

**Кубич В.И.,  
Ивченко Л.И.**

Запорожский национальный технический  
университет

## **О МЕХАНИЗМЕ СНИЖЕНИЯ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ В ТРИБОСОПРЯЖЕНИИ «ШЕЙКА - ПОКРЫТИЕ - ВКЛАДЫШ»**

### **Постановка проблемы**

Основной целью модификации приповерхностных слоев элементов трибосопряжения «шейка-вкладыш» кривошипно-шатунного механизма двигателя внутреннего сгорания является создание таких структур, которые способны в результате контактного взаимодействия обуславливать минимальные механические потери при трении, закладывая при этом предпосылки к снижению изнашивания трибосопряжения в целом. Износ поверхностей шеек и вкладышей, в условиях их сложного контактного нагружения, сопровождающегося сменой режимов смазывания, определяет предельный зазор в трибосопряжении и лимитирует ресурс двигателя [1, 2].

Результаты предыдущих исследований трибологических процессов, протекающих в приповерхностных слоях элементов трибосопряжения «шейка-покрытие-вкладыш», модифицированных компонентами покрытия, в условиях смены нагружения и режимов смазывания в зоне трения, показали следующее. В результате контактного взаимодействия компонентов покрытия и антифрикционного слоя вкладыша в их приповерхностных слоях формируются вторичные структуры, разделяемые граничным «выделенным слоем», с изменяющимися по глубине механическими свойствами, с эксплуатационной топографией поверхностей, обуславливающие снижение температурной напряженности и механических потерь в трибосопряжении. При этом покрытие формировалось фрикционно-механическим способом на поверхности натуральных образцов шеек коленчатых валов из комплекса материалов в составе: оловянистая бронза БрОФ4-0,25, поверхностно-активная среда %, (ат.) галлий 81, индий 19. Триботехнические испытания проводились на машине СМЦ-2 по схеме «шейка-вкладыш» с подачей смазочного материала и без него. Шейки изготовлялись электроэрозионным способом из восстановленных под ремонтный размер коленчатых валов рядных двигателей ЗМЗ (материал чугуна ВЧ50), V-образных двигателей ЗИЛ (материал сталь 45). В качестве образцов-вкладышей использовались цельные сталеалюминевые вкладыши с антифрикционным сплавом АО20-1, материал основы сталь 0,8 кп. В качестве смазочного материала использовалось моторное масло LUKOL-STANDARD SAE 15W/40 SF/CC. Время испытаний составляло  $105 \pm 0,1$  мин, частота вращения образца-шейки  $675 \pm 10$  мин<sup>-1</sup>, давление в контакте менялось от 0,46 МПа до 2,46 МПа. Средняя величина площади трения для трибосопряжений из образцов элементов конструкции двигателя ЗИЛ составила  $S_2 = 5,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, из образцов ЗМЗ –  $S_1 = 3,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> [3, 4, 6, 7]. Рентгеноспектральный анализ приповерхностных слоев элементов модельных трибосопряжений, испытанных ранее по схеме «ролик-колодка» с использованием рассматриваемых материалов, показал следующее. Химический состав вторичных структур, образующихся при их контактном взаимодействии, определяется активностью галлиево-индиевой среды, а распределение в них химических элементов: ки-слорода, олова, алюминия, меди, индия галлия указывает на протекание комплекса механо-физико-химических процессов. При этом также наблюдалось снижение интенсивностей изнашивания образцов и повышение износостойкости трибосопряжений в целом [5].

Таким образом, полученные результаты указывают на то, что комплекс механо-физико-химических процессов, протекающих в контактных слоях образующихся вторичных структур, подтвержденный сведениями о характере изменения их триботехнических характеристик, механических свойств по глубине, формируемой эксплуатационной топографии, послыного перераспределения химических элементов, лежит в основе раскрытия механизма снижения трения и изнашивания в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш». Однако сведения о характере распределения химических элементов во вторичных структурах, образованных контактным взаимодействием поверхностей натуральных образцов элементов трибосопряжений, испытанных в условиях контактного взаимодействия, приближенных к эксплуатационным режимам работы, в настоящее время отсутствуют.

