

**МОДЕЛИ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КОНТАКТИРОВАНИИ В УСЛОВИЯХ  
МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

*Рассмотрен износ деталей трибосопряжений в условиях многокомпонентного динамического нагружения. Представлена модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении с учетом наличия фрагментов различной величины и прочности, а также модели разрушения поверхности при трении с однокомпонентным, двухкомпонентным и трехкомпонентным динамическим нагружением. Показана возможность управления износостойкостью контактирующих деталей варьированием условиями контакта.*

Ключевые слова: изнашивание; фрагменты; многокомпонентное нагружение; трение; поверхностный слой.

**Вступление**

Большая часть изнашивающихся деталей машин и механизмов в процессе эксплуатации находятся в условиях многокомпонентного нагружения в связи с функциональными взаимными перемещениями в различных направлениях, наличием вибраций или их комбинациями. Степень повреждаемости и характер изношенных поверхностей сплавов при таких видах нагружения свидетельствует о своеобразии процессов, протекающих в зоне контакта.

Как известно, в результате диссипативных процессов при трении, работа внешних сил сопровождается поглощением энергии поверхностным слоем материала и образованием теплоты. Поэтому в современной трибологии все шире рассматриваются процессы самоорганизации материала в поверхностных слоях при трении на основе синергетических принципов. В соответствии с этими принципами в результате контактного взаимодействия формируются особые диссипативные структуры, способные преобразовывать внешнюю механическую энергию во внутреннюю энергию деформационных процессов, что сопровождается уменьшением вероятности разрушения и дает возможность повысить износостойкость трибосопряжений. При этом упругопластическая деформация поверхностных слоев металла зависит от условий контакта в трибосопряжении. Именно условия контактного взаимодействия при трении приводят к различному деформированию поверхностного слоя металла и формированию его структурного состояния с определенной свободной энергией, физической и химической активностью.

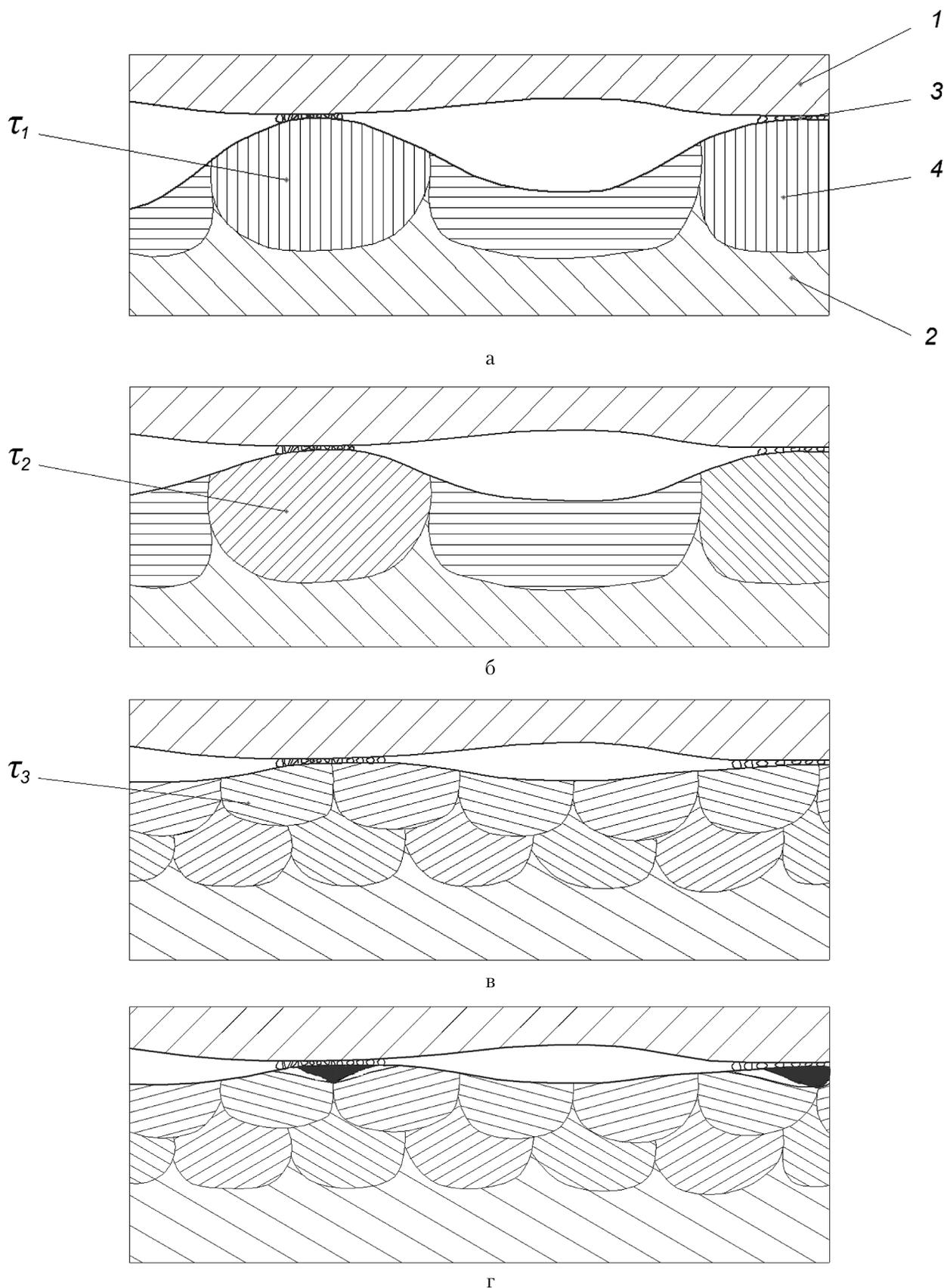
Локализованная вблизи поверхности трения интенсивная пластическая деформация, фрикционный нагрев, воздействие окружающей среды обуславливают образование в зоне контакта специфических, весьма неоднородных по глубине активного слоя структур. Обнаружено наличие фрагментов ультрадисперсных наноструктур [1, 2].

