

УДК 621.891

В. И. Кубич, д-р техн. наук Л. И. Ивченко, В. И. Закиев**ТОПОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ
ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН**

Приведены результаты анализа влияния содержания компонентов галлиево-индиевой среды на механические и геометрические характеристики приповерхностных слоев элементов трибосопряжений, что позволило определить характер изменения эксплуатационной топографии их поверхностей, обуславливающей улучшение показателей износостойкости.

Ключевые слова: топография, микротвердость, диаграмма внедрения, опорная длина, профиль, модуль упругости, поверхность, слой, поле сканирования, пластическое деформирование, среда.

Актуальность

В результате контактного взаимодействия элементов трибосопряжений происходит изменение их топографии — геометрической структуры рельефа поверхностей трения, параметрами которой, наряду с размерами зерен, субзерен, блоков или частиц, степени их вытянутости, являются локальные характеристики шероховатости поверхности. При этом в приповерхностных слоях материалов элементов происходит ряд структурных преобразований, в результате которых изменяются их физико-механические свойства, лежащие в основе формирования эксплуатационной топографии. Начальная, исходная топография поверхностей задается технологическими факторами обработки при их изготовлении и ремонте, например, в результате финишной антифрикционной безабразивной обработки в поверхностно-активных средах создается рельеф поверхности, обусловленный распределением материала наносимого покрытия в шероховатом слое обрабатываемой поверхности. От эксплуатационной топографии зависит формирующаяся и изменяющаяся контурная площадь контакта локальных участков поверхностей в зоне трения. Это, в свою очередь, обуславливает характер изменения напряженно-деформационного состояния взаимодействующих участков, что в целом предопределяет значения триботехнических характеристик трибосопряжений [1, 2].

В более ранних исследованиях [3] при проведении испытаний на износостойкость трибосопряжений по схеме «ролик-колодка», в которых топография поверхностей элементов определялась свойствами медьсодержащих покрытий на ролике и антифрикционным слоем колодки, были получены значения триботехнических характеристик: интенсивностей изнашивания образцов, коэффициента трения, температуры в зоне трения образцов. Покрытия формировались в процессе фрикционно-механической обработки поверхнос-

ти ролика прутком из бронзы БрОФ4-0,25 при разном содержании компонентов галлиево-индиевой среды. Содержание индия изменялось от 6 до 19 % (атом). Ролики изготавливались из стали 45ХН2МФА, $d = 50$ мм, параметр шероховатости поверхности $Ra = 1,25$ мкм, колодки — из высокоооловянистого алюминия АО20-1 ГОСТ 14113-78, материал основы сталь 08кп ГОСТ 1050-88, площадь трения 120 мм^2 . Испытания позволили выявить тенденцию к улучшению показателей износостойкости исследуемых сопряжений с увеличением содержания компонента среды — индия, при этом наиболее значимый состав среды может соответствовать содержанию индия в 17–19 % (атом).

Однако характер изменения эксплуатационной топографии поверхностей элементов трибосопряжений, что определяется, в первую очередь, влиянием содержания компонентов галлиево-индиевой среды на физико-механические свойства их приповерхностных слоев, ранее не рассматривался.

Данный факт и вызывает определенный интерес в анализе механических и геометрических характеристик, лежащих в основе формирования эксплуатационной топографии поверхностей образцов, что необходимо для объяснения механизма, обуславливающего улучшение показателей износостойкости трибосопряжений.

Методы исследования

Для анализа механических и геометрических характеристик поверхностей образцов использовался аппаратный комплекс для микро- и нанотестирования поверхности материалов и покрытий в составе универсального нанотестера «Микрон-гамма» и оптического интерференционного профилометра «Микрон-альфа» [4].

С помощью профилометра «Микрон-альфа» сканировались поля на поверхностях образцов роликов и колодок, что позволило получить ко-

личественные и качественные характеристики рельефа на исследуемых участках, а также их трехмерные изображения, рис. 1. Разрешающая способность прибора 2 нм. Для каждого образца сканировалось по два рядом друг к другу расположенных поля размером $0,2 \times 0,26$ мм. Программное обеспечение данного прибора позволяет проводить анализ рельефа в продольном и поперечном направлениях. В соответствии с возможностями прибора задавались и обрабатывались по четыре профилограммы для каждого поля в плоскостях, поперечных движению, рис. 2.