Данный факт вызывает необходимость в проведении рентгеноспектрального анализа поверхностных слоев испытанных натуральных элементов трибосопряжений, и их продуктов контактного взаимодействия.

Полученные результаты позволят дополнить сведения о составе вторичных структур и раскрыть механизм снижения трения и изнашивания в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш», в котором покрытие сформировано из комплекса материалов в составе: оловянистая бронза БрОФ4-0,25, поверхностно-активная среда %, (ат.) галлий 81, индий 19.

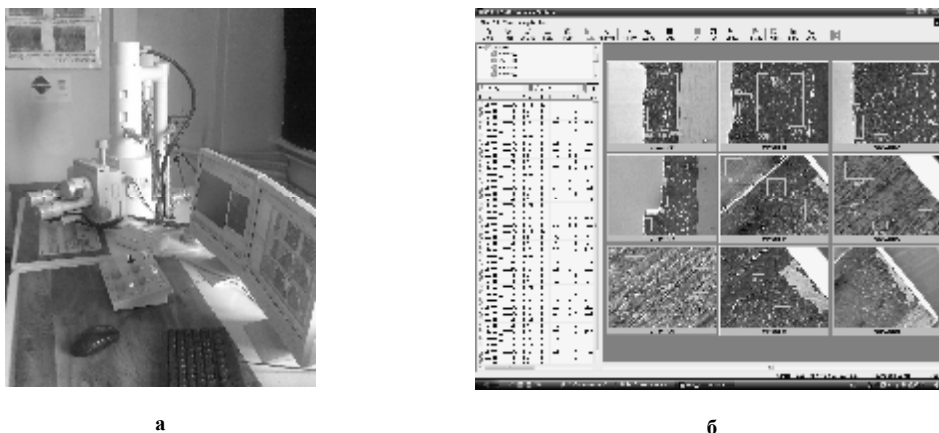
### **Методы исследования**

Для выполнения рентгеноспектрального анализа использовалась установка РЭММА JEOL JSM-6360 LA с режимом линейного перемещения зонда  $U = 15$  кВт,  $I = 50$  нА, с программным обеспечением

ем обработки и регистрации данных JED-2300, рис. 1. Глубина проникновения рентгеновского луча в анализируемые слои для химических элементов составляла:  $h_{Al} \approx 2,0$  мкм;  $h_{Fe,Sn,In} \approx 0,7$  мкм;  $h_{Cu,Ga} \approx 0,6$  мкм.

Аналізу подвергались:

- слой медьсодержащей структуры, формируемый на поверхности образцов шеек;
- слой антифрикционного покрытия образцов вкладышей;
- продукты контактного взаимодействия материалов образцов исследуемых трибосопряжений.



**Рис. 1 – Общий вид установки РЭММА JSM-6360 LA:**  
а – аппаратный комплекс в составе микроскопа, мониторов контроля данных измерений;  
б – окно программного обеспечения

Сканирование осуществлялось в автоматическом режиме, как по контактной поверхности образцов, так и по поперечному шлифу. Поперечные шлифы выполнялись на торцевых поверхностях фрагментов образцов, изготовленных электроэрозионным методом.

Пробы продуктов взаимодействия, мазками размером  $2,5 \times 2,5 \times 0,2$  мм, откладывались на стеклянных подкладках размером  $15 \times 15$  мм, тщательно высушивались и размещались в камере микроскопа. Химический состав, концентрацию элементов определяли по зонам (точкам). Распределение зон (точек) сканирования обуславливалось необходимостью получения наиболее полной картины послойного и локального характера распределения химических элементов.

