

## РОЗДІЛ I. МЕХАНІКА

УДК 621.891:669.018.44

**Л.И. Ивченко**, д-р техн. наук

**В.В. Цыганов**, канд. техн. наук

**М.В. Фролов**, канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина

### СТРУКТУРНАЯ САМООРГАНИЗАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

*Рассмотрена износостойкость сплавов ВТ20, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХТН-61 при трении в условиях сложного динамического нагружения и отрицательных температур. Показано совместное действие динамических и температурных нагрузочных факторов на изменение структурного состояния поверхностного слоя с оказанием существенного влияния на изнашивание деталей. Отмечено образование дисперсных структур повышенной износостойкости при определенном термодинамическом воздействии с учетом особенностей физико-химических свойств материалов трибосопряжения.*

**Ключевые слова:** изнашивание, образец, трехмерное нагружение, трение, поверхностный слой.

*Розглянута зносостійкість сплавів ВТ20, ХН77тюр (ЕІ437Б), ХТН-61 під час тертя в умовах складного динамічного навантаження і негативних температур. Показана спільна дія динамічних і температурних факторів навантажень на зміну структурного стану поверхневого шару з наданням суттєвого впливу на зношування деталей. Відмічено утворення дисперсних структур підвищеної зносостійкості при певній термодинамічній дії з урахуванням особливостей фізико-хімічних властивостей матеріалів трибоз'єднань.*

**Ключові слова:** зношування, зразок, тривимірне навантаження, тертя, поверхневий шар.

*The wearproofness of alloys of ВТ20, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХТН- 61 is considered at a friction in the conditions of difficult dynamic lading and negative temperatures. The united action of dynamic and temperature loadings factors is rotined on the change of the structural state of superficial layer with providing of substantial influence on the wear of details. Formation of dispersible structures of enhanceable wearproofness is marked at certain thermodynamics influence taking into account the features of physical and chemical properties of materials of tribojoints.*

**Key words:** wear, sample, three-dimensional loading, friction, surface layer.

**Постановка задачі.** В результаті діяння динамічних навантажень на деталі і узли машин і механізмів происходит відносне переміщення контактуючих поверхностей, которое приводит к изменению их структурного состояния поверхностного слоя и различной износостойкости. Исследование структурного состояния поверхностных слоев при трении позволяет изучать как общие закономерности изменения и разрушения при фрикционном воздействии, так и специфические процессы, связанные с особенностями материалов и условий их работы. В каждом конкретном случае такие исследования дают возможность наметить пути оптимизации исходной структуры материалов, стабилизации или улучшения их триботехнических свойств. Исследования структурных изменений при трении приобретают большое значение и в связи с развитием инженерных методик оценки износа в зависимости от внешних факторов и характеристик трущихся тел [1]. Их анализ позволяет определить механизм изнашивания, получить данные, необходимые для расчета, оценить степень изменения свойств поверхностных слоев при трении по сравнению с объемными свойствами материалов.

Таким образом, актуальной задачей динамического разрушения является исследование синергетических эффектов, обуславливающих форсированное разрушение. Однако отмеченная в работах различных авторов значительная структурная перестройка поверхностных слоев материалов трибосопряжений трудно сопоставима и не позволяет детализировать конкретные механизмы обеспечения повышенной износостойкости. Вызвано это, прежде всего, условиями проведения исследований, которые часто не соответствуют реальным условиям эксплуатации трибоузлов, что влияет на нестойкие синергетические процессы. Многие трибосопряжения работают в условиях сложного динамического нагружения, связанного с вибрациями, действующими в разных направлениях, а также с влиянием различных температур окружающей среды. Без учета все-

го комплекса факторов нагружения происходит искажение результатов исследования и создание картины процесса изнашивания мало отвечающей реальной.

В частности, влияние отрицательных температур на износостойкость трибосопряжений неоднозначно. Это является, в основном, результатом того, что не наблюдается общих закономерностей увеличения циклической прочности материалов при снижении температуры. Для одних металлов такое повышение может происходить во всем диапазоне низких температур, а для других – рост сопротивления усталостному разрушению ограничивается определенными температурными интервалами, вне которых циклическая прочность остается постоянной или имеет тенденцию к уменьшению [2]. Такое различие в изменении свойств может наблюдаться у материалов одного класса, поэтому при изучении усталости в низкотемпературных условиях рекомендуется проводить испытания каждого исследуемого материала [3].

