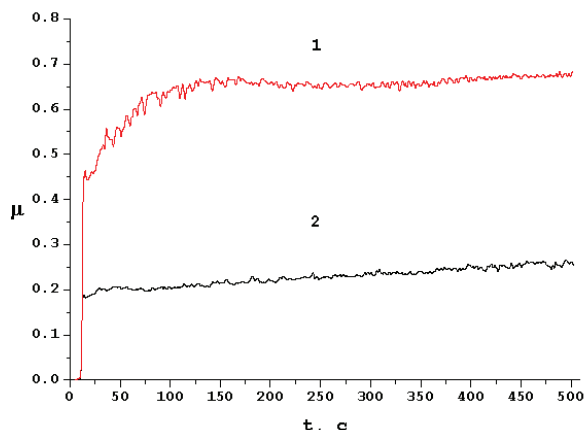


Рисунок 2 – Коэффициент трения в зависимости от времени испытаний образцов нержавеющей стали 12X18H9T с покрытиями из модифицированного нитрида титана: 1 – покрытие до оптимизации; 2 – покрытие, нанесенное в оптимизированных режимах

Figure 2 – Friction coefficient vs testing time for stainless steel 12X18H9T samples coated by modified titanium nitride: 1 – coating before optimization; 2 – coating deposited in optimized conditions

Типичные пятна контакта, возникающие в результате измерений коэффициента трения при дистанции скольжения $D = 100$ м, представлены на рисунке 3. Количественные характеристики стойкости материала к износу далее могут быть получены расчетным путем. В качестве критерия износостойкости можно использовать длину трека L , глубину лунки h , ее объем V и удельные значения, рассчитанные на единицу дистанции скольжения трибопары либо на единицу мощности.

Пренебрегая деформацией образца под давлением диска с радиусом R , можно записать уравнение связи:

$$h = R - (R^2 - L^2/4)^{1/2}.$$

Таким образом, при экспрессных испытаниях можно избежать процедуры профилометрирования трека и оперировать значением линейного износа h . В используемой геометрии несложно также получить выражение для площади максимального сечения трека износа:

$$S = R^2 \arcsin(L/2R) - L(R - h)/2.$$

И, наконец, из рисунка 3а видно, что с высокой степенью точности центральная часть трека шириной W (на уровне 100 мкм) может быть аппроксимирована цилиндром с объемом $V = SW$ и

несет информацию об объемном износе слоя. В данном случае переход к объемной модели расчета позволяет сравнивать результаты экспериментов методики «диск на плоскости» [10] с данными, полученными методами [8] и [9].

Пример расчетных значений для геометрических параметров рисунка 3 представлен в таблице. Значения работы сил трения для треков a и b , полученные путем интегрирования соответствующих трибограмм, по характеру близких к представленным на рисунке 2, составляли 14,2 Дж и 4,0 Дж соответственно. Износостойкость рассчитывается как значение, обратное интенсивности изнашивания.