### Результаты исследований и обсуждение

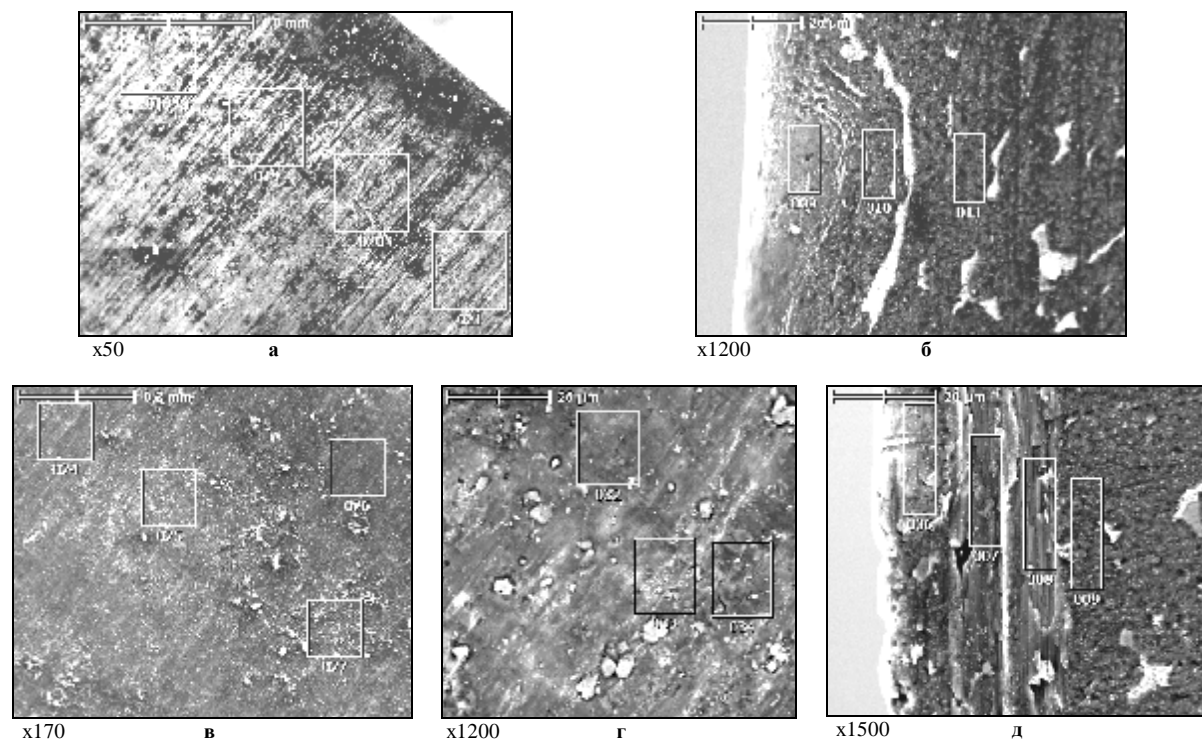
На рис. 2, а - д приведены примеры фотографий характерных для поверхностей образцов вкладышей, их поперечные шлифы, а в табл. 1 распределение химических элементов по сканируемым зонам.

Анализ структур, изображенных на фотографиях и характера распределения химических элементов показал:

- поверхность вкладыша, контактирующего с поверхностью шейки без покрытия, отличается наличием направленных следов трения – полос, чего не наблюдается на поверхности вкладышей, контактируемой с покрытием шейки – зоны ровные без упорядоченных следов, однако присутствуют фрагментальные выступы;
- структура шлифа вкладыша, контактирующего с поверхностью шейки без покрытия, существенно отличается от структуры колодки, контактирующей с покрытием наличием ее упорядоченности – слои четко выраженные, параллельные поверхности, в отличие от ее структуры с деформационной искаженностью со следами пластического течения.
- содержание кислорода, как на поверхности, так и в глубину  $\sim 50$  мкм для вкладышей, контактируемых с поверхностью шейки без покрытия практически одинаковое  $\sim (3 - 4) \%$ , что не наблюдается для колодок, контактируемых с покрытием – заметное увеличение содержания кислорода до  $\sim (7 - 13) \%$  на поверхности, и послойным его распределением по толщине образовавшейся структуры;
- поверхность вкладыша, контактируемой с покрытием, обедняется алюминием в 1,2 - 1,4 раза, обогащается оловом в 1,4 - 1,5 раза, обогащается медью в 1,3 - 1,4 раза; содержание серы и кремния, как составляющих масла, остается практически неизменным; увеличивается содержание железа  $\sim$  в 2 раза (природа увеличения: растворимость пиков подложки шейки и движение вместе с потоком легирующих элементов на поверхность покрытия, а уже с него на поверхность вкладыша);
- если по глубине шлифа вкладыша, контактирующего с шейкой без покрытия, от 0 до 50 мкм имеет место увеличение процентного содержания алюминия с  $\sim (70 - 94) \%$ , то по глубине шлифа вкла-