Результаты предварительно проведенных исследований при нормальной температуре показали, что величина износа по контактной поверхности при трении зависит от характера динамической нагрузки. Сложный характер нагружения приводит к такому напряженному состоянию поверхностных слоев материала, которое инициирует повышенный износ. Как правило, повышенный износ происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем [4]. Изменение характера нагружения при трении приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения. При этом сформированная в процессе трения дисперсная структура выполняет функцию диссипативной структуры в рамках синергетического подхода, которая самоорганизуется в условиях сложного динамического контактирования с получением оптимального по износостойкости состояния.

Однако величина корреляции между износостойкостью и однородностью поверхностного слоя существенно отличается и зависит не только от динамики нагружения, но и от физико-химических свойств материала, что указывает на сложность управления синергетическими процессами. Чем более износостойким в указанных условиях испытаний является материал, тем в большей степени происходит структурная самоорганизация и менее сказывается сложность динамического нагружения в контакте трибосопряжения на его износостойкость [4]. Причем для титанового сплава ВТ20 не отмечена существенная корреляция между износостойкостью и однородностью поверхностного слоя, что указывает на другой механизм изнашивания данного сплава.

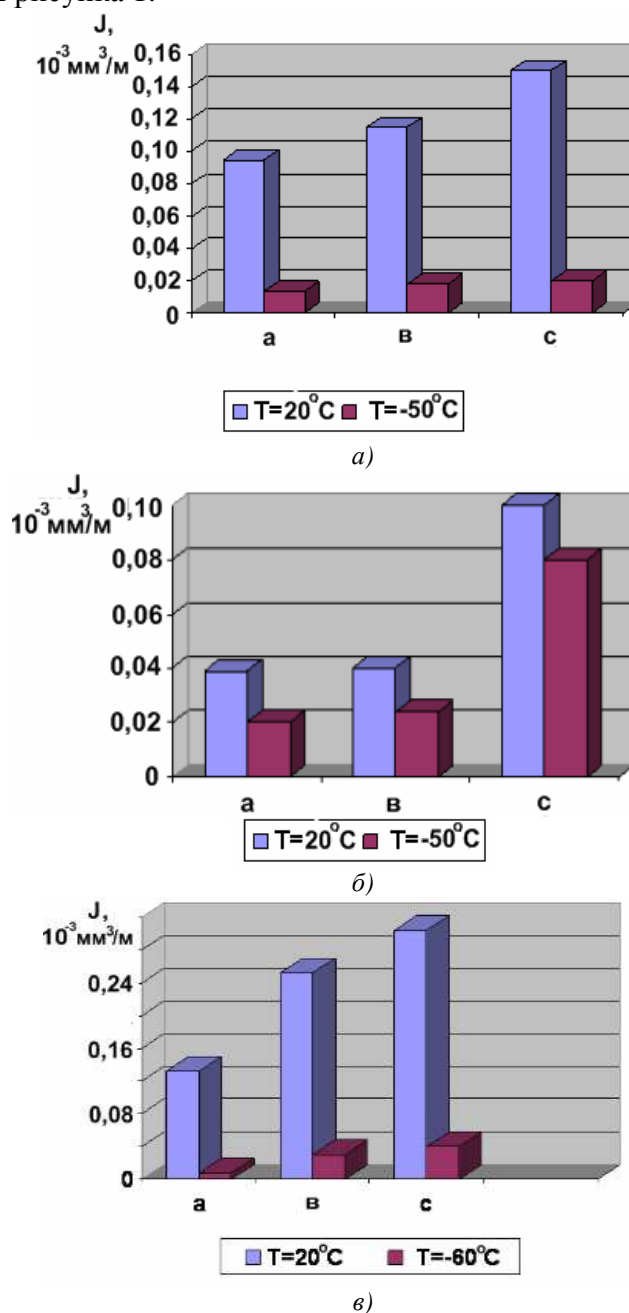
Учитывая, что многие трибосопряжения, в частности, авиационные ГТД, эксплуатируются в условиях низких климатических температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), представляют интерес процессы изнашивания различных материалов при условиях, включающих наложение отрицательных температур и различных видов динамического нагружения, в том числе присутствия ударной нагрузки.

**Методика исследований.** Для возможности оценки изменения величины износа и раскрытия механизма формирования поверхностного слоя деталей трибосопряжений, которые эксплуатируются при сложном термомеханическом нагружении, разработаны соответствующие методики и оригинальные установки [5]. При этом имеется возможность получать и изучать функциональные зависимости фрикционно-износных характеристик материалов пары, осуществлять сравнительную оценку фрикционных пар, производить физическое моделирование процессов в реальных трибосопряжениях. В результате, используя современные методы исследования [6], можно определить связь износостойкости поверхностей трения при конкретных термодинамических режимах и структурного состояния поверхностного слоя.

