

**Кубич В.И.****Ивченко Л.И.**Запорожский национальный технический университет,  
г. Запорожье, Украина**О МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ  
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ  
ЭЛЕМЕНТОВ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯ  
«ШЕЙКА-ПОКРЫТИЕ-ВКЛАДЫШ»****Постановка проблемы**

Механические характеристики контактных поверхностных слоев элементов трибосопряжений во многом обуславливают протекание процессов, связанных с зарождением дефектов, приводящих к их последующему разрушению в свойственных им эксплуатационных условиях работы. К таким характеристикам могут быть отнесены послойные микротвердость и модуль упругости. Формирование исходных покрытий на поверхности одного из элементов трибосопряжений способом финишной антифрикционной базабразивной обработки (ФАБО) в поверхностно-активных средах приводит к ее первичному модифицированию, а дальнейшее ее контактное взаимодействие с поверхностью другого элемента к последующему. Причем изменению деформационного состояния подвергаются и контактные приповерхностные слои необработанной поверхности. При этом изменяются и приведенные механические характеристики. Безусловно, характер послойного глубинного изменения их значений обуславливает механизм деформации контактных слоев, лежащий в основе обеспечения износостойкости элементов трибосопряжений в целом [1, 2].

Результаты проведенных ранее триботехнических испытаний по оценке износостойкости трибосопряжения «шейка-покрытие-вкладыш», проведенные в лабораторных условиях с использованием натуральных образцов, и металлографических исследований показали следующее. Покрытие, сформированное способом ФАБО на поверхностях шеек с использованием комплекса материалов в составе: оловянистая бронза БрОФ4-0,25; поверхностно-активная среда %, (ат.) галлий 81, индий 19, обуславливает снижение: износа контактных поверхностей элементов трибосопряжений, при изменении нагружения и режимов смазывания в зоне трения; температурной напряженности и механических потерь в трибосопряжениях, за счет образования вторичных структур из элементов покрытия и элементов антифрикционного слоя вкладыша при протекании в их приповерхностных контактных слоях структурных превращений; неоднородно влияет на изменение микроструктуры приповерхностных слоев основного материала шеек. Покрытие формировалось на натуральных образцах-шейках, материал сталь 45, чугун ВЧ50. В качестве образцов-вкладышей использовались цельные сталеалюминиевые вкладыши с антифрикционным сплавом АО20-1, материал основы сталь 0,8 кп. Триботехнические испытания проводились в соответствии с циклом, моделирующим условия граничного трения поверхностей образцов, при которых происходит «рубное граничное трение» - условия разрушения и возобновления слоя масляной композиции в зоне контакта [3, 4, 6].

В соответствии с этим определенным интерес представляет картина послойного изменения механических свойств в контактируемых слоях элементов исследуемых трибосопряжений, что, безусловно, лежит в основе протекания целого комплекса процессов структурообразования при действии компонентов используемой галлиево-индиевой среды. Особенно важно получить картину изменения свойств контактных слоев именно в условиях образования вторичных структур. Однако сведения о характере изменения механических характеристик поверхностных слоев при использовании натуральных образцов отсутствуют.

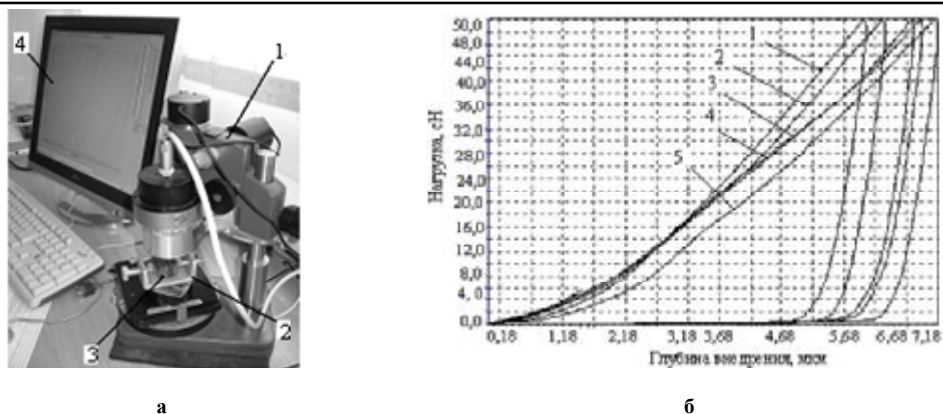
Данный факт вызывает необходимость в проведении измерений значений микротвердости, модуля упругости приповерхностных слоев элементов испытанных трибосопряжений.

