

В.Б. Тарельник, д.т.н., профессор (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина) Б. Антошевский, д.т.н., профессор (Политехнический университет, г. Кельце, Польша) В.С. Марцинковский, к.т.н., доцент (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина) П. Карп, магистр (Политехнический университет, г. Кельце, Польша) А.В. Дзюба, магистр (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

## Формирование прирабочных покрытий бронзовых вкладышей подшипников скольжения

*Предложены новые способы формирования на поверхностях трения бронзовых вкладышей подшипников скольжения комбинированных электроэрозионных покрытий, снижающих силу трения в период приработки при различных нагрузках.*

**Ключевые слова:** подшипник скольжения, бронзовый вкладыш подшипника, прочность сцепления, прирабочные покрытия, износ.

*Zaproponowano nowe sposoby formowania na powierzchniach tarcia brązowych wkładów łożysk ślizgowych kombinowanych elektroerozyjnych powłok, które zmniejszają siłę tarcia w okresie przyrobienia przy różnych obciążeniach.*

**Ключові слова:** підшипник ковзання, бронзовий вкладиш підшипника, міцність зчеплення, прирабочні покриття, знос.

*New methods are offered of forming on the surfaces of friction of bronze slideway, of bearing, of slidewaies of the combined electro-erosive coverages, reducing force of friction in the period of earning extra money at the different loading.*

**Keywords:** slideway, bronze, bearing, coupling durability, coverages, wear.

### Постановка проблемы

Большинство ответственных деталей и узлов центробежных компрессоров, насосов, турбин и других машин работают при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях коррозионного, абразивного и других видов воздействия рабочих сред. Решение проблемы, связанной с увеличением сроков их службы, напрямую зависит от повышения износостойкости и надежности узлов трения. При большом разнообразии условий работы деталей наиболее нагруженным у них является поверхностный слой. Поэтому реальный ресурс работы машины напрямую зависит от несущей способности поверхностей деталей, которая определяется качеством их поверхностного слоя. Создание поверхностных слоев с особыми свойствами для элементов узлов трения скольжения обуславливает важность и актуальность проблемы, а также необходимость ее решения.

Антифрикционные свойства трущихся пар зависят от сочетания материалов вала, подшипника и смазки.

Подшипниковые материалы работают в паре со стальными или чугунными цапфами валов. Стоимость вала, как правило, выше стоимости вкладыша подшипни-

ка (ВП), поэтому они должны изнашиваться меньше чем вкладыши [1].

Основными общими требованиями, предъявляемыми к материалам подшипников скольжения (ПС), являются:

- взаимная совместимость материала подшипника и контртела;
- возможность получения высокой точности и чистоты обработки;
- стабильность и малая величина коэффициента трения;
- высокие противозадирные свойства;
- высокая теплоустойчивость, высокая коррозионная и эрозионная стойкости, стойкость к воздействию вибраций;
- технологичность, доступность и дешевизна, высокая размерная и структурная стабильность;
- соответствие коэффициентов линейного расширения подшипниковой пары, прирабатываемость, восстанавливаемость свойств после вынужденного контакта, отсутствие электростатического притяжения на поверхностях трения [2].

Основные требования, предъявляемые к антифрикционным сплавам, определяются условиями работы ВП. Эти сплавы должны иметь достаточную твердость, но

не очень высокую, чтобы не вызвать сильного износа вала; сравнительно легко деформироваться под влиянием местных напряжений, т.е. быть пластичными; удерживать смазочный материал на поверхности.

Для производства вкладышей ВП используются различные антифрикционные материалы. Изменение типа и марок сплавов происходит под влиянием ужесточающихся условий работы подшипниковых узлов. Подшипниковые сплавы на основе меди обладают более высокими механическими характеристиками по сравнению с баббитами, а также сплавами на основе цинка и алюминия.

Для изготовления подшипников турбин, электродвигателей, центробежных насосов, компрессоров, работающих с постоянной нагрузкой, применяют оловянные бронзы (ГОСТ 5017-74), оловянно-цинково-свинцовистые бронзы (литейные) (ГОСТ 613-65) и бронзы безоловянные (ГОСТ 18175-78) [3].

Перегрев подшипника является основной причиной его разрушения, так как с повышением температуры понижается вязкость масла и увеличивается вероятность заедания цапфы в подшипнике, что в конечном результате приводит к выплавлению вкладыша [4].