В данной работе представлены результаты исследований износостойкости образцов из сплавов ВТ20, ХН77ТЮР (ЭИ437Б), ХТН-61 в условиях трения с однонаправленным

возвратно-поступательным скольжением (одномерное нагружение), ударе с проскальзыванием (двумерное нагружение), ударе с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях (трехмерное нагружение) при нормальных условиях и с охлаждением до температур  $-60^{\circ}\text{C}$ . Нормальная удельная ударная нагрузка составляла от 0 до  $0,6 \text{ Н/мм}^2$ , взаимное перемещение образцов в продольном направлении происходило с амплитудой  $0,17 \text{ мм}$  и частотой  $66 \text{ Гц}$ , в поперечном направлении –  $0,05 \text{ мм}$  и частотой  $33 \text{ Гц}$ , время испытаний – до 4 часов. Отрицательная температура при испытаниях достигалась за счет нагнетания паров жидкого азота в камеру узла задания температуры.

**Результаты и их обсуждение.** Влияние отрицательной температуры на износостойкость рассмотренных материалов при различных видах нагружения наглядно представлено на диаграммах рисунка 1.



а – одномерное; б – двумерное; в – трехмерное  
 Рис. 1. Диаграммы изменения интенсивности изнашивания сплавов: а) Zr437B; б) XTH-61; в) VT20 при различных видах нагружения

Как следует из представленных результатов, износостойкость исследуемых материалов при рассматриваемых условиях трения и отрицательных температурах выше, чем при положительных температурах независимо от вида нагружения. Усложнение характера нагружения образцов при трении приводит к увеличению износа как при положительных, так и при отрицательных температурах. В частности сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,05 мм (трехмерное нагружение) приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания сплава ЭИ437Б в 1,3 раза при положительной и отрицательной температуре по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двумерном нагружении. Для сплавов ХТН-61 и ВТ20 эти изменения составляют соответственно в 2,5 раза и в 1,2 раза при положительной температуре, в 3,2 раза и в 1,3 раза – при отрицательной температуре.

При этом физико-химические свойства контактирующего материала определяют величину изменения интенсивности изнашивания. Чем более износостойким является материал, тем в меньшей степени влияет отрицательная температура на изменение интенсивности изнашивания. Так, для сплава ВТ20 (рис. 1, в) трение в условиях одномерного нагружения при отрицательной температуре ( $-60^{\circ}\text{C}$ ) в сравнении с трением при  $T = 20^{\circ}\text{C}$  характеризуется снижением объемной интенсивности изнашивания в 16 раз, двумерного и трехмерного нагружения – соответственно в 8,5 и 7,6 раза. Сплавы ЭИ437Б и ХТН-61 более износостойкие в рассматриваемых условиях трения независимо от вида нагружения (рис. 1, а, б). Снижение объемной интенсивности изнашивания этих сплавов при отрицательных температурах ( $-50^{\circ}\text{C}$ ) происходит соответственно при одномерном нагружении в 6,3 и 1,95 раза, при двумерном нагружении – в 6,3 и 1,6 раза и при трехмерном нагружении – в 7,5 и 1,25 раза.