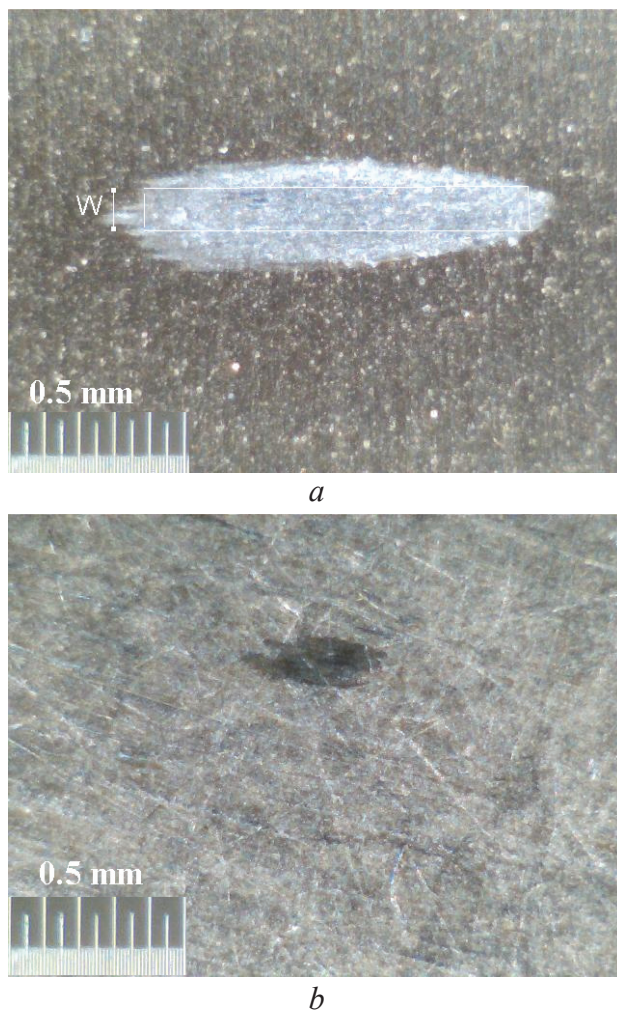


Рисунок 3 – Микрофотографии треков износа, полученных в тождественных условиях испытаний, дистанция скольжения 100 м: a – образца нержавеющей стали 12X18H9T; b – сталь 316L (03X17H14M3) с термообработкой

Figure 3 – Pictures of wear tracks obtained in same experimental conditions, sliding distance 100 meters: a – stainless steel 12X18H9T sample; b – 316L (03X17H14M3) steel after heat treatment

Таблица / Table

Экспериментальные и расчетные значения трибологических параметров
Measured and calculated tribological parameters

Марка сплава Alloy	12X18H9T	03X17H14M3
Длина трека, мкм Track length, μm	1200	290
Расчетная глубина трека, мкм Calculated track depth, μm	12,86	0,76
Интенсивность изнашивания, мкм/м Wear intensity, $\mu\text{m}/\text{m}$	0,129	0,0076
Интенсивность изнашивания, мкм/Дж Wear intensity, $\mu\text{m}/\text{J}$	0,91	0,19
Износостойкость, м/мкм Wear resistance, $\text{m}/\mu\text{m}$	7,75	131,6

Заклучение

Разработано устройство для исследования коэффициента трения антифрикционных и упрочненных слоев. Создан макет устройства. Создан компьютеризированный программно-аппаратный комплекс для регистрации параметров процесса трения, разработано программное обеспечение для регистрации, обработки и хранения результатов эксперимента. Устройство отличается простой формой образца, широким диапазоном и высокой точностью контроля нагрузки и силы трения, высокой эффективностью при исследовании покрытий и модифицированных слоев.

Работоспособность комплекса подтверждена при исследовании модифицированных слоев и покрытий микронной толщины. Установлено, что коэффициент трения и износостойкость конструкционных материалов, тонких микрокристаллических упрочняющих покрытий и наноструктурированных слоев эффективно контролируется методом исследований процессов трения в паре «диск – плоскость».

Список использованных источников

1. *Kenzari, S.* Complex metallic alloys as new materials for additive manufacturing / S. Kenzari, D. Bonina, J.M. Dubois, V. Fournée // *Sci. Technol. Adv. Mater.* – 2014. – Vol. 15. – P. 1–9.
2. *Totten, G.E.* Surface modification and mechanisms: friction, stress and reaction engineering / G.E. Totten, H. Liang. – Marcel Dekker Inc. New York – Basel, 2004. – 940 p. ISBN 0-203-02154-10-203-02154-1 Master e-book ISBN.
3. *Voyevodin, A.A.* Recent Advances in Hard, Tough, and Low Friction Nanocomposite Coatings / A.A. Voyevo-

din, J.S. Zabinski, C. Muratore // *Tsinghua Science & Technology.* – 2005. – Vol. 10, no. 6. – P. 665–679.

4. *Rylyakin, E.G.* Research of Hydrounits Details Wear Resistance / E.G. Rylyakin, V.I. Kostina // *Contemporary Engineering Sciences.* – 2015. – Vol. 8, no.11. – P. 477–480 (in English).