Полученные результаты позволят получить картину изменения рассматриваемых характеристик при проявлении свойств компонентов галлиево-индиевой среды и оценить степень ее влияния на процессы структурообразования в контактных слоях элементов трибосопряжений.

**Методы исследования**

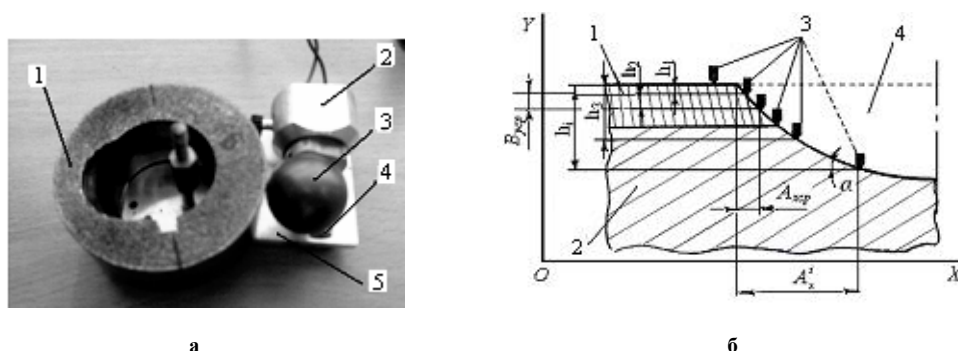
Для измерения и последующего анализа механических характеристик поверхностей образцов использовался аппаратный комплекс для микро и нанотестирования слоев поверхности материалов и покрытий в составе универсального нанотестера «Микрон-гамма», рис. 1 а, б [5]. Для удобства проводимых измерений фрагменты образцов собирались в пакет, закреплялись в струбине 2 и позиционировались на рабочем столике прибора.

При работе нанотестера в качестве индентометра, осуществлялось непрерывное внедрение в локальные участки поверхности образцов 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  $h$ , а также в виде цифровой базы данных.



**Рис. 1 – Внешний вид нанотестера «Микрон-гамма»:**  
 а – размещение образцов: 1 – направляющая прибора; 2 – трубка;  
 3 – фрагменты образцов роликов (шек); 4 – окно программного обеспечения измерений;  
 б – диаграммы внедрения: 1 - 5 ветви нагружения – слева, ветви разгрузки – справа

Программное обеспечение данного прибора позволяет определять такие параметры как глубина внедрения  $h_{max}$ , микротвердость  $H_{\mu}$ , модуль упругости  $E$  деформированного антифрикционного слоя. На каждом образце выполнялось от четырех до семи уколов при нарастающем нагружении и разгрузке от 0 до 50 г. Уколы выполнялись как непосредственно в поверхность образцов, так и в плоскости шлифов. Для проведения измерений по поверхности с помощью приспособления выполнялись лунки, а уколы производились в соответствии со схемой, рис.2 а,б.



**Рис. 2 – Приспособления для выполнения лунок на поверхности образцов:**  
 а – приспособление: 1 – образец-шейка; 2 – электродвигатель;  
 3 – вращающийся шар; 4 – направляющие конусы; 5 – опора;  
 б – схема уколов в плоскости сечения лунки: 1 – слой покрытия; 2 – слой основного материала образца;  
 3 – места внедрения индентора; 4 – лунка;  $h_1, h_2, h_3, h_i$  – глубина измерения

Такой прием позволил определить послойно как механические характеристики покрытий, так и приповерхностных структур основного материала без существенного разрушения образцов. Последнее позволило использовать для триботехнических испытаний натурные образцы с изначально определенными исходными характеристиками исследуемых структур образцов.