дыша, контактирующего с покрытием, процентное содержание алюминия изначально больше на глубине ~ (8 - 10) мкм в 1,4 раза, и снижается примерно до такого же процентного состава на глубине ~ (30 - 35) мкм;

- если по глубине шлифа вкладыша, контактирующего с шейкой без покрытия, от 0 до 50 мкм имеет место снижение процентного содержания олова с ~ (30 - 4) %, то по глубине шлифа вкладыша, контактирующего с покрытием, процентное содержание олова увеличивается с минимального количества с ~ 2 % до ~ 9 %.



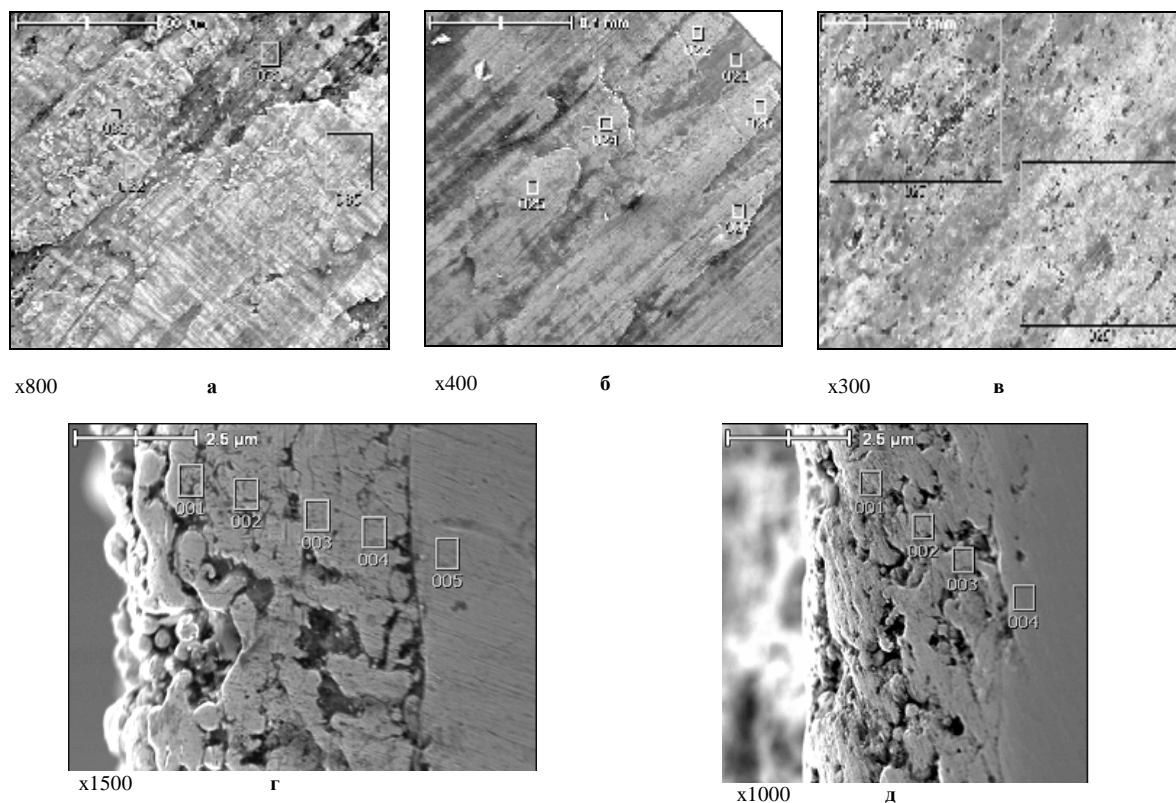
**Рис. 2 – Фотографии анализируемых слоев вкладышей:**  
**а** – поверхность вкладыша, испытанная с поверхностью шейки без покрытия;  
**б** – поперечный шлиф вкладыша, испытанного с поверхностью шейки без покрытия;  
**в, г** – поверхность вкладыша, испытанного с поверхностью шейки с покрытием;  
**д** – поперечный шлиф вкладыша, испытанного с шейкой с покрытием