Целью работы является установление механизмов формирования структурного состояния и изнашивания поверхностного слоя контактирующих поверхностей в условиях многокомпонентного термомеханического нагружения.

**Основная часть**

На основании комплексного анализа кинетики структурных изменений и изнашивания поверхностного слоя контактирующих поверхностей при трении, полученных в результате предварительно проведенных исследований [3–5], установлено существование четырех основных стадий развития повреждений поверхности: разрушение оксидных пленок; снижение прочности фрагментов; уменьшение размеров фрагментов; усталостное разрушение. Соответствующая модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении представлена на рисунке 1.

На первой стадии контактирования наблюдаются явления аналогичные первой стадии фреттинг-коррозии и сопровождаются схватыванием ювенильного металла после разрушения естественных оксидных пленок. Разрушающиеся вследствие усталости выступы и срезавшиеся узлы схватывания создают первичные продукты разрушения [6]. При



**Рис. 1.** Модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении в условиях многокомпонентного динамического нагружения: а) разрушение оксидных пленок; б) снижение прочности фрагментов; в) уменьшение размеров фрагментов; г) усталостное разрушение; 1 – сопряженная поверхность; 2 – основной слой; 3 – окислы; 4 – фрагменты поверхностного слоя ( $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  – прочность фрагмента)

этом необходимо учитывать связь выступов фактического контакта со структурным состоянием поверхностного слоя и возникновением равновесной шероховатости, связанной с неравномерной выработкой фрагментов, образованием микроступенек, их разориентировкой [7]. Модель поверхностного слоя представляется в виде случайно расположенных фрагментов (кристаллитов), обладающих определенным уровнем прочности отличающихся направлением плоскостей скольжения условно показанных различным направлением штриховки участков. Соответственно фрагмент максимальной прочности обозначен через  $\tau_1$  (рис. 1, а).

На второй стадии контактирования происходит снижение прочности фрагментов поверхностного слоя под действием циклических контактных напряжений за счет изменения направлений плоскостей скольжения. При этом происходит уменьшение прочности фрагментов ( $\tau_2 < \tau_1$ ), что приводит к некоторому повышению скорости изнашивания и сопровождается снижением равновесной шероховатости, увеличением площади контактирования (рис. 1, б). Однако, скорость износа на этой стадии невелика вследствие наличия крупных фрагментов поверхностного слоя.

Третья стадия контактирования связана с диспергированием фрагментов поверхностного слоя и, соответственно, снижением их прочности ( $\tau_3 < \tau_2 < \tau_1$ ), что сопровождается повышением скорости изнашивания, еще большим снижением равновесной шероховатости и увеличением площади контактирования (рис. 1, в). На этой стадии заканчивается структурная адаптация поверхностного слоя к условиям контактирования и происходит переход к стадии усталостного разрушения (рис. 1, г), которая характеризуется образованием частиц износа вследствие межфрагментного разрушения.