В цехе производства слабой азотной кислоты завода «Невинномысский Азот» для газотурбинной установки ГТУ-8 демпферные подшипники из баббита Б83, конструкция которых не выдерживала кратковременное повышение температуры до 250°C, были заменены на бронзовые состава БрО10С10. Анализ их работы показал, что повреждаемость бронзовых вкладышей проявляется в виде затрудненной прирабатываемости, повышенного износа и большой вероятности образования задира.

Таким образом, возникает необходимость формирования на бронзовых ВП специальных покрытий, улучшающих условия приработки.

#### Анализ результатов последних исследований и гублякаций

С целью повышения триботехнических характеристик при изготовлении и ремонте многих подшипников скольжения на слой бронзы наносят прирабочные слои баббита ионно-плазменным методом [5, 6].

В [7] исследованы электроосажденные покрытия сплавом SnSbCu, по химическому составу близким к баббиту Б83. Полученные покрытия обладают высокой износостойкостью на этапе приработки. Потеря массы полученного сплава при трении в 4 раза меньше чем у литого баббита Б83.

Существенным недостатком баббитов является их малое сопротивление усталости, особенно при температуре более 100°C. С уменьшением толщины заливки подшипника сопротивление усталости увеличивается [8, 9].

Для нанесения антифрикционных покрытий достаточно перспективным является метод электроэрозионного легирования (ЕЕЛ), который все шире используется в промышленности [10].

Комплекс позитивных специфических особенностей метода ЕЕЛ, в первую очередь таких, как возможность нанесения на металлические поверхности любых токопроводящих материалов прочно соединенных с основой, проведения процесса легирования в локальном месте, отсутствие поводков и короблений легированного изделия стимулируют все большее его применение для повышения качества ПС [11-20].

Одним из основных достоинств метода ЭЭЛ является то, что он позволяет производить поочередное легирование металлических поверхностей отдельно взятыми электродами и таким образом формировать

на них квазимногослойные покрытия, обладающие необходимыми свойствами [21-24].

В свинцовых бронзах свинец практически не растворяется в жидкой меди. Поэтому сплавы после затвердевания состоят из кристаллов меди и включений свинца. Такая структура бронзы обеспечивает высокие антифрикционные свойства. Это предопределяет широкое применение бронзы БрС30 для изготовления вкладышей ПС, работающих с большими скоростями и при повышенных давлениях. По сравнению с оловянными подшипниковыми бронзами теплопроводность бронзы БрС30 в 4 раза больше, поэтому она хорошо отводит теплоту, возникающую при трении [25].

Серебро обладает высокими механическими и антикоррозионными свойствами, но как антифрикционный металл его нельзя считать вполне удовлетворительным. Антифрикционные свойства серебра улучшаются от присадки небольшого количества свинца. Серебро применяется в подшипниках для высоких нагрузок и скоростей [26].

При изготовлении ВП и подшипниковых шеек роторов компрессоров и насосов всегда имеются отклонения от их идеальной геометрической формы, которые называются погрешностями. Дополнительные неточности привносятся при установке ротора. Накопление погрешностей значительно снижает реальную площадь контакта шейки вала и вкладыша подшипника, что является причиной перенапряже-

ния антифрикционного слоя, особенно в период приработки.

Таким образом, целью данной работы является повышение долговечности бронзовых ВП, путем исследования качества квазимногослойных прирабочных покрытий, сформированных методом ЭЭЛ.

#### Методика исследований

Для исследования возможности нанесения на бронзовые вкладыши ПС прирабочных покрытий из мягких антифрикционных материалов в качестве материала катода использовались оловянные бронзы Бр ОЦС 5-5-5 и Бр ОС 10-10. Их механические свойства, согласно ГОСТу 613-79, представлены в табл. 1.

Используемые для исследований материалы анода, а также некоторые их физико-механические свойства занесены в табл. 2.

Для исследования структуры и измерения твердости поверхностного слоя использовали шлифы образцов после ЭЭЛ. ЭЭЛ образцов производили на установке с ручным вибратором модели «Элитрон 22А».

При изготовлении поверхность шлифа была ориентирована перпендикулярно к поверхности легирования. Перед изготовлением шлифа для исключения краевого эффекта при легировании торец образца фрезеровали на глубину не менее 2 мм. Для предупреждения смятия слоя, завалов края образец крепили с контргтелом в струбцине.