Для определения глубины измерения использовалась программное обеспечение расчетов измерений Recogn of Objects, алгоритм вычислений составлен с учетом геометрических размеров шара, рис. 3 а, б.

Программа производит вычисления расстояний между фиксируемыми точками на изображении (пикселями), в данном случае в местах уколов, определяя координаты в системе ХОУ. Точность измерения расстояний составила 1 мкм. В соответствии с полученными координатами определялась глубина анализируемого слоя:

$$h_i = \frac{A_x^i}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{A_x^i B_{\text{уср}}}{A_{\text{хсп}}}, \quad (1)$$

где  $A_x^i$  – расстояние между точками по проекции на ось  $OX$ , мкм;

$A_{\text{хсп}}$  – среднее расстояние между точками измерений по совокупности уколов по проекции на ось  $OX$ , мкм;

$B_{\text{уср}}$  – среднее расстояние между точками измерений по совокупности уколов по проекции на ось  $OY$ , мкм.

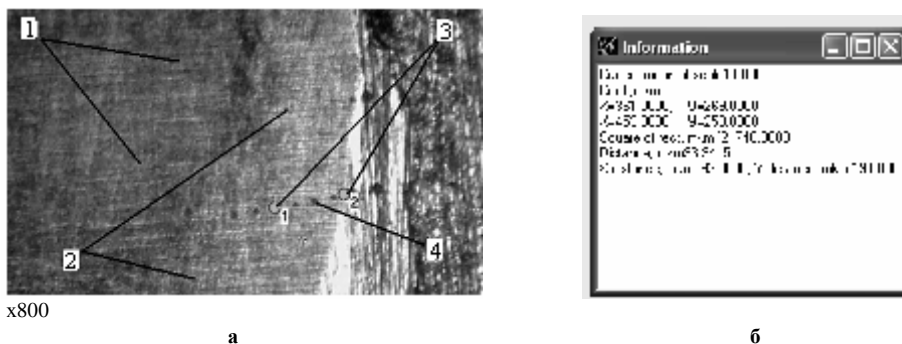


Рис. 3 – Окно программы Recogn of Objects измерения расстояний по поверхности лунки:  
 а – поверхность лунки на образце-шейке: 1 – материал образца (сталь 45); 2 – медьсодержащее покрытие;  
 3 – точки фиксации измерений (зоны уколов); 4 – укол индентора;  
 б – информационное табло с рассчитанными расстояниями

Результаты исследований и обсуждение

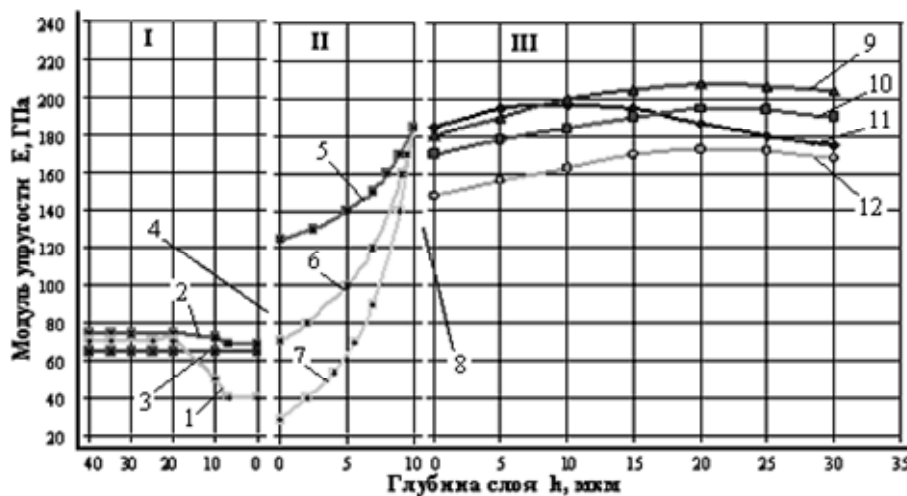
В табл. 1 приведены усредненные значения микротвердости, модуля упругости приповерхностных слоев вкладышей, а на рис. 4, 5 представлены комплексные схемы их изменения по глубинам контактных слоев вкладышей, покрытия, шеек.