5. *Vekatesh, B.* Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art / B. Vekatesh, K. Sriker, V.S.V. Prabhakar // *Procedia Materials Science.* – 2015. – Vol. 10. – P. 527–535.

6. *Cavaleito, A.* Nanostructured Coatings / A. Cavaleito, J.T. De Hossou. – Berlin, Springer-Verlag, 2006.

7. *Komarov, F.F.* Influence of conditions employed in application of Ti–Zr–Si–N nanostructured coatings on their composition, structure, and tribomechanical properties / F.F. Komarov, V.V. Pilko, I.M. Klimovich // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* – 2015. – Vol. 88, no. 2. – P. 358–363.

8. *Sel'kin, V.P.* Friction machine for testing materials under boundary lubrication / V.P. Sel'kin, S.V. Kopylov // *Journal of Friction and Wear.* – 2016. – Vol. 37, no. 2. – P. 184–186.

9. *Grigor'ev, A.Ya.* Reciprocating MTU–2KZ millitribometer / A.Ya. Grigor'ev [et al.] // *Journal of Friction and Wear.* – 2014. – Vol. 35, no. 6, – P. 455–459.

10. *Komarov, F.F.* Effect of He⁺ ion irradiation on structure and wear resistance of TiAlN coatings deposited by magnetron sputtering / F.F. Komarov, S.V. Konstantinov, V.V. Pilko, V.A. Kukareko // *Proceedings of 8 international conference Plasma Physics and Plasma Technology, 14–18 September.* – Minsk, 2015. – P. 297–300.

References

1. *Kenzari S., Bonina D., Dubois J.M., Fournée V.* Complex metallic alloys as new materials for additive manufacturing. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2014, vol. 15, pp. 1–9. doi: 10.1088/1468-6996/15/2/024802
2. *Totten G.E., Liang H.* Surface modification and mechanisms: friction, stress and reaction engineering. Marcel Dekker Inc. New York–Basel, 2004, 940 p.
3. *Voyevodin A.A., Zabinski J.S., Muratore C.* Recent Advances in Hard, Tough, and Low Friction Nanocomposite Coatings. *Tsinghua Science & Technology*, 2005, vol. 10, no. 6, pp. 665–679. doi: 10.1016/S1007-0214(05)70135-8
4. *Rylyakin E.G., Kostina V.I.* Research of Hydrounits Details Wear Resistance. *Contemporary Engineering Sciences*, 2015, vol. 8, no. 11, pp. 477–480. doi: org/10.12988/ces.2015.5257 (in English)
5. *Vekatesh B., Sriker K., Prabhakar V.S.V.* Wear Characteristics of Hardfacing Alloys: State-of-the-art. *Procedia Materials Science*, 2015, vol. 10, pp. 527–535. doi: 10.1016/j.mspro.2015.06.002
6. *Cavaleito A., De Hossou J.T.* Nanostructured Coatings. Berlin, Springer-Verlag, 2006. doi: 10.1007/978-0-387-48756-4

7. Komarov F.F., Pilko V.V., Klimovich I.M. Influence of conditions employed in application of Ti–Zr–Si–N nanostructured coatings on their composition, structure, and tribomechanical properties. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 2, pp. 358–363.
doi: 10.1007/s10891-015-1200-z
8. Sel'kin V.P., Kopylov S.V. Friction machine for testing materials under boundary lubrication. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 184–186.
doi: 10.3103/S1068366616020136
9. Grigor'ev. A Ya., Gutsev D.M., Zozulya A.P., Kovaliova I.N., Kudritskii V.G., Myshkin N.K., Semenyuk M.S. Reciprocating MTU–2KZ millitribometer. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 6, pp. 455–459.
doi: 10.3103/S1068366614060063
10. Komarov F.F., Konstantinov S.V., Pilko V.V., Kukareko V.A. Effect of He⁺ ion irradiation on structure and wear resistance of TiAlN coatings deposited by magnetron sputtering. *Proceedings of 8 international conference Plasma Physics and Plasma Technology*, 14–18 September, Minsk, 2015, pp. 297–300.