После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась

Таблица 1. Механические свойства и применяемость оловянных бронз

Марка	Способ литья	Временное сопротивление $\sigma_0$ , МПа	Относительное удлинение после разрыва $\delta_0$ , %	Твердость по Бринеллю НВ,	Применяемость
БрО5Ц5С5	В кокиль	176,2	4	60	Арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников
БрО5Ц5С5	В песчаную форму	147	6	60	
БрО10С10	В кокиль	196	6	78	Подшипники скольжения, работающие в условиях высоких удельных давлений
БрО10С10	В песчаную форму	176,2	7	65	

**Таблица 2. Физико-механические свойства материалов, применяемых при ЭЭЛ в качестве анода (легирующего электрода)**

Марка материала	Температура плавления, °С	Твердость по Бринеллю НВ	Теплопроводность, Вт / (м·К)	Коэффициент линейного расширения, $10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>
Медь	1084	88	401	16,5
Серебро	817	25	453	14,2
Олово	232	5	59,8	22
Свинец	327	4	35	28,5
Баббит Б83	370	27-30	-	23,0

оценка качества слоя, его сплошность, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюротрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды при различной нагрузке.

Толщину слоя покрытия измеряли микрометром, а шероховатость поверхности – на приборе профилографе-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм.

Качественный анализ и количественный состав приработочных покрытий на образцах из бронзы ОЦС 5-5-5 проводился на сканирующем электронном микроскопе РЭММА-102 производства ОАО «SELMI», оснащенного рентгеновским спектрометром на базе кремний литиевого полупроводникового детектора.

Микрофотографии с участков поверхности исследуемых образцов получены с различным увеличением, в режиме формирования изображения током вторичных электронов при ускоряющем напряжении на электронной пушке микроскопа 20 кВ и токе зонда (пучка) 200 пико Ампер. При этом на поверхности покрытия выбирались 3 характерные точки (ровное покрытие, шероховатое покрытие, пора) и в каждой точке определялся поэлементный состав нанесенного слоя.

Кроме этого, поэлементный состав нанесенного слоя определялся по глубине слоя с различным шагом сканирования.

В режиме рентгеновского микроанализа ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток пучка 1 нано Ампер. Возбуждаемое электронным пучком характеристиче-

ское рентгеновское излучение детектировалось полупроводниковым детектором.

Расчет весовых (массовых) процентов концентрации осуществлялся методом сравнения исследуемых образцов с эталонами. При этом учитывались физические поправки на атомный номер, поглощение излучения и флуоресценцию (метод трех поправок).

Трибологические свойства приработочных покрытий определяли на тестере Т-01М по схеме шарик – диск (рис. 1).

Образцы для исследований (диски) представляли собой кольца размером 42 x 25 x 6 мм, изготовленные из бронзы БрО10С10 (рис. 2).

Испытывались следующие серии образцов:

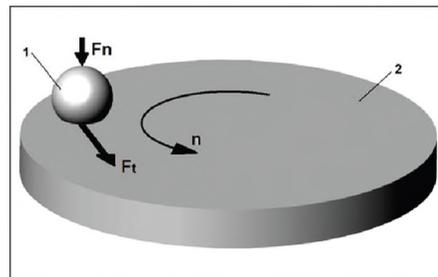
- образец без покрытия (0);
- образец с покрытием медь + серебро + медь (№ 1);
- образец с покрытием свинец + медь (№ 2);
- образец с покрытием свинец + серебро + медь + серебро (№ 3).

Шарик  $\varnothing=6,3$  мм, изготовленный из материала 100Cr6 (табл. 3) менялся после каждого испытания.

В процессе исследований использовали следующие рабочие

параметры тестера: скорость вращения  $\omega = 120$  об/мин; нагрузка  $T$  изменялась после каждых 50 м и составляла: 0,5 кгс (4,91 Н); 1,0 кгс (9,81 Н); 1,5 кгс (14,72 Н); 2,0 кгс (19,69 Н) и 2,5 кгс (24,53 Н).

Образцы перед каждым увеличением нагрузки смазывали каплей парафинового масла. В процессе



**Рис. 1. Схема пары трения трибологического тестера Т-01 М: 1 – шарик, 2 – диск**



а



б

**Рис. 2. Бронзовые образцы до (а) и после испытаний (б)**

**Таблица 3. Состав материала шарика**

	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S max	P max
min	0,95	0,15	0,20	1,35	-	-	-	-
max	1,10	0,35	0,40	1,60	0,10	0,40	0,025	0,025

**Таблица 4. Поэлементный состав покрытия в характерных точках и со всей исследуемой поверхности**

Исследуемая точка, участок поверхности	Элементы, %				
	Cu	Zn	Ag	Sn	Pb
1	32.857	1.262	23.939	38,673	3.269
2	25.391	1.448	20.984	49.606	2.571
3	27.97	3.441	15.291	50.094	3.201
$\Sigma$	26.854	2.920	16.939	50.347	2.940

испытаний регистрировали силу трения  $F$ .