Представленная модель предполагает наличие трех видов разрушения: в большей степени окислительного на первой стадии контактирования, фрагментного – на второй и третьей стадиях и межфрагментного на четвертой стадии. Образующиеся при этом продукты изнашивания имеют различную величину, но, как следует из модели разрушения, величина износа определяется не размерами частиц разрушаемого металла, а интенсивностью их удаления, обусловленной структурным состоянием поверхностного слоя. Следовательно, повышенный износ может сопровождаться снижением равновесной шероховатости контактируемых поверхностей.

Можно предположить, что возвратно-поступательные движения в взаимно перпендикулярных направлениях приводит к формированию в поверхностном слое ячеистой структуры с не столь вытянутыми ячейками, а при равной амплитуде и частоте колебаний – к отсутствию вытяжки фрагментов.

Это приводит к повышению интенсивности изнашивания.

Интенсификация ударной нагрузки при трении повышает многоцикловую усталость в результате пластической деформации и ускоряет отделение частиц. Наблюдаемое при испытаниях увеличение износа при многокомпонентном нагружении с наличием ударной нагрузки является, видимо, результатом комплексного воздействия удара на состояние поверхностного слоя. Во-первых ударная нагрузка приводит к увеличению дислокаций в поверхностном слое, а во-вторых приводит к возникновению пульсирующей, циклически изменяющейся силы трения в процессе скольжения при сложном нагружении.

Установленные основные закономерности трения и изнашивания при различных условиях многокомпонентного динамического нагружения показывают, что наличие поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением (удар и проскальзывание во взаимно перпендикулярных направлениях) повышает интенсивность изнашивания материалов в сравнении с износом при двухкомпонентном нагружении (удар и продольное проскальзывание) до 2,5 раз за счет изменения прочности и величины фрагментов поверхностного слоя [4].

Таким образом, сложное трехкомпонентное нагружение, создает условия для формирования фрагментов поверхностного слоя с относительно легким прохождением дислокаций через данные кристаллиты к их границам. Это способствует снижению уровня внешних напряжений, необходимых для действия механизма ротационной пластичности в анализируемых структурах. В результате образуется поверхностный слой с более равномерной текстурой, что сопровождается повышенным износом. Изменение характера нагружения приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопрежения.

Повышенный износ происходит у деталей с однородным по величине фрагментов равнопрочным поверхностным слоем. Увеличение поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением способствует образованию подобного поверхностного слоя, снижению его прочности, получению более равномерной микрогеометрии поверхности, которая сопровождается снижением величины и разброса работы выхода электрона по поверхности. Степень этих изменений существенно зависит от химико-физических свойств материалов и условий трения [4].

Соответствующая модель структурной организации и разрушения поверхностного слоя при трении в условиях многокомпонентного динамического нагружения представлена на рисунке 2.