Таблица 1

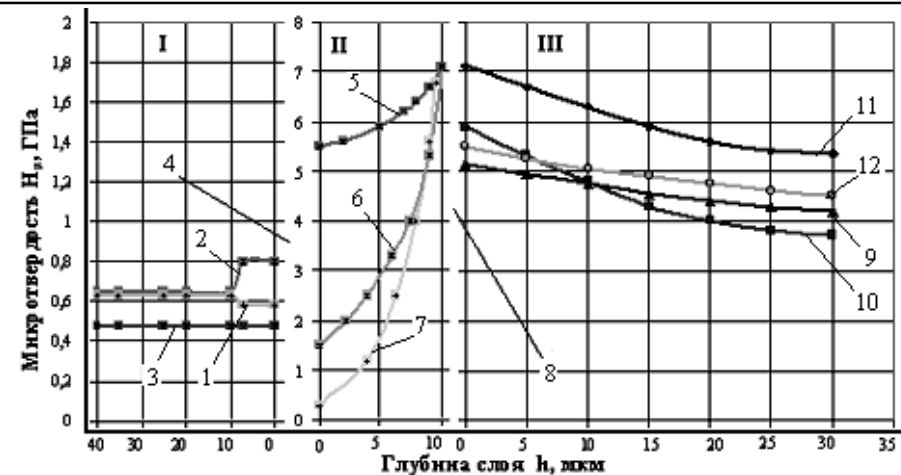
Усредненные значения микротвердости, модуля упругости приповерхностного слоя вкладышей

Наименование	Микротвердость Нц, ГПа		Модуль упругости E, ГПа	
	Глубина слоя (0 - 7) мкм	Глубина слоя (30 - 40) мкм	Глубина слоя (0 - 7) мкм	Глубина слоя (30 - 40) мкм
Исходный материал	0,46 - 0,49	0,46 - 0,49	64,0 - 66,0	64,0 - 66,0
Материал, после испытаний модельных образцов	0,88* 0,48**	-	72,0 34,0	-
Материал, после испытания натуральных образцов	0,82 - 0,77 0,56 - 0,61	0,62 - 0,68 0,61 - 0,65	68,5 - 71,3 38,3 - 42,8 (59,3 - 62,8)	73,2 - 74,9 70,2 - 73,4

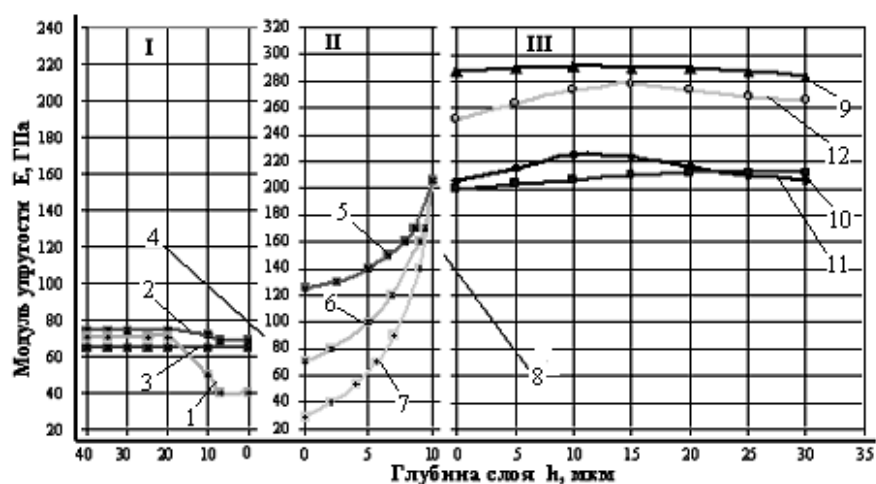
Примечание: \* – для трибосопряжений без покрытия;  
 \*\* – для трибосопряжений с покрытием