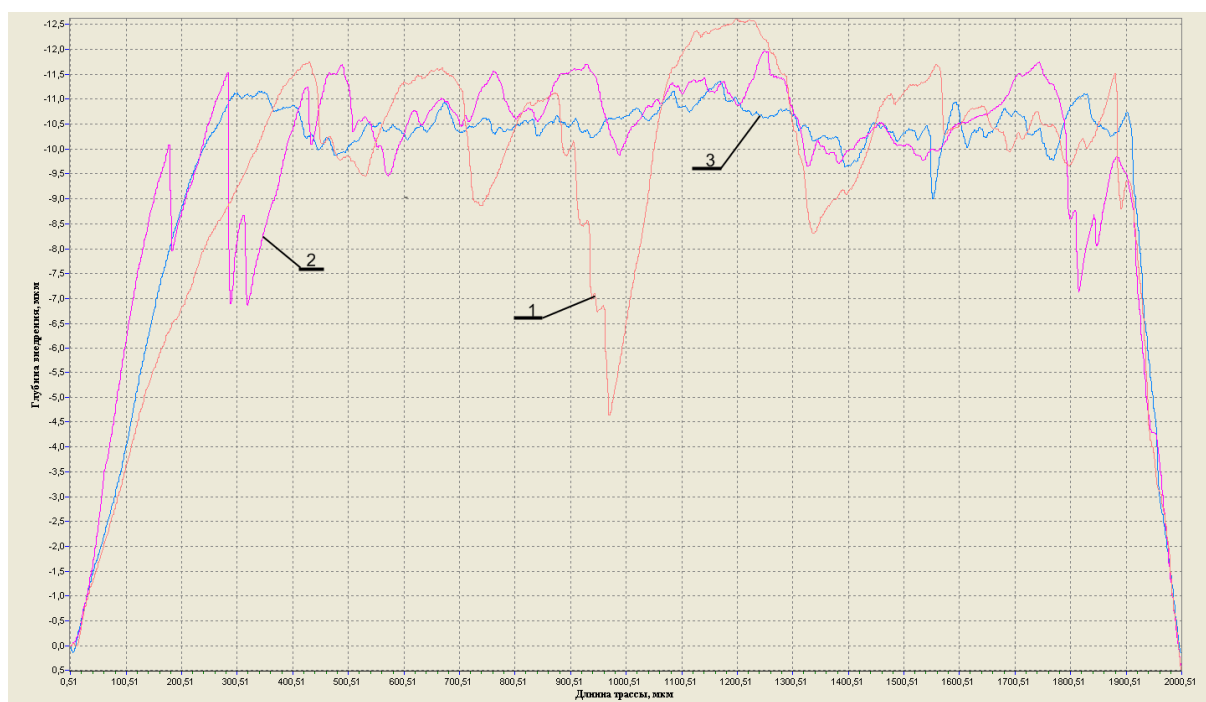
Неравномерность влияния вида динамического контактного нагружения на изменение интенсивности изнашивания исследуемых материалов при отрицательных температурах указывает на сложный характер их взаимосвязи. Для рассмотрения физико-механических процессов при низкотемпературном трении необходима оценка и анализ модификации состояния поверхностного слоя. Как указывают авторы [7; 8], характер закономерностей и количественная величина интенсивности изнашивания полностью определяются механическими свойствами материала, зависящими от его структуры, и степенью влияния на эти свойства низких температур.

Физико-механические свойства поверхностного слоя образцов определяли методом сканирования индентором на специальном приборе "Микрон-гамма". Метод сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности (тангенциальная составляющая силы трения индентора) с заданной нагрузкой. Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактному деформированию позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, позволяет оценивать среднюю прочность на трассе сканирования, оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств, моделировать элементарные акты процессов трения и износа [9].

Оценку состояния поверхностного слоя образцов на приборе "Микрон-гамма" осуществляли в работе с использованием программы для управления, сбора и обработки информации методом сканирования по методике НАУ, представленной в работе [9]. Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор – 0,1 Н; скорость сканирования – 40 мкм/с.

Полученные результаты состояния поверхностного слоя образцов после трения с различными условиями динамического нагружения при отрицательных температурах согласуются с экспериментами по оценке соотношения механических свойств, параметров структуры и износостойкости при нормальных условиях. Наиболее наглядно это можно увидеть по изменению показателей поверхностного слоя образцов из сплава ХТН-61. Как