В первом эксперименте для каждого прирабочного покрытия изменяли только нагрузку и испытания проводили одним шариком по одной дорожке трения, а во втором эксперименте - для каждой новой нагрузки менялся шарик и поверхность покрытия.

### Результаты исследований

В результате проведенных исследований предложен новый способ обработки бронзовых вкладышей подшипников скольжения, который осуществляется следующим образом. Сначала на рабочей поверхности ВП из бронзы ОЦС 5-5, микротвердость которых составляет 1100-1150 МПа, методом ЭЭЛ наносят покрытие из серебра при энергии разряда 0,1-0,3 Дж. Микротвердость сформированного поверхностного слоя при этом снижается и составляет 750-800 МПа.

После этого на покрытие из серебра этим же методом и при такой же энергии разряда 0,1-0,3 Дж наносят покрытие из меди. Микротвердость покрытия после нанесения меди незначительно увеличивается и составляет 850-900 МПа.

Третьим слоем наносят электроэрозионное покрытие из оловянного баббита при энергиях импульса 0,01-0,04 Дж. При этом медь, которая входит в состав покрытия, образует с оловом, которое есть основным компонентом оловянных баббитов, твердый раствор замещения, обеспечивая гарантированную металлическую связь.

Нанесение оловянного баббита способствует получению механической смеси по эвтектической реакции на основе серебра, которая состоит из  $\epsilon$  фазы и Sn с температурой плавления близко 220°C.

Микротвердость структуры после нанесения электроэрозионного покрытия из оловянного баббита составляет 350-380 МПа. Свинец, который содержится в бронзе, практически не растворяется в серебре и находится в свободном состоянии.

Таким образом, получают комбинированное электроэрозионное покрытие (КЭП), которое не является сплошным (гомогенным) слоем, а находится в виде дискретных зон с максимальной толщиной 30 мкм, то есть формируется регулярный микрорельеф поверхности, структура вершин которого имеет микротвердость - 350-380 МПа.

На рис. 3 показаны бронзовые вкладыши подшипников скольжения без покрытия (верхний ряд) и с КЭП (нижний ряд).

На рис. 4 показана топография участка поверхности образца с КЭП, на которой выбраны 3 характерные точки (1 - гладкая поверхность, 2 - шероховатая поверхность, 3 - пора).

Спектр поверхности и поэлементный состав в характерных точках и со всей исследуемой поверхности приведен в табл. 4, из которых видно, что во всех характерных точках присутствуют элементы, входящие в состав КЭП.

Распределение элементов по мере углубления в поверхностный слой с шагом сканирования 5 мкм представлено в табл. 5.

Как видно из табл. 4 и 5, поверхностный слой на бронзовом образце, образованный поочередным нанесением методом ЭЭЛ серебра, меди и баббита, состоит из элементов легирующих электродов и подложки. Толщина прирабочного покрытия составляет 30 мкм.

Применение ВП, обработанных предлагаемым способом, не всегда приводит к желаемому результату из-за малой толщины покрытия. В жесточенных условиях работы ПС (большие обороты и высокие давления)

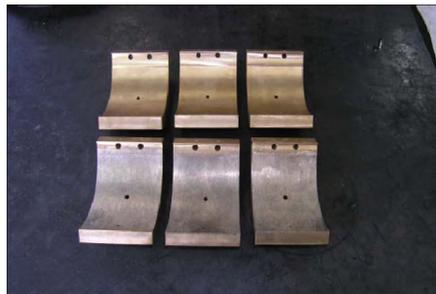


Рис. 3. Бронзовые вкладыши подшипников скольжения

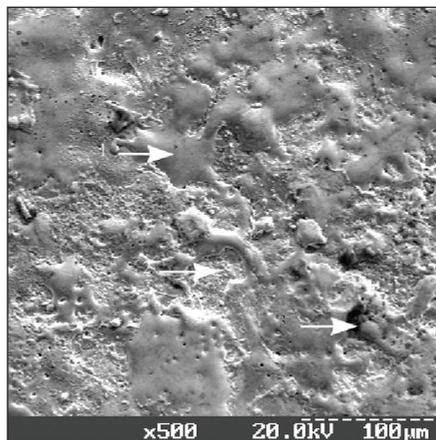


Рис. 4. Топография участка поверхности образца с КЭП из серебра, меди и баббита Б83

при приработке может произойти задир рабочей поверхности ВП.