Для каждой профилограммы графическим способом определялись относительные опорные длины профиля t_p на уровне сечения, составляющем 50 % от полной высоты профиля. Базовая

длина профиля при этом составляла 0,25 мм. Точность измерений по длине профилограмм составляла $\Delta_1 = 1$ мм, по углу наклона линии сечения $\Delta_1 = 1,5^\circ$. В результате получались по восемь значений относительных опорных длин профили.

Расчетные значения обрабатывались в соответствии с методикой оценки измерений в экспериментальных исследованиях [5]. Например, для колодки, приведенной на рис. 2, при среднеарифметическом значении $t_p = 56,8\%$ и доверительной вероятности $P_d = 0,8$, коэффициенте Стьюдента $\alpha_{ст} = 1,533$ относительная погрешность составила 5,8 %, для остальных образцов она находилась в пределах 3,8–8,4 %.

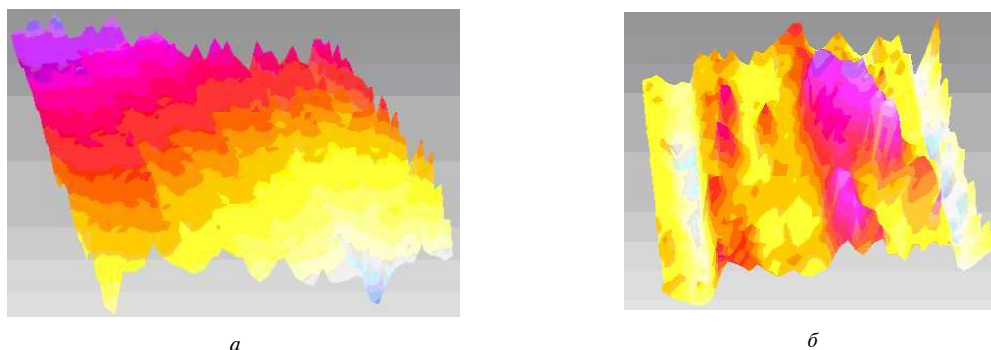


Рис. 1. 3D изображения топографии полей поверхностей образцов:

a – поле сканирования ролика; *б* – поле сканирования колодки

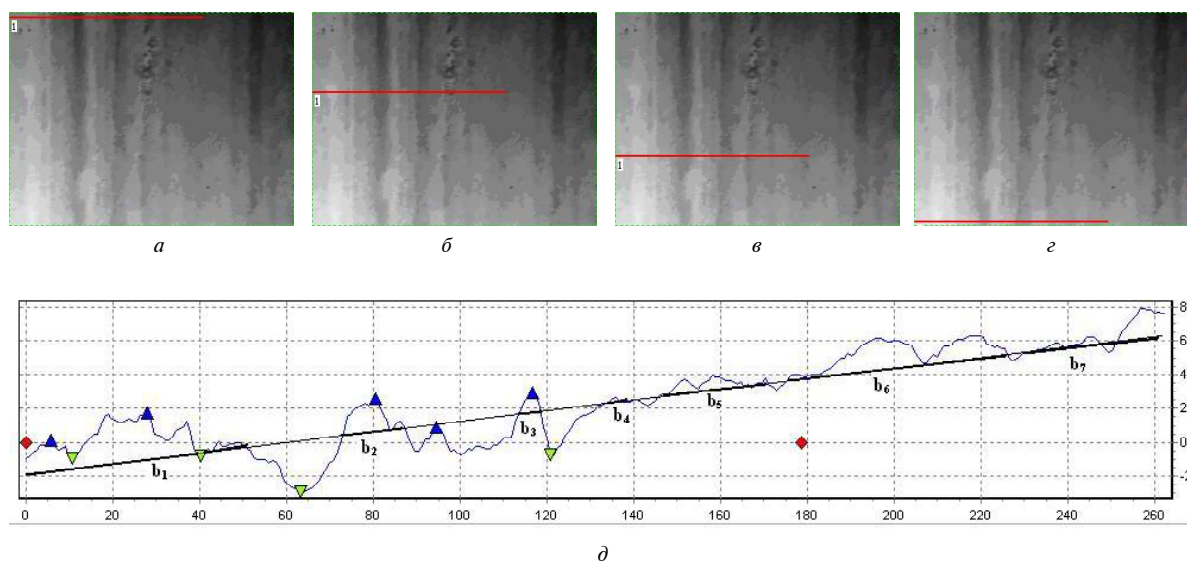


Рис. 2. Поле сканирования поверхности колодки, контактирующей с роликом без обработки ($\times 600$):

a, *б*, *в*, *г* – фотографии поля сканирования поверхности (линией обозначены плоскости сечений); *д* – профилограмма в третьем сечении (считать слева направо); b_1 – b_7 – участки опорной длины профиля профилограммы третьего сечения