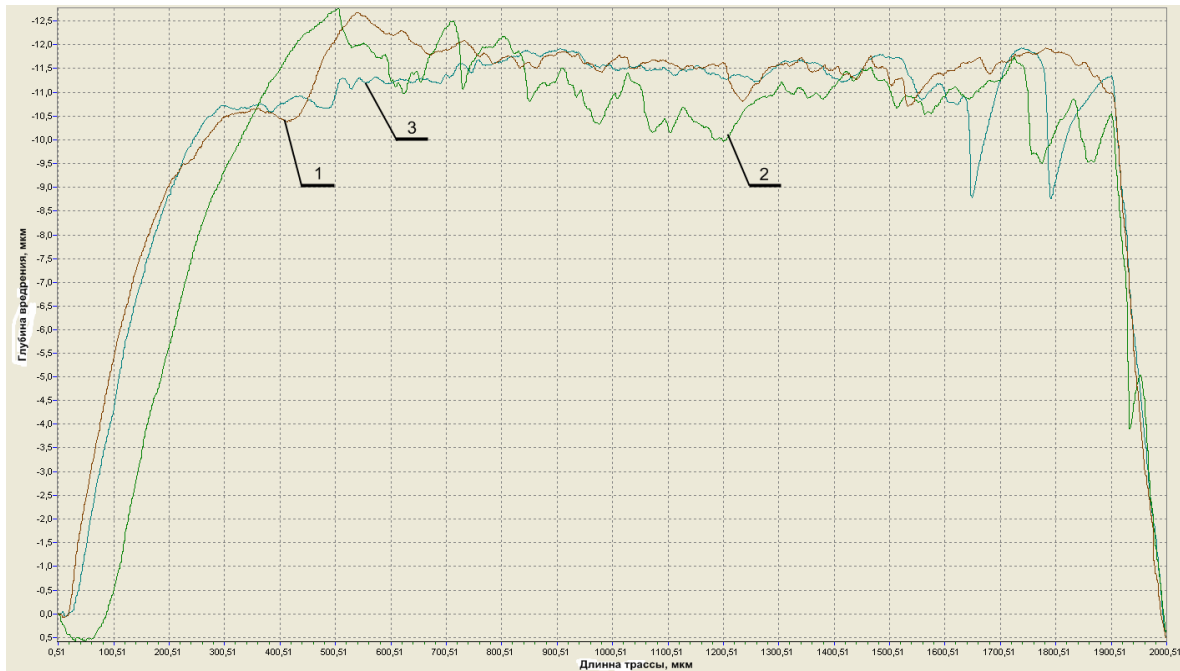
следует из анализа трибограмм силы трения, полученных при сканировании образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения, представленных на рисунке 2, повышение сложности нагружения в трибосопряжении сопровождается уменьшением разброса силы трения при сканировании соответствующих образцов и, как следствие, повышением износа. Наименьший износ наблюдается при одномерном нагружении с образованием наиболее неравномерного поверхностного слоя (трибограмма 1). Трехмерное нагружение, которое сопровождается наибольшей величиной износа, приводит к выравниванию прочностных и деформационных свойств, повышению однородности равнопрочности поверхностного слоя, что характеризуется уменьшением разброса силы трения при сканировании (трибограмма 3).



1 – одномерное; 2 – двумерное; 3 – трехмерное

Рис. 2. Трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения

Для сплавов ВТ20 и ЭИ437Б отличие в состоянии поверхностного слоя образцов после трения в аналогичных условиях менее существенно. В качестве примера на рисунке 3 представлены трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ЭИ437Б после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения. Наиболее вероятно отсутствие существенной корреляции между износостойкостью этих сплавов и состоянием поверхностного слоя связано с особенностями механизма изнашивания сплава ВТ-20 и меньшей чувствительностью износостойкости сплава ЭИ437Б к воздействию характера динамического нагружения при отрицательных температурах в сравнении со сплавом ХТН-61. Так, для сплава ХТН-61 при отрицательных температурах объемная интенсивность изнашивания изменяется при трехмерном нагружении в сравнении с одномерным нагружением на 75 %, а для сплава ЭИ437Б – только на 25 %.



1 – одномерное; 2 – двумерное; 3 – трехмерное

Рис. 3. Трибограммы силы трения при сканировании образцов из сплава ЭИ437Б после испытаний с отрицательными температурами при различных видах нагружения

**Выводы.** Таким образом, проведенные исследования позволяют заключить, что совместное действие динамических и температурных нагрузочных факторов инициирует в поверхностном слое деформационные процессы, способствующие изменению структурного и напряженного состояний с оказанием существенного влияния на изнашивание деталей. Повышенный износ как при положительных, так и при отрицательных температурах, как правило, происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем. Образование дисперсных структур повышенной износостойкости происходит при определенном термодинамическом воздействии с учетом особенностей физико-химических свойств материалов трибосопряжения.

Сложное взаимодействие твердых тел в контактной зоне должно учитываться при построении моделей контактирования и прогнозировании поверхностной прочности материалов при динамических нагрузках и, соответственно, условия проведения испытаний должны быть как можно ближе приближены к реальным условиям эксплуатации. Определение закономерностей и разработка условий формирования износостойкого поверхностного слоя деталей трибосопряжений возможно на основе анализа величины износа и состояния поверхности с учетом реального вида нагружения (однонаправленное скольжение, удар с проскальзыванием, удар с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях) и температуры окружающей среды. Это даст возможность рассмотреть физические основы пластически-деструкционных явлений в зоне контакта трибосопряжений с учетом действия продуктов изнашивания поверхности и разработать рекомендации по обеспечению износостойкого поверхностного слоя контактирующих деталей. Рассмотренный механизм формирования поверхностного слоя деталей трибосопряжений при сложном термомеханическом нагружении носит достаточно общий характер и может быть основой для целенаправленного формирования износостойкой структуры поверхности деталей узлов трения при их изготовлении в процессе финишной обработки или путем приработки в специально подобранных режимах и средах.