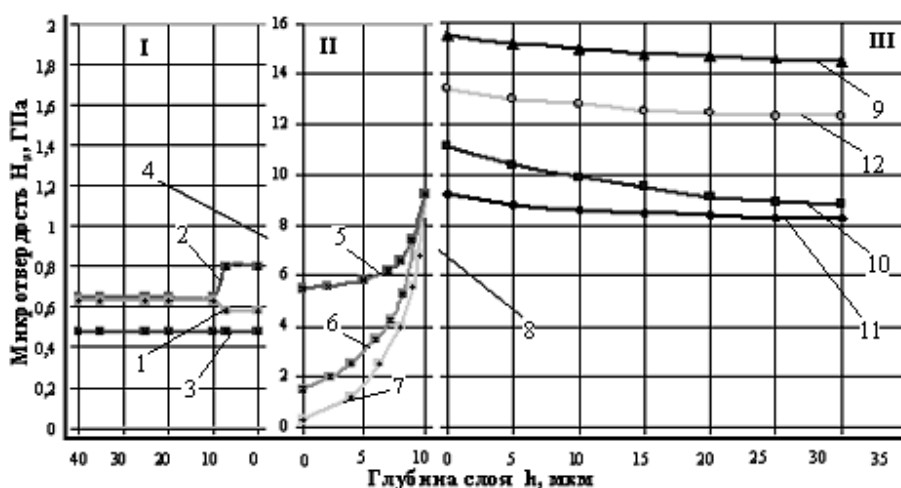
а



б



в



г

Рис. 4 – Комплексная схема изменения модуля упругости, микротвердости по глубинам контактных слоев элементов трибосопряжений:

а, б – материал шейки чугуна ВЧ50; в, г – материал шейки сталь 45;

I – слой поверхности вкладыша: 1 – взаимодействие с покрытием после испытаний;

2 – взаимодействие с поверхностью без покрытия; 3 – исходный материал;

4 – зона контакта поверхности вкладыша с шейкой;

II – слой покрытия на шейке: 5 – область № 3; 6 – область № 2; 7 – область № 1;

8 – зона адгезионного взаимодействия материала покрытия с подложкой материала шейки;

III – приповерхностные слои шейки: 9 – без покрытия после испытаний; 10 – без покрытия до испытаний;

11 – после нанесения покрытия до испытаний; 12 – после испытаний с покрытием

Анализ полученных результатов показал следующее.

Для приповерхностных слоев вкладышей:

- микротвердость поверхностного слоя, контактирующего с покрытием на шейке, по отношению к микротвердости слоя, контактирующего с шейкой без покрытия, уменьшилась в 1,35 раза, и в тоже время, по отношению к исходной - увеличилась в 1,2 раза. При этом микротвердость слоя, контактирующего с шейкой без покрытия увеличилась, по отношению к исходной в 1,7 раза;

- на большей глубине от поверхности контакта микротвердости слоев, контактируемых как с покрытием на шейке, таки и без него, увеличились в 1,34 раза по отношению к микротвердости исходного материала;

- модуль упругости слоя контактирующего с покрытием на шейке, по отношению к таковому для слоя, контактирующего с шейкой без покрытия, уменьшился в 1,7, а также и в 1,2 раза (для данных приведенных в скобках), что выделяет наличие неоднородности упругих свойств по глубине;

- по отношению к исходному материалу наблюдается незначительное увеличение модуля упругости для слоев, контактирующих с шейкой без покрытия, и снижение в 1,6 (1,1), для слоев, контактирующих с покрытием;

- на большей глубине от поверхности контакта модуль упругости слоев, контактируемых как с покрытием на шейке, таки и без него, увеличились в 1,14 раза по отношению к микротвердости исходного материала.