С помощью нанотестера «Микрон-гамма», при работе его в качестве индентометра, осуществлялось непрерывное внедрение в локальные участки поверхности колодок твердого индентора с регистрацией в автоматизированном режиме глубины его проникновения (h) и вдавливающей силы (P). Результаты представлялись в виде графических диаграмм внедрения, отображающих зависимость P от h (рис. 3, линии 1–5: ветви нагружения – слева, ветви разгрузки – справа), а также в виде цифровой базы данных. Программное обеспечение данного прибора позволяет определять такие параметры как глубина внедрения h_{max} , микротвердость H_{μ} , модуль уп-

ругости E деформированного антифрикционного слоя колодок.

На каждом образце выполнялось от четырех до семи уколов при нарастающем нагружении и разгрузке от 0 до 0,5Н. Уколы проводились в поверхность колодки, причем, глубина проникновения индентора была намного меньше толщины структурированного контактным взаимодействием слоя, отличающегося от структуры базового слоя покрытия колодки, рис. 4. Это позволило исключить влияние микротвердости исходного материала колодки на микротвердость ее структурированных приповерхностных слоев, и говорить о достоверности полученных результатов.

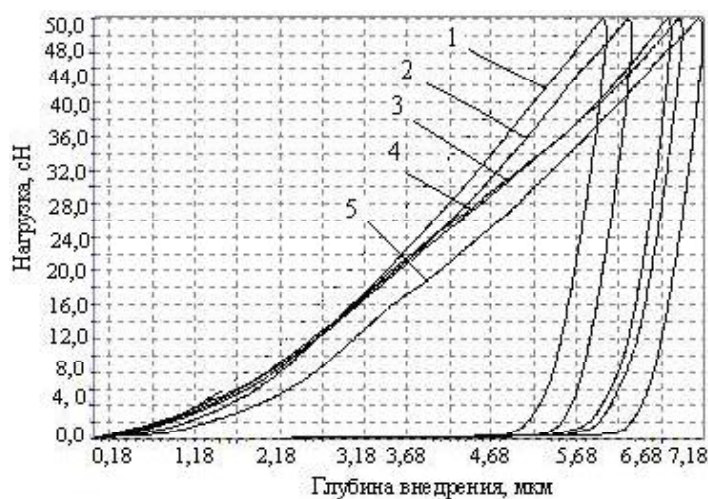


Рис. 3. Диаграммы внедрения в поверхность колодки, контактирующей с роликом при условии его обработки с содержанием индия в среде 18,6 %:

- 1 – $h_{max} = 6,026$ мкм; $H_{\mu} = 0,645$ ГПа; $E = 28,4$ ГПа; 2 – $h_{max} = 6,333$ мкм; $H_{\mu} = 0,579$ ГПа; $E = 27,4$ ГПа;
 3 – $h_{max} = 6,786$ мкм; $H_{\mu} = 0,499$ ГПа; $E = 25,8$ ГПа; 4 – $h_{max} = 6,919$ мкм; $H_{\mu} = 0,485$ ГПа; $E = 22,8$ ГПа;
 5 – $h_{max} = 7,166$ мкм; $H_{\mu} = 0,447$ ГПа; $E = 23,2$ ГПа

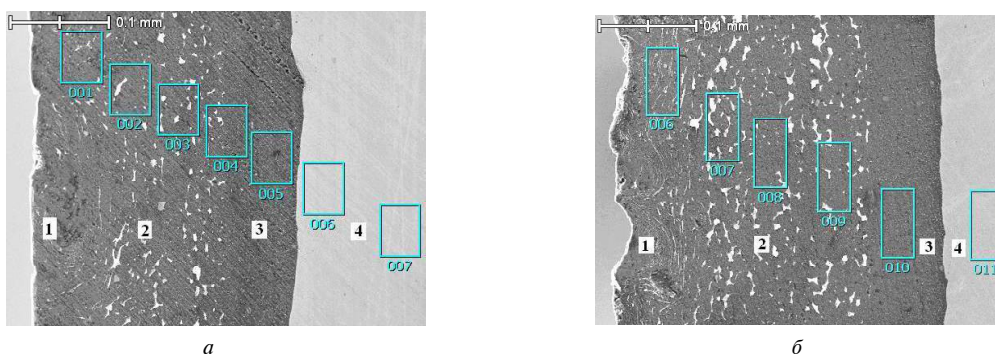


Рис. 4. Структурированные слои антифрикционного слоя колодок:

$a, б$ – поперечные шлифы колодок, контактировавших с покрытиями роликов; 1 – деформируемый слой, толщина – (75–100) мкм; 2 – структура основного материала покрытия (алюминий, олово, медь); 3 – подложка основного материала покрытия (алюминий); основа антифрикционного покрытия колодки – сталь 08кп; (001–011) – зоны спектрального анализа антифрикционного слоя колодки

Полученные значения параметров также обрабатывались в соответствии с методикой оценки измерений [5]. Например, для колодки, приведенной на рис. 3, при среднеарифметических значениях $h_{max} = 6,64$ мкм; $H_{\mu} = 0,531$ ГПа; $E = 25,5$ ГПа и доверительной вероятности $P_{\partial} = 0,8$, коэффициенте Стьюдента $\alpha_{cm} = 1,533$ относительная погрешность результатов измерений параметров составила соответственно: 4,7 %; 9,7 %; 0,5 %. Для остальных колодок значения относительных погрешностей находились в пределах: для h_{max} – (4,9–7,0) %; для H_{μ} – (9,7–12,6) %; для E – (0,2–0,6) %.

Исключить влияние микротвердости подложки материала ролика на микротвердость структурированных поверхностных слоев его покрытия не представлялось возможным ввиду их тонкости и сложности проведения измерений. По этой причине диаграммы внедрения с поверхностей роликов не снимались.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты измерений позволили установить зависимости изменения глубины внедрения индентора, микротвердости, модуля Юнга для приповерхностных слоев антифрикционного материала колодок в зависимости от %-го содержания индия в среде, в которой формируются покрытия на роликах, рис. 5–7. Содержание индия в среде приведено в диапазоне от 9,5 до 27 %, (вес), что соответствует диапазону от 6 до 19 % (атом). Из полученных зависимостей видно, что с увеличением %-го содержания индия в покрытии, при последующем его контактном взаимодействии с антифрикционным слоем колодок, в последних происходят структурные изменения. Об этом свидетельствует уменьшение микротвердости H_{μ} в 1,8 раза, модуля Юнга E в 2,6 раза, при этом глубина внедрения индентора увеличивается в 1,4 раза. Однако на зависимостях просматривается и тенденция к неоднозначному влиянию %-го содержания индия на рассматриваемые параметры слоев колодки.

Наблюдается следующая картина:

- при 22–24 % индия значения: h – максимальные; H_{μ} – минимальные;
- при 18–22 % индия значения модуля Юнга минимальные;
- при приближении содержания индия к 27 % значения: h – уменьшаются; H_{μ} , E – увеличиваются.

Приведенное обусловливает факт наличия оптимального %-го содержания индия, при котором происходит значимое пластифицирование приповерхностных слоев антифрикционного слоя колодок, причем толщина этого слоя составляет, как минимум, 7 мкм.

Значения относительной длины профиля t_p

приповерхностных слоев, полученные в результате обработки профилограмм полей сканирования образцов, позволила также установить ее зависимость от %-го содержания индия в среде формирования покрытий, рис. 8. Из установленных зависимостей видно, что с увеличением %-го содержания индия увеличиваются значения t_p образцов, что свидетельствует об изменении количества материала структурированных приповерхностных слоев, распределенного в шероховатости поверхности.

Наблюдается следующая картина:

- значения t_p для роликов с покрытиями, при совместной работе с колодками, по сравнению с t_p для роликов с покрытиями, но не работающих совместно с колодками, увеличились с 1,1 до 1,2 раз при увеличении содержания индия с 9,5 до 27 %;