При формировании прирабочного покрытия с использованием электродов из серебра и свинца способ нанесения КЭП осуществляется следующим образом.

Сначала на рабочие поверхности вкладышей наносят электроэрозионное покрытие из серебра при энергии разряда  $Wu = 0,1 - 0,3$  Дж. После этого на серебряное покрытие этим же методом наносят покрытие из свинца при энергиях разряда - 0,3 - 0,4 Дж. Третьим слоем наносят электроэрозионное покрытие из серебра при энергии разряда  $Wu = 0,04 - 0,10$  Дж.

Таким образом получают КЭП с максимальной толщиной до 120 мкм.

На рис. 5 и 6 показаны, соответственно, поверхность и торец участка поверхности бронзового образца с КЭП из свинца и серебра.

Поэлементный состав покрытия в характерных точках поверх-

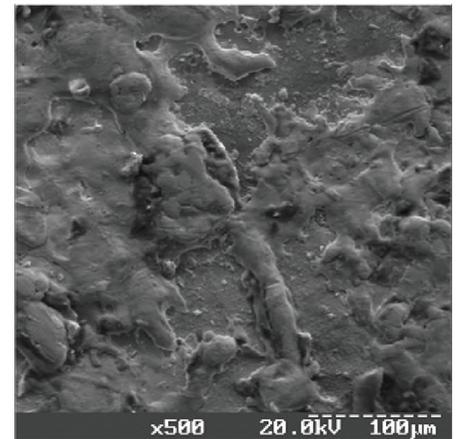


Рис. 5. Изображение поверхности бронзового образца с КЭП во вторичных электронах

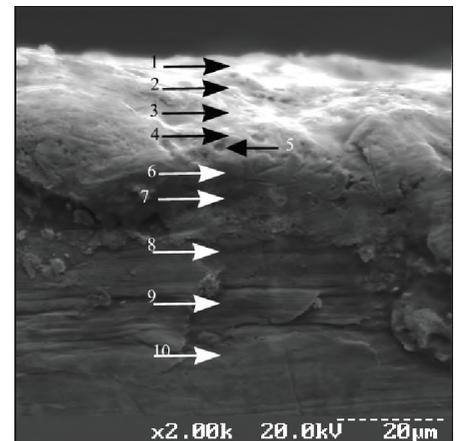


Рис. 6. Точки сканирования поэлементного состава покрытия по глубине слоя

ности и распределение элементов по мере углубления представлены в табл. 6 и 7.

В результате металлографических исследований установлено, что при нанесении на бронзовую подложку КЭП из серебра и свинца поверхностный слой состоит из трех зон (рис. 7).

Верхний слой (слой пониженной твердости) с микротвердостью 600 МПа распространяется на глубину 70...80 мкм. Ниже располагается переходная зона (зона повышенной твердости) с микротвердостью 1270...1400 МПа, глубиной 50...60 мкм. Микротвердость в переходной зоне повышается за счет закалочных процессов, происходящих в результате ЭЭЛ. По мере углубления микротвердость в переходной зоне снижается и переходит в микротвердость основы (1050...1100 МПа).

Ниже представлены результаты трибологических исследований.

Эксперимент 1. На рис. 8 показан характер изменения силы трения для всех серий образцов при прохождении стальным шариком пути трения равного 50 м для каждой нагрузки. В данном случае при изменении нагрузки контактирующие поверхности шарика и образца не изменялись. Для данных пар трения в табл. 8 представлены средние силы трения  $F$  и коэффициенты трения  $\mu$ .

На рис. 9 представлен сводный график зависимостей сил трения стального шарика по поверхности



**Рис. 7. Микроструктура и распределение микротвердости поверхностного слоя образца из бронзы ОЦС 5-5-5**

**Таблица 5. Поэлементный состав покрытия по мере углубления в поверхностный слой**

Исследуемая точка поверхности	ЭЛЕМЕНТЫ, %				
	Cu	Zn	Ag	Sn	Pb
1	61.832	1.909	6.070	27,247	2.942
2	73.057	3.679	3.070	18,269	1.924
3	55.913	2.288	7.430	28.903	5.466
4	63.844	2.828	0.892	26,344	6,092
5	78.721	5.618	0.000	13,13	2.531
6	84.492	5.244	0.737	7.169	1.303
7	86.832	6.084	0,000	5,355	1.729

**Таблица 6. Поэлементный состав покрытия КЭП из серебра и свинца в характерных точках поверхности**

Исследуемая точка поверхности	ЭЛЕМЕНТЫ, %				
	Cu	Zn	Ag	Sn	Pb
1	0.911	0.000	16,472	0.000	82.616
2	20.630	1.818	47.659	3.504	22.827
3	24.399	2.040	49.416	4.838	16.364

бронзового диска с приработочными покрытиями и без покрытия от приложенной нагрузки.