Таблица 1

### Распределение химических элементов в слоях вкладышей

Номер позиции рисунка	Номер зоны	Химические элементы							Всего, %
		O	Al	Si	S	Fe	Cu	Sn	
а	018	5,03	66,95	1,61		1,08	3,69	21,64	100
	019	3,62	69,46	1,21	0,43	1,29	3,55	20,44	100
	020	3,62	71,99	0,60	0,43	1,80	4,46	17,10	100
	021	3,80	71,97	-	-	1,54	3,56	19,13	100
б	009	3,57	66,88	-	-	-	-	29,56	100
	010	3,23	81,93	-	-	-	-	14,84	100
	011	3,01	92,55	-	-	-	-	4,44	100
в	024	11,23	47,21	1,26	0,55	3,08	5,41	31,27	100
	025	12,81	47,84	0,81	0,51	2,99	5,60	29,43	100
	026	12,03	50,92	1,06	1,06	2,68	4,02	28,23	100
	027	13,60	51,31	0,97	0,87	2,78	5,85	24,51	100
г	032	5,73	75,57	-	0,73	1,87	-	16,11	100
	033	7,18	54,95	0,71	0,52	3,57	4,36	28,71	100
	034	9,25	58,59	1,09	0,84	3,35	3,07	23,81	100
д	006	1,56	94,86	-	-	-	1,22	2,35	100
	007	3,56	84,95	-	-	1,59	3,85	6,04	100
	008	1,25	85,78	-	-	1,26	3,94	7,78	100
	009	3,74	86,87	-	-	-	-	9,39	100

На рис. 3, а - д приведены фотографии состояния покрытия на поверхности шеек, их поперечных шлифов, а в табл. 2 – распределение химических элементов по зонам сканирования.



**Рис. 3 – Фотографии анализируемых слоев шеек:**  
 а, б – поверхность шейки образца шейки ЗИЛ после испытания;  
 в – поверхность шейки образца шейки ЗМЗ после испытания;  
 г – поперечный шлиф покрытия на шейке ЗМЗ; д – поперечный шлиф покрытия на шейке ЗИЛ

Таблица 2

**Распределение химических элементов в слоях покрытия шейки**

Номер позиции рисунка	Номер зоны	Химические элементы								Всего, %
		O	Al	Si	Fe	Cu	Ga	In	Sn	
а	31	4,29	-	-	6,98	9,2	73,54	5,99	-	100
	32	0,16	-	-	5,65	48,06	42,41	3,72	-	100
	33	0,65	-	-	85,77	2,02	10,73	0,82	-	100
	35	2,01	-	-	6,16	41,98	44,35	5,5	-	100
б	22	0,29	-	-	7,33	76,49	6,83	0,91	8,14	100
	23	-	-	0,38	99,62	-	-	-	-	100
	24	0,61	-	-	2,17	76,46	9,97	2,08	8,71	100
	25	1,09	-	-	2,69	62,54	17,99	6,97	8,73	100
	26	0,47	-	-	4,64	78,34	7,21	0,29	9,05	100
	27	0,43	-	-	5,2	80,54	4,98	0,2	8,65	100
в	25	1,41	2,41	0,67	67,5	9,69	14,35	1,83	2,15	100
	26	1,37	3,24	0,55	51,45	12,28	28,48	2,62	-	100
г	1	0,54	-	-	39,63	59,82	-	-	-	100
	2	0,34	-	0,21	30,31	69,14	-	-	-	100
	3	0,34	-	0,1	40,71	58,85	-	-	-	100
	4	0,46	-	0,69	60,85	38	-	-	-	100
	5	-	-	1,26	98,74	-	-	-	-	100
д	1	0,17	0,32	-	12,29	87,23	-	-	-	100
	2	0,42	-	-	24,96	74,62	-	-	-	100
	3	0,58	-	-	28,96	70,46	-	-	-	100
	4	-	-	-	100	-	-	-	-	100

Анализ структур, изображенных на фотографиях и характера распределения химических элементов показал:

- поверхностное строение, структурирование по поперечным шлифам как для образцов шеек ЗМЗ, так и для образцов ЗИЛ однообразное;