#### Список использованных источников

1. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

2. Веркин Б. И. Проблема долговечности металлов при низких температурах / Б. И. Веркин, И. М. Любарский, Н. М. Гринберг и др. // Космич. исслед. на Украине. – 1973. – Вып.1. – С. 14-22.
3. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах / В. А. Стрижало, Н. В. Филин, Б. А. Куранов и др. – К.: Наукова думка, 1988. – 240 с.
4. Ившенко Л. И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения / Л. И. Ившенко, В. В. Цыганов, И. М. Закиев // Трение и износ. – 2011. – Т. 32, № 1. – С. 500-509.
5. Ившенко Л. И. Ускоренные испытания сложнагруженных деталей трибосопряжений / Л. И. Ившенко, В. В. Цыганов, В. И. Черный // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 1. – С. 150-154.
6. Запорожец В. В. Выбор критериев и синтез алгоритма оценки видов изнашивания / В. В. Запорожец, В. А. Бердинских, В. В. Варюхно // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 6. – С. 975-984.
7. Тарасов Г. Ф. Термическая обработка сталей как фактор повышения их износостойкости при низких температурах / Г. Ф. Тарасов, А. И. Горбуля // Вестник Сибирского гос. аэрокосм. ун-та им. академика М. Ф. Решетнева. – 2005. – № 3. – С. 253-257.
8. Костецкий Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б. И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. – Т.1, № 4. – С. 622-638.
9. Игнатович С. Р. Оценка поврежденности поверхностного слоя материалов при циклических нагружениях методами наноиндентирования и наносклерометрии / С. Р. Игнатович, И. М. Закиев, Д. И. Борисов // Проблемы прочности. – 2006. – № 4. – С. 132-139.

УДК 536.24:621.791.55

**И.М. Кузьяев**, д-р техн. наук

**В.Н. Анисимов**, канд. техн. наук

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепропетровск, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ УЗЛОВ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

*Рассмотрены неизотермические процессы, происходящие в процессе эксплуатации подшипников скольжения. Представлено решения для определения температурного поля и температурных напряжений в теле втулки, выполненной из полимерного материала. Решение для определения температурного поля в теле подшипника получено с использованием интегрального преобразования Лапласа. Температурные напряжения находились с учетом вязкоупругих свойств материала втулки подшипника. Разработаны программные блоки САПР для реализации полученных математических моделей с использованием математического пакета Mathcad.*

**Ключевые слова:** подшипник, температурное поле, напряжение, преобразование Лапласа.

*Розглянуто неізотермічні процеси, що відбуваються в процесі експлуатації підшипників ковзання. Представлено рішення для визначення температурного поля й температурних напружень у тілі втулки, виконаної з полімерного матеріалу. Рішення для визначення температурного поля в тілі підшипника отримано з використанням інтегрального перетворення Лапласа. Температурні напруження визначалися з урахуванням в'язкопружних властивостей матеріалу втулки підшипника. Розроблено програмні блоки САПР для реалізації отриманих математичних моделей з використанням математичного пакета Mathcad.*

**Ключові слова:** підшипник, температурне поле, напруження, перетворення Лапласа.

*Not isothermal processes occurring while in service of bearings of sliding are considered. It is presented decisions for definition of a temperature field and temperature pressure in a body of the plug executed from a polymeric material. The decision for definition of a temperature field in a bearing body is received with use of integrated transformation Laplace. Temperature pressure were taking into account viscoelastic properties of a material of the plug of the bearing. Program blocks SAPR are developed for realization of the received mathematical models with use of mathematical package Mathcad.*

**Key words:** the bearing, a temperature field, pressure, transformation Laplace.

**Постановка проблемы.** В подавляющем большинстве оборудования, имеющего вращательные элементы, используются подшипники скольжения, одним из основных элементов которых являются вкладыши или втулки, выполненные из антифрикционного материала. При этом данного типа подшипники могут работать в режиме жидкостного трения или без смазки. В последнем случае втулки изготавливаются из самосмазывающихся материалов, что значительно упрощает конструкцию подшипникового узла, устраняя конструктивные элементы, связанные с подачей и отводом смазывающихся материалов.

Основные условия функционирования подшипников скольжения с самосмазывающимися материалами связаны с тем, что в процессе скольжения возникают микроабра-