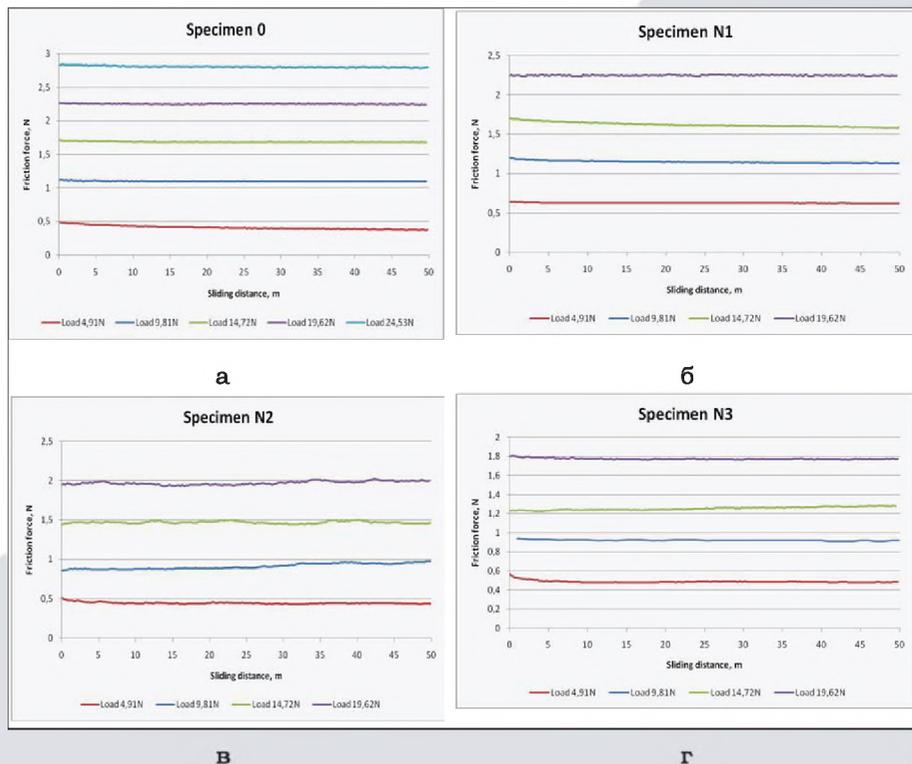
Анализируя рис. 8 и 9, а также данные табл. 8 можно отметить следующее:

– для всех серий образцов и нагрузок сила трения с момента

начала пути трения до его завершения снижается, что свидетельствует о периоде приработки;

– с увеличением нагрузки для всех серий образцов сила трения возрастает;

– наименьшая сила трения у образцов серии № 2 и 3 и толь-



**Рис. 8. Изменение силы трения стального шарика по поверхности бронзового диска при различных нагрузках: а – серия 0; б – серия № 1; в – серия № 2; г – серия № 3**

Таблица 7. Поэлементный состав покрытия по глубине поверхностного слоя

Исследуемая точка поверхности (рис. 6)	Элементы, %				
	Cu	Zn	Ag	Sn	Pb
1	22.284	0.000	45.894	0.000	31.822
2	52.032	0.000	24.064	0.000	23.904
3	48.569	0.000	24.318	0.000	27.113
4	44.892	0.000	37.820	0.000	17.288
5	60.235	2.011	17.760	0.000	19.993
6	69.678	2.273	9.035	3.384	15.630
7	50.181	1.739	28.917	1.584	17.578
8	83.297	3.998	1.909	2.652	8.144
9	87.348	3.726	0.603	6.749	1.572
10	90.937	3.579	0.166	4.777	0.542

Таблица 8. Сила трения и коэффициент трения стального шарика по поверхности бронзового диска и приработочного покрытия (same track)