- поверхность покрытия в определенной степени гладкая с явно выраженным плоскостным строением, слегка перфорированным угловатыми углублениями  $\sim (1,0 - 1,5)$  мкм малой насыщенности -  $\sim (2 - 5)$  % на  $0,1 \text{ мм}^2$ ;

- поверхностная структура  $\sim (1,5 - 2,0)$  мкм образована химическими элементами в средних соотношениях: железо 5,1 %, медь 64,5 %, галлий 15,2 %, индий 2,54 %, олово 8,4 %, алюминий 2,8 %, кислород 1,18 % рассредоточенными над подложкой основного материала шеек;

- поперечный шлиф покрытия представляет собой фрагментально уплотненную структуру материала (просматриваются неоднородности в виде пор неправильно округлой формы) с шаровидными округлениями на поверхности, образованную только из меди и железа с очень малым содержанием кислорода.

На рис. 4, а, б приведены фотографии состояния «выделенного слоя», образованного контактным взаимодействием испытываемых поверхностей элементов трибосопряжений, а в табл. 3 – осредненное распределение в нем химических элементов по зонам сканирования.

Анализ структур, изображенных на фотографиях и характера распределения химических элементов показал:

- вид «выделенного слоя» как для образцов шеек ЗМЗ, так и для образцов ЗИЛ однообразен и имеет чешуйчатое строение, частицы которого располагаются параллельно друг к другу;

- состав имеет алюминиево-оловянистую основу с соотношением элементов  $\sim 2:1$ , насыщенную углеродом, кислородом, медью и галлием.

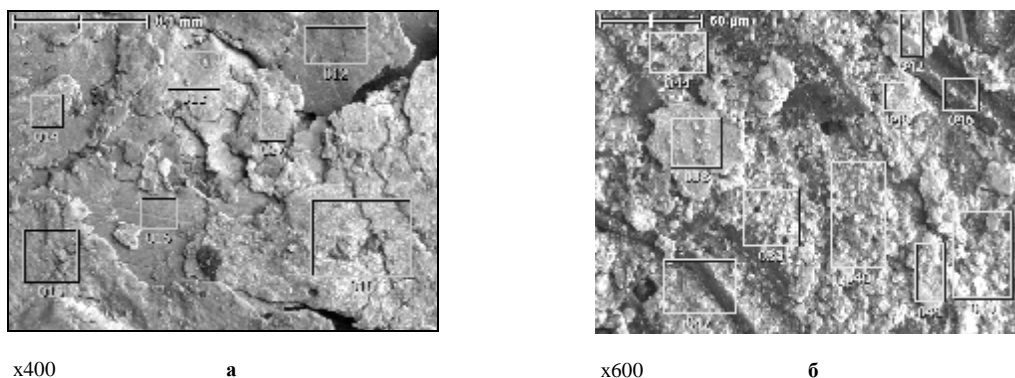


Рис. 4 – Фотографии продуктов «выделенного слоя»:

а – укрупненные частицы;  
б – локализованное строение

Таблица 3

Распределение химических элементов в продуктах «выделенного слоя»

Номер позиции рисунка	Номер зоны	Химические элементы						Всего, %
		C	O	Al	Ga	Sn	Cu	
а	12-18	4,4	4,2	59,6	-	28,6	3,2	100
б	38-47	19,5	10,1	45,3	2,7	22,4	-	100

В целом полученные результаты анализа приповерхностных слоев медьсодержащего покрытия на шейке, продуктов их контактного взаимодействия с антифрикционным составом вкладыша, сравнение их с ранее полученными данными [5], при проведении триботехнических испытаний модельных образцов, свидетельствуют о том, что:

- без подачи масла в зону трения поверхностей образцов галлий находится в пещерообразных образованиях в теле структуры покрытия;

- при подаче масла, при частичном разгрузке трибосопряжения, увеличении зазора в нем, действии центробежных сил, при проявлении свойств жидкотекучести при рабочей температуре, галлий выходит из пещерообразных образований, оставляя, при этом, следы по их границам черного цвета и сосредотачивается в приповерхностных слоях глубиной  $\sim (0-2,0)$  мкм;

- галлий является связующим как для химических элементов на поверхности образовавшейся структуры: индий, олово, алюминий, образуя металлическую смазку, так и для химических элементов «выделенного слоя»;

- образующиеся поры на плоскостях контурных площадок контактируемых поверхностей насыщаются легирующими элементами их материалов, способствуют удержанию молекул масла, активизации образования их молекулярных слоев.