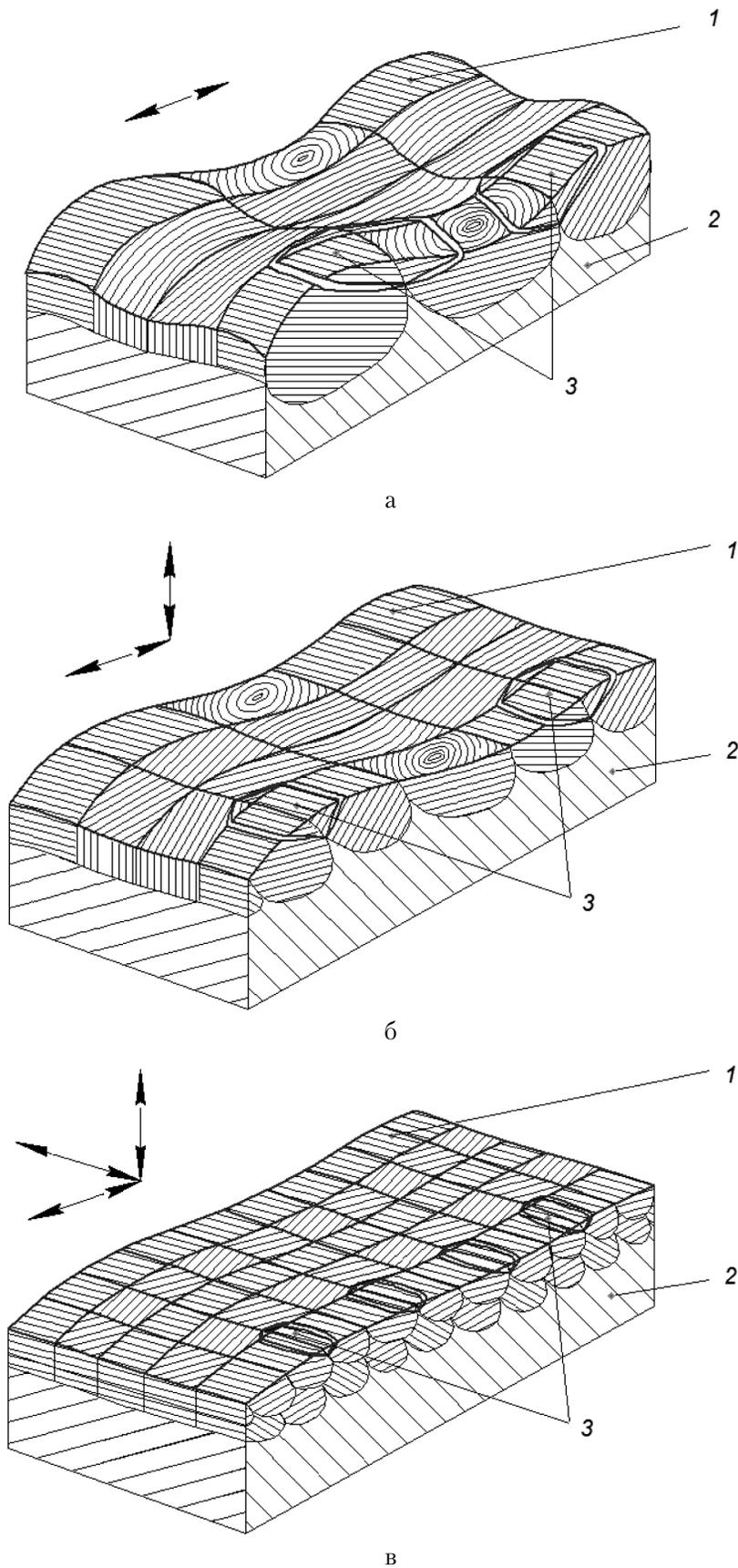


Рис. 2. Модель разрушения поверхности при трении с многокомпонентным динамическим нагружением:  
 а) однокомпонентное; б) двухкомпонентное; в) трехкомпонентное;  
 1 – фрагменты поверхностного слоя; 2 – основной слой; 3 – частицы износа

Реверсное скольжение (однокомпонентное динамическое нагружение) приводит к вытягиванию фрагментов. Учитывая формирование при этом сравнительно больших по величине фрагментов получаемые частицы износа крупные. Для их отделения требуется повышенная энергия, что сопровождается незначительной скоростью износа (рис. 2, а). Получаемая равновесная шероховатость значительна, особенно в поперечном направлении, и характеризуется наличием продольных царапин.

Добавление к реверсному скольжению ударного нагружения (двухкомпонентное нагружение) приводит к уменьшению величины фрагментов и их прочности, повышению равнопрочности поверхностного слоя, что способствует уменьшению частиц износа и снижению равновесной шероховатости (рис. 2, б). Скорость износа при этом возрастает.

Трехкомпонентное нагружение характеризуется диспергированием фрагментов поверхностного слоя, высокой равнопрочностью и однородностью (рис. 2, в). Измельчение фрагментации поверхностного слоя и снижение их прочности облегчает отделение частиц износа. Мелкие частицы износа, образующиеся в большом количестве, приводят к высокой скорости износа. При этом формируется низкая равновесная шероховатость, как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Учет особенностей структурной организации и разрушения поверхностного слоя в процессе трения необходим для детализации конкретных механизмов обеспечения повышенной износостойкости. Однако разработка соответствующих методик должна производиться с учетом условий эксплуатации трибоузлов, влияющих на нестабильные синергетические процессы.