Load, T (N)	Average friction force, F (N)	Friction coefficient $\mu=F/T$
Серия 0		
4,91	0,41	0,083
9,81	1,11	0,113
14,72	1,69	0,115
19,62	2,25	0,115
24,53	2,81	0,114
Серия № 1		
4,91	0,62	0,127
9,81	1,15	0,117
14,72	1,62	0,110
19,62	2,25	0,115
Серия № 2		
4,91	0,44	0,091
9,81	0,91	0,093
14,72	1,47	0,100
19,62	1,97	0,100
Серия № 3		
4,91	0,49	0,099
9,81	0,92	0,094
14,72	1,25	0,085
19,62	1,77	0,090

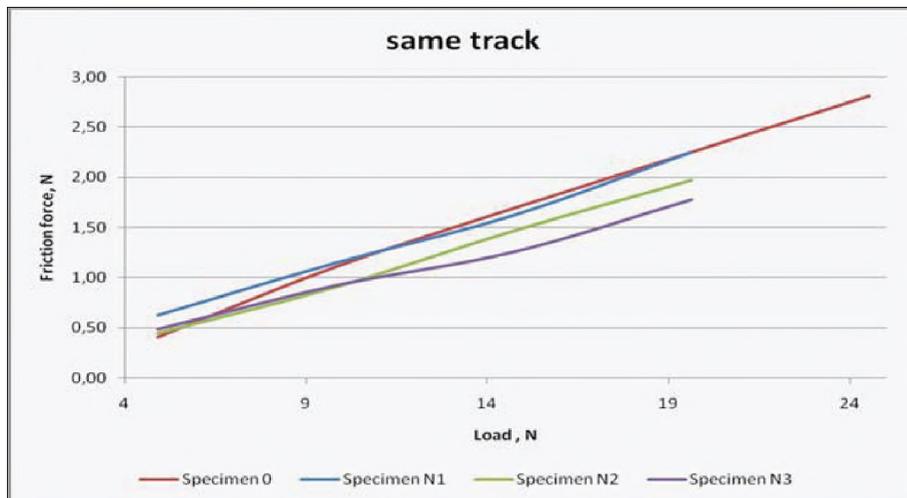


Рис. 9. Зависимость силы трения от нагрузки

Таблица 9. Сила трения и коэффициент трения стали по бронзовым образцам с приработочными покрытиями (new track)

Load, T (N)	Average friction force, F (N)	Friction coefficient $\mu = F/T$
Серия 0		
4,91	0,43	0,087
9,81	0,93	0,095
14,72	1,46	0,099
Серия № 1		
4,91	0,63	0,127
9,81	0,93	0,095
14,72	1,45	0,098
Серия № 2		
4,91	0,44	0,091
9,81	0,71	0,073
14,72	1,14	0,077
Серия № 3		
4,91	0,49	0,099
9,81	0,76	0,078
14,72	1,22	0,083

ко при нагрузке 4,91 N у серии 0 и № 2 (табл. 8), что объясняется различием исходной шероховатости поверхности ( $R_a = 0,5; 0,7; 0,8$  и  $0,8$  мкм, соответственно для серий 0; № 1; № 2 и № 3).

Эксперимент 2. На рис. 10 показан характер изменения силы трения для всех серий образцов при прохождении стальным шариком пути трения равного 50 м при различных нагрузках, а на рис. 11, а их сводный график. Кроме этого на рис. 11б; в; и г изображены диаграммы, позволяющие сравнивать силы трения всех серий образцов, соответственно, при нагрузках 4,91; 9,81 и 14,72 Н.

Следует отметить, что в данном случае при изменении нагрузки изменяли контактирующие поверхности шарика и образца. Для данных пар трения в табл. 9 представлены средние силы трения  $F$  и коэффициенты трения  $\mu$ .

В данном случае, анализируя рис. 10 и 11, а также данные табл. 9, видно, что характер в взаимодействия стального шарика с поверхностью бронзовых образцов для всех серий не изменился. Здесь, как и в эксперименте 1, наименьшие значения силы трения у образцов серии № 2 и № 3.