### Репрезентация механизма снижения трения и изнашивания в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш»

Данные, полученные ранее в результате анализа изменений триботехнических характеристик, топографии поверхностей [3, 6], механических свойств по глубине [4, 7] взаимодействующих слоев материалов элементов трибосопряжения, результаты проведенного рентгеноспектрального анализа позволили представить картину их контактного взаимодействия, и обосновать механизм снижения трения и изнашивания, рис. 5.

В результате контактного взаимодействия локальных зон медьсодержащего покрытия с зонами антифрикционного слоя вкладыша в условиях разрушения молекулярных слоев масла, происходит их деформирование, приводящее к протеканию структурных превращений под воздействием основного компонента – галлия.

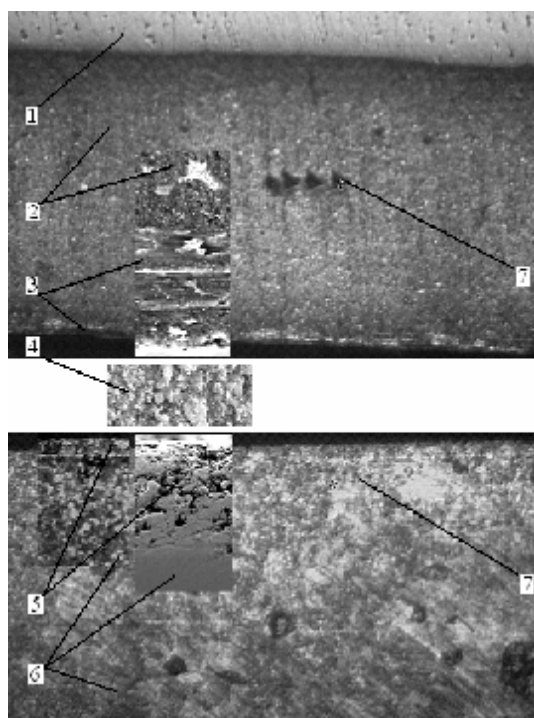


Рис. 5 – Картина контактного взаимодействия поверхностей элементов трибосопряжения «шейка-вкладыш»:

- 1 – основание антифрикционного слоя вкладыша;
- 2 – материал антифрикционного слоя вкладыша, x600, x1500;
- 3 – структура, сформированная в приповерхностном слое,  $h \approx 25$  мкм;
- 4 – продукт «выделенного слоя», x400;
- 5 – слой медьсодержащей структуры на поверхности шейки, x600 ( $h \approx 8$ ) мкм, x1000 ( $h \approx 5$  мкм);
- 6 – основной материал шейки, x250, x600, x1200;
- 7 – дорожки от уколов индентором прибора «Микрон-гамма»

Галлий снижает поверхностную, приповерхностную и внутреннюю энергию взаимосвязей между элементами материалов, придавая им тем самым подвижность и возможность перемещаться как внутри образующихся структур, так и удерживаться по возможности на поверхности контактных зон. Это приводит к перестройке структурного состояния как материала покрытия на шейках – обеднение легирующими элементами и сосредоточение их на поверхности, образующейся пещерообразной структуры, так и формированию вторичных структур из материала антифрикционного слоя вкладышей на их поверхности. В тоже время под формирующейся вторичной структурой на шейках также происходят процессы, приводящие с приспособляемостью подложки к данным условиям трения. Это вызвано распространением области термического и механического влияния в глубину поверхности при тангенциальной прочности адгезионной связи с ней элементов покрытия. Поскольку это возможно при соответствующих механических свойствах образующейся поверхностной вторичной структуры – эластичность и прочность, иначе бы она не удерживалась в зоне контакта, то таковые ей присущи. Приведенное обуславли-

вает подстройку свойств подложки к условиям трения и отсутствие возможного направленного потока дефектов кристаллического строения, обуславливающего повреждение поверхности контакта.