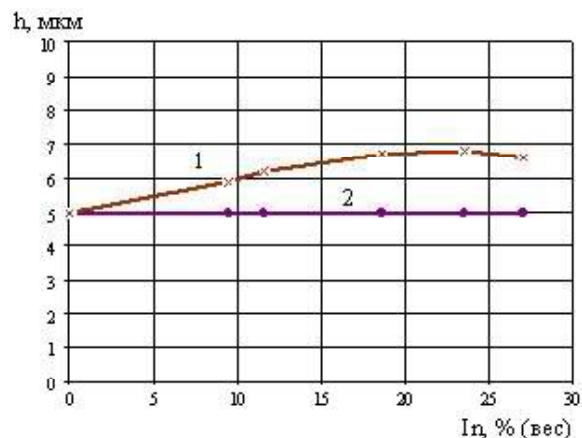


Рис. 5. Зависимость глубины внедрения индентора в приповерхностный слой колодки от содержания индия в среде:

- 1 – колодки, контактирующие с покрытиями роликов;
- 2 – колодки, контактирующие с роликами без покрытий

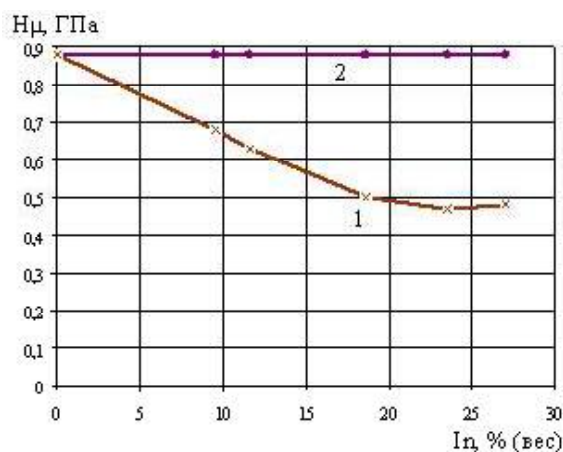


Рис. 6. Зависимость микротвердости приповерхностного слоя колодки от содержания индия в среде:

- 1 – колодки, контактирующие с покрытиями роликов;
- 2 – колодки, контактирующие с роликами без покрытий

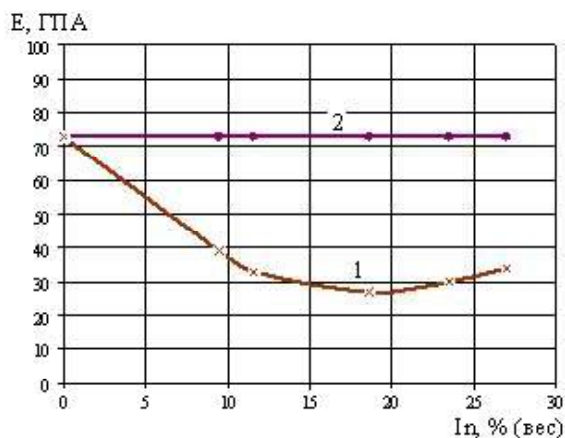


Рис. 7. Зависимость модуля Юнга приповерхностного слоя колодки от содержания индия в среде:

1 – колодки, контактирующие с покрытиями роликов; 2 – колодки, контактирующие с роликами без покрытий

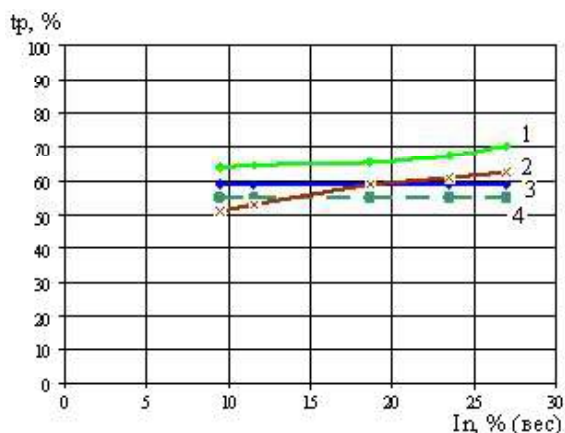


Рис. 8. Зависимость относительной длины профиля приповерхностных слоев образцов от содержания индия в среде:

1 – ролики с покрытиями; колодки, 2 – колодки, контактирующие с роликами с покрытиями; 3 – ролики с покрытиями, не контактирующие с колодками; 4 – колодки, контактирующие с роликами без покрытий

- значения t_p для колодок, при совместной работе с покрытиями роликов, по сравнению с t_p колодок, работающих совместно с роликами без покрытий, сначала уменьшились в 1,12 раз, а затем плавно увеличились в 1,11 раза при увеличении содержания индия с 9,5 до 27 %;

- интенсивность роста t_p для колодок несколько больше, чем интенсивность роста t_p для роликов при приближении содержания индия в среде к 27 %, прирост материала в слоях колодок при содержании индия (22–27) % меньше, чем у роликов;

- явно выраженный характер изменения t_p образцов в сторону уменьшения при приближении содержания индия в среде к 27 % отсутствует.