Характер изменения величин, определяющих механические свойства приповерхностных слоев вкладышей, указывает на неоднозначность протекания структурных изменений, приводящих к различному уровню пластичности и упругости контактных зон, что обуславливает их деформационное состояние. Контактные зоны поверхностей вкладышей, контактирующие с шейками без покрытий подвергаются поверхностному упрочнению в большей степени, чем зоны вкладышей, контактирующие с покрытием на шейках, что является сопутствующим процессом деформаций с накоплением дефектов, приводящих к разрушению когезионных связей антифрикционного материала.

Для приповерхностных слоев шеек, материал чугун ВЧ50, наблюдается:

- незначительное увеличение модуля упругости в 1,1 раза с выраженным максимумом на глубине ~ 10 мкм для слоев модифицированных процессом формирования покрытия до испытаний, по отношению к не обрабатываемой поверхности, для которой максимальные значения наблюдаются на глубине ~ (20 - 30) мкм и сходятся со значениями обработанной поверхности в более глубоких слоях;

- снижение модуля упругости модифицированного слоя по результатам триботехнических испытаний в 1,2 раза на глубине ~ (0 - 15) с последующим увеличением и сходимостью с результатами до испытаний на глубине ~ (20 - 30) мкм;

- для не обрабатываемой поверхности после ее испытания характерно незначительное увеличение модуля упругости – в 1,1 раза, симметрично по всей глубине;

- увеличение микротвердости слоев, модифицированных обработкой, в 1,24 раза, по отношению к не модифицированным, с максимальными значениями на поверхности с пологим уменьшением в глубину;

- незначительные изменения микротвердости для слоев поверхности, не подвергавшихся обработке после испытаний: уменьшение в 1,2 раза на глубине ~ (0 - 10) мкм, а также увеличение в 1,17 раза на глубине (25 - 30) мкм;

- снижение микротвердости модифицированных слоев после испытаний в 1,3 раза, при этом линия уменьшения ее значений в глубину более пологая, чем до испытаний.

Такая картина характера изменений показателей механических свойств обуславливает протекание процессов структурообразования, не приводящих к изменению микроструктуры чугуна, а приводящих к упрочнению - релаксационному состоянию приповерхностных слоев с покрытием [6]. В результате работы трибосопряжения приповерхностные слои шеек с покрытием менее упруги, при большей микротвердости, по отношению к шейкам без покрытия.

Для приповерхностных слоев образца шейки, материал сталь 45, наблюдается:

- незначительное увеличение модуля упругости в 1,1 раза с выраженным максимумом на глубине ~ 10 мкм для слоев модифицированных процессом формирования покрытия до испытаний, по отношению к не обрабатываемой поверхности, для которой максимальные значения наблюдаются на глубине ~ (20 - 30) мкм и сходятся со значениями обработанной поверхности на этой глубине;

- увеличение модуля упругости модифицированных слоев после испытаний в 1,24 раза с сохранением максимального значения, но уже на глубине ~ 15 мкм и таким же убыванием далее по глубине;

- для слоев, не модифицированных обработкой, модуль упругости увеличивается в 1,4 раза и сохраняется постоянным по всей анализируемой глубине, что в 1,12 раза больше чем для модифицированных слоев;

- уменьшение микротвердости модифицированных слоев в 1,2 раза до испытаний по отношению к не модифицированным слоям с сохранением пологости убывания в глубину и сходимостью в более глубоких слоях;

- увеличение микротвердости модифицированных слоев после испытаний в 1,24 раза, а также не модифицированных слоев в 1,38 раза, при том, что микротвердость модифицированных слоев по отношению к не модифицированным меньше в 1,2 раза.

Такая картина характера изменений показателей механических свойств также обуславливает протекание процессов структурообразования, но уже приводящих к изменению микроструктуры стали, и релаксационно-упрочненному состоянию приповерхностных слоев с покрытием [6]. В результате работы такого сопряжения приповерхностные слои шеек с покрытием менее упруги, при меньшей микротвердости, по отношению к шейкам без покрытий.