Создающиеся трением вторичные структуры в поверхностном слое вкладыша достаточно пластичны ближе к поверхности контакта, глубина  $\sim (0 - 7)$  мкм, со вторичными структурами на поверхности шейки. На пещерообразной поверхности вторичной структуры шейки, на малой глубине  $\sim 2$  мкм, сосредоточены химические элементы «выделенного слоя», обуславливающие также зоны пониженной пластичности в матрице более упругих областей. Взаимодействие таких структур способствует образованию зон контакта с контурными площадями, приближенными к номинальным, а скольжение осуществляется по плоскостям сдвига менее прочных слоев структур. При этом «выделяющийся слой» является проводником для переноса химических элементов со структуры вкладыша на структуру шейки и наоборот – обеспечивая режим пассивации, и обуславливая тем самым сравнимо низкий коэффициент трения без подачи масляной среды. Изменения в потоках энергий между взаимодействующими вторичными структурами, что нарушает режим пассивации – унос из зоны трения химических элементов, образующаяся система способна регулировать за счет имеющихся запасов материала на поверхностях элементов трибосопряжений.

В трибосопряжениях, у которых медьсодержащее покрытие на поверхности шеек отсутствует, протекают процессы, связанные с упрочнением антифрикционного слоя вкладышей, движением дефектов, что вызывает более упругое деформирование и разрушение элементов геометрии поверхности шеек, приводящих к увеличению износа.

### Выводы

В результате проведенного рентгеноспектрального анализа шлифов натуральных образцов установлено наличие и характер распределения химических элементов: кислорода, меди, галлия, индия, олова, алюминия, железа во вторичных структурах, образованных контактным взаимодействием компонентов исходного покрытия на шейках и антифрикционного слоя вкладыша, и в выделенных ими продуктах.

Полученные сведения дополнили представления о проявляющихся антифрикционных, механических свойствах вторичных структур, образующихся из комплекса материалов в составе: оловянистая бронза БрОФ4-0,25; поверхностно-активная среда %, (ат.): галлий 81, индий 19 в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш», и дали возможность раскрыть в нем механизм снижения трения и изнашивания.

Механизм снижения трения и изнашивания в трибосопряжении «шейка-покрытие-вкладыш» обусловлен структурированием материалов элементов трибосопряжений, и активируется адгезионно-когезионными процессами, обусловленными влиянием галлиево-индиевой среды.

### Литература

1. Кубич В.І. Про вплив вмісту компонентів галієво-індієвого середовища на триботехнічні характеристики трибоз'єднання / В.І. Кубич, Л.Й. Івченко // Проблеми тертя та зношування. – 2009. – Вип. № 52. – С. 92-101.
2. Лукинский В.С. Прогнозирование надежности автомобилей / В.С. Лукинский, Е.И. Зайцев. – Л.: Политехника, 1991. – 224 с.
3. Кубич В.І. Износостойкость деталей трибосопряжения «шейка-вкладыш» с медьсодержащими покрытиями / В.І. Кубич, Л.І. Івченко // Проблеми трибології. – 2011. – № 2. – С.103-110.
4. Кубич В.І. О механических характеристиках приповерхностных слоев элементов трибосопряжения «шейка-покрытие-вкладыш» / В.І. Кубич, Л.І. Івченко // Проблеми трибології. – 2011. – № 4. – С. 97-102.
5. Кубич В.І. Рентгеноспектральный анализ приповерхностных слоев элементов трибосопряжений / В.І. Кубич, Л.І. Івченко // Проблеми трибології. – 2011. – № 1. – С. 6-11.
6. Кубич В.І. О топографии поверхностей элементов трибосопряжений / В.І. Кубич, Л.І. Івченко // «ІV Українсько-Польські Наукові Діалоги»: міжнар. наук. конф., 11-14 жовт. 2011 р.: тези наук. праць. – Хмельницький - Яремче: Хмельницький національний університет, 2011. – С. 154-155.
7. Кубич В.І. Топография поверхностей элементов трибосопряжений энергетических машин / В.І. Кубич, Л.І. Івченко, В.І. Закиев // Вестник двигателестроения. – 2011. – №1. – С. 8-14.

Надійшла 11.05.2012