Приведенное, в целом, указывает на факт формирования эксплуатационной топографии поверхностей образцов, обуславливающей хоть и незначительно, но все же увеличение контурных площадей в зонах контакта поверхностей ролика и колодки при трении.

Полученные результаты можно объяснить следующим.

Под влиянием поверхностно-активной галлиево-индиевой среды происходит реализация адсорбционного пластифицирования приповерхностных слоев образцов. В результате облегчения пластической деформации происходит снижение потенциального барьера, который преодолевается дислокациями при выходе на поверхность образцов. В условиях трения, образовавшиеся в структурах дислокации подходят к поверхности и, вследствие снижения поверхностного потенциального барьера, под влиянием активной среды разряжаются. На поверхностях структурированных слоев появляются «мгновенные» активные центры, способствующие массовой сублимации атомов металлов. Функциональность таких активных центров определяется количеством индия в галлиево-индиевой среде. Пластическое деформирование слоев способствует ускорению накопления активных центров в их тонких поверхностных слоях.

Выводы

Результаты анализа механических и геометрических характеристик приповерхностных слоев материалов образцов, структурированных контактным взаимодействием при трении, показали, что эксплуатационная топография их поверхностей определяется содержанием индия в галлиево-индиевой среде. При этом наиболее значимый состав среды может соответствовать содержанию индия в 24–26 %, (вес).

Установлен факт увеличения количества структурированного материала в шероховатостях профиля поверхностей образцов за счет их пластификации, что приводит к увеличению площадей контакта на локальных участках при трении, и лежит в основе механизма повышения износостойкости сопряжений за счет снижения контактных удельных давлений.

Полученные данные могут использоваться как основа для моделирования контактного взаимодействия элементов трибосопряжений типа «шейка-вкладыш», а также прогнозирования изменений их триботехнических характеристик, структурных параметров и ресурса в реальных условиях эксплуатации.

Перечень ссылок

1. Методы испытаний на трение и износ / [Л. И. Куксенова, В. Г. Лагтева, А. Г. Колмаков,

- Л. М. Рыбакова]. – М. : «Интернет инжиниринг», 2001. – 152 с.
2. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д. Н. Гаркунов. – М. : МСХА, 2001. – 424 с.
3. Кубіч В. І. Про вплив вмісту компонентів галієво-індієвого середовища на триботехнічні характеристики трибоз'єднання / В. І. Кубіч, Л. Й. Івченко // Проблеми тертя та зношування. – 2009. – № 52. – С. 92–101.
4. Игнатович С. Р. Аппаратурный комплекс для микро- и нанотестирования поверхности материалов и покрытий / Игнатович С. Р., Шмаров В. Н., Закиев И. М. // Технологические системы. – 2009. – № 5(49). – С.72–78.
5. Грушко И. М. Основы научных исследований / И. М. Грушко, В. М. Сиденко. – Харьков : Вища школа, изд-во при Харьк. ун-те, 1983. – 224 с.

Поступила в редакцию 17.08.2010

Кубіч В.І., Івченко Л.Й., Закиєв В.І. Топографія поверхонь елементів трибоз'єднань енергетичних машин

Приведено результати аналізу впливу вмісту компонентів галієво-індієвого середовища на механічні і геометричні характеристики приповерхневих шарів елементів трибоз'єднань, що дозволило визначити характер зміни експлуатаційної топографії їх поверхонь, що обумовлює поліпшення показників зносостійкості

Ключові слова: топографія, мікротвердість, діаграма занурення, опорна довжина, профіль, модуль пружності, поверхня, шар, поле сканування, пластичне деформування, середовище.

Kubich V., Ivshenko L., Zakiev V. The surface topography of power machine tribounit elements

In the article are shown the analysis results of the components of the gallium-indium environment influence on the mechanical and geometric characteristics of the tribounit elements near-surface layers, which allowed to determine the nature of the changes in the working topography of their surfaces that involved improvements in durability

Key words: topography, microhardness, figure studies, support length, profile, elastic modulus, the surface layer, the field of scanning, plastic deformation, environment.