### Выводы

Таким образом, представлены модели процесса контактного взаимодействия как целостной картины динамической системы трения с учетом динамики структурного состояния поверхностных слоев, микрогеометрии поверхности, деструкционных явлений и условий нагружения. Предложена концепция износостойкости трибосистем и триботехнический принцип минимизации изнашивания материалов на основе использования явления структурно-энергетической адаптации материалов при трении с разными видами нагружения, которая заключается в создании таких условий контактирования, когда формируется поверхностный слой с неоднородным по прочности и величине фрагментов структурным состоянием.

### Литература

- [1] Heilmann I. Orientation determination of subsurface cells generated by sliding /I. Heilmann, W. A. Clark, D. A. Rigney // Acta Metallurgica.– 1983.– V. 31, N 8.– P. 1293–1305.
- [2] Запорожец В. В. Взаимосвязь силы трения и свойства вторичных структур /В. В. Запорожец, В. В. Варюхно //Трение и износ.– 1983.– Т. 4, № 1.– С. 59–67.
- [3] Івченко Л. Й. Зв'язок структурного стану поверхнього шару та зносостійкості деталей трибоз'єднань при тримірному навантаженні /Л. Й. Івченко, В. В. Цыганов //«Вісник двигунобудування». – 2008.– № 2.– С. 57–62.
- [4] Івченко Л. І. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения /Л. І. Івченко, В. В. Цыганов, І. М. Закиев //Трение и износ.– 2011.– Т. № 32, № 1.– С. 500–509.
- [5] Івченко Л. І. Структурная самоорганизация деталей трибосопряжений в условиях сложного термодинамического нагружения /Л. І. Івченко, В. В. Цыганов, М. В. Фролов //Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки».– 2012.– № 3(59).– С. 5–11.
- [6] Голего Н. Л. Фреттинг-коррозия /Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля.– Киев: Техніка, 1974.– 270 с.
- [7] Цыганов В. В. Трибодиагностика качества поверхности нержавеющей сталей при отделочной абразивной обработке: дис. канд. техн. наук./ В. В. Цыганов.– Киев, 1989.– 152 с.

Tsyganov V. V., Ivschenko L. J.

Zaporozhye National Technical University. Ukraine, Zaporozhia

**MODELS OF STRUCTURAL ORGANIZATION AND DESTRUCTION  
OF SUPERFICIAL LAYER OF DETAILS AT CONTACT IN THE CONDITIONS  
OF MULTICOMPONENT DYNAMIC LADENING**

*The wear of details of tribojoints is considered in the conditions of multicomponent dynamic loading. The model of structural organization and destruction of superficial layer is presented at a friction taking into account the presence of fragments of different size and durability, and also model of destruction of surface at a friction with an onecomponent, double-base and three-component dynamic loading. Management possibility is shown wearproofness of contacting details varying the terms of contact.*

*Keywords:* wear; fragments; multicomponent loading; friction; superficial layer.

**References**

- [1] Heilmann I. Orientation determination of subsurface cells generated by sliding /I. Heilmann, W. A. Clark, D. A. Rigney // Acta Metallurgica.– 1983.– V. 31, N 8.– P. 1293–1305.
- [2] Zaporozhith V. V. Intercommunication of force of friction and property of secondary structures /V. V. Zaporozhith, V. V. Varyhno //Friction and wear.– 1983.– T. 4, № 1.– P. 59–67.
- [3] Ivschenko L. J. Connection of of the structural state of superficial layer and wearproofness of details of tribojoints at the three-dimensional loading /L. J. Ivschenko, V. V. Tsyganov //«Announcer of construction of engines».– 2008.– № 2.– P. 57–62.
- [4] Ivschenko L. J. Features of wear tribojoints in terms of three-dimensional loading / L. J. Ivschenko, V. V. Tsyganov, I. M. Zakiev //Friction and wear.– 2011.– T. № 32, № 1.– P. 500–509.
- [5] Ivschenko L. J. Structural independent organization details of in terms of difficult thermodynamics loading / L. J. Ivschenko, V. V. Tsyganov, M. V. Frolov //Announcer ChDTU. Series are «Engineering sciences».– 2012.– № 3(59) – P. 5–11.
- [6] Golego N. L. Fretage-corrosion / N. L. Golego, A. Ya. Alyzhev, V. V. Shevelya.– Kyiv: Tachnika, 1974.– 270 p.
- [7] Tsyganov V. V. Diagnostics by the friction internalss of surface non-rusting of steels at to finishing abrasive treatment: diss. of cand. of techn. sciences. / V. V. Tsyganov.– Kyiv, 1989.– 152 p.