#### Выводы:

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на повышение качества бронзовых вкладышей ПС установлено:

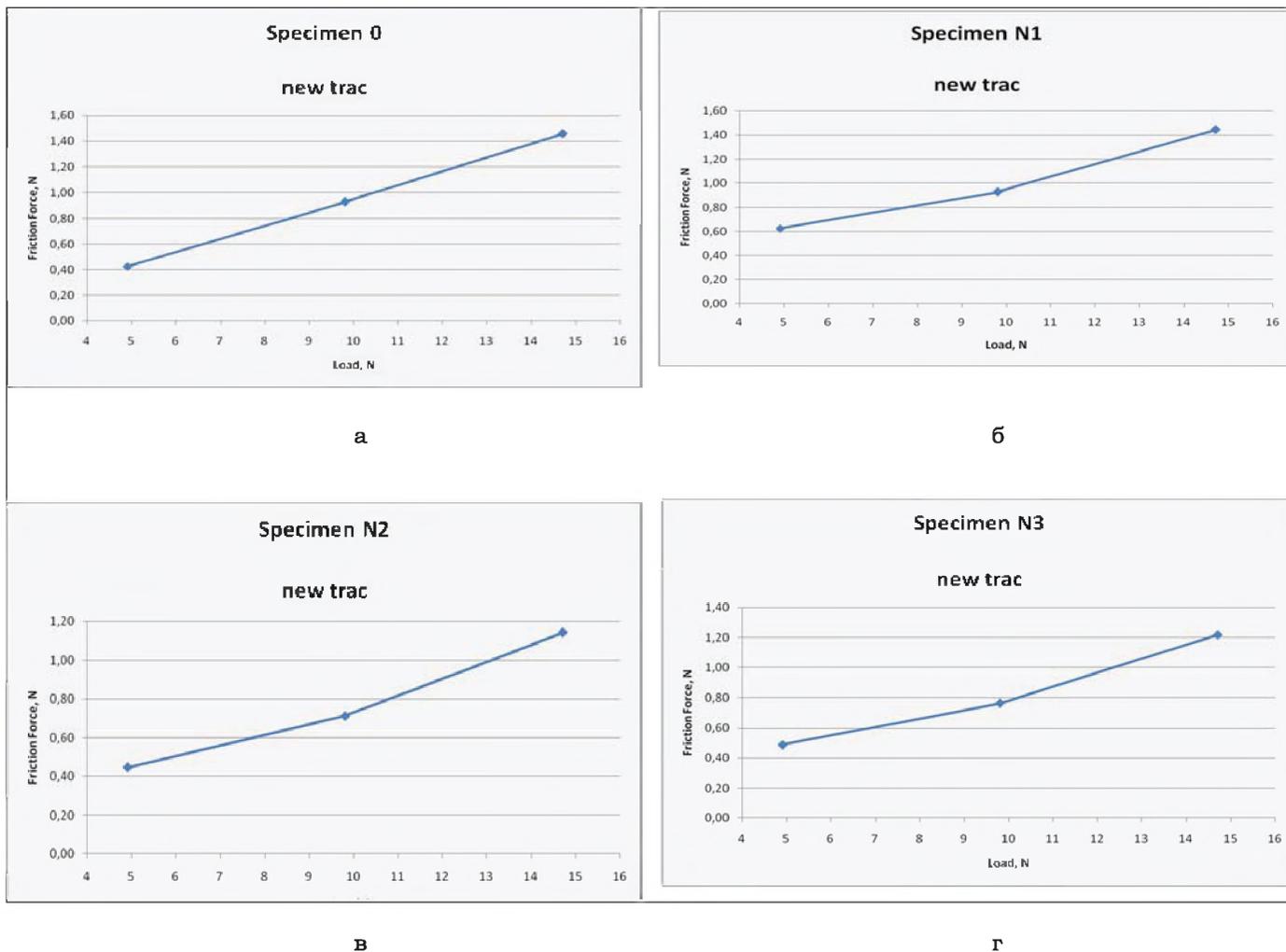
1. ЭЭЛ поверхности бронзы мягкими антифрикционными металлами: серебром, свинцом, медью позволяет формировать на ее поверхности приработочные покрытия снижающие до 20% силу трения в период приработки.

2. Толщину приработочных покрытий можно изменять режимами ЭЭЛ в пределах от 20 до 150 мкм.

3. Бронзовые вкладыши ПС, с КЭП имеют высокую надежность и долговечность при работе из-за того, что даже при разрушении покрытия подшипник продолжает работать.

#### Список литературы:

1. Тарельник В.Б. Комбинированная технология упрочнения и ремонта подшипниковых шеек роторов / В.Б. Тарельник, В.С.Марцинковский, Б. Антошевский // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2004. – №8. – С. 31-36.



**Рис.10.** Изменение силы трения стального шарика по поверхности бронзового диска при различных нагрузках: а – серия 0; б – серия № 1; в серия № 2