Для слоев покрытия на шейках до испытаний, характерно:

1) четко просматриваются области структурных составляющих - фаз материала покрытия со значениями микротвердости, модуля упругости:

- область № 1: 0,3-0,7 ГПа, 20-45 ГПа;

- область № 2: 1,2-2,2 ГПа, 60-85 ГПа;

- область № 3: 4,5-6,0 ГПа, 110-140 ГПа;

- область адгезионного взаимодействия материалов шеек с материалом покрытия: для чугуна ВЧ50 – 150-160 ГПа, 5,5-6,0 ГПа; для сталь 45 – 190-210 ГПа, 9 - 10 ГПа;

2) глубина внедрения индентора для зон уколов составляла 2,5 - 5,3 мкм, что свидетельствовало о достаточной неоднородности слоев.

В соответствии с полученными данными предположительно:

- области № 1, 2 образованы механическими смесями (галлий + индий) с (олово + медь);

- область № 3 упрочненная медь, что обусловлено увеличением модуля упругости с 100 ГПа, исходных для бронзы БРОФ4-0,25, до выявленных 110 - 140 ГПа.

На схемах характер распределения значений анализируемых величин приведен как вариант отображения наличия выявленных областей.

После испытаний распределение областей стало таким, что в основном осталась область № 1 и № 3. Значения микротвердости и модуля упругости по отношению к исходным уменьшились: микротвердость (4,5 - 6,0 ГПа) → (3,0 - 4,3 ГПа); модуль упругости (110 - 140 ГПа) → (90 - 110 ГПа). Отсутствие области № 2, а также снижение значений рассматриваемых величин предопределяет изменение состава образовавшейся при трении структуры и ее свойств.

## Выводы

Получены комплексные схемы изменения механических характеристик - модуля упругости, микротвердости контактных слоев материалов шеек (сталь 45, чугун ВЧ50), антифрикционного сплава вкладыша АО20-1, покрытия на шейке (бронза БрОФ4-0,25, компоненты галлиево-индиевой среды).

Выявлены изменения в анализируемых слоях, которые обусловлены влиянием галлиево-индиевой среды на характер протекания как адгезионных, так и когезионных процессов, связанных с перераспределением энергий взаимодействия между элементами кристаллических решеток материалов. Такое состояние может создать предпосылки к более интенсивному протеканию процессов индивидуального структурирования взаимодействующих материалов без накопления дефектов, приводящих к разрушению поверхностного слоя.

## Литература

1. Справочник по триботехнике: в 3-х т. Т.1 Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.

2. Кубич В.И. Топография поверхностей элементов трибосоприжений энергетических машин / В.И. Кубич, Л.И. Ивченко, В.И. Закиев // Вестник двигателестроения. – № 1. – 2011. – С. 8-14.

3. Кубич В.И. Износостойкость деталей трибосоприжения «шейка-вкладыш» с медьсодержащими покрытиями / В.И. Кубич, Л.И. Ивченко // Проблемы трибологии. – №2 (60). – 2011. – С. 103-110.

4. Кубич В.И. К методике разработки цикла испытания трибосоприжения «шейка-покрытие-вкладыш»/В.И. Кубич, Л.И. Ивченко // «Ольвійський форум-2011: стратегії України в геополітичному просторі»: тези. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Том II. – С. 35-37.

5. Игнатович, С.Р. Аппаратурный комплекс для микро- и нанотестирования поверхности материалов и покрытий / С.Р. Игнатович, В.Н. Шмаров, И.М. Закиев // Технологические системы. – 2009. – №5(49). – С. 72-78

6. Кубич В.И. Металлографический анализ приповерхностных слоев подложек образцов шеек коленчатых валов ДВС / В.И. Кубич // «Тиждень науки-2011» - збірник тез науково-практичної конференції. Т.1 – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – С184-185.

Надійшла 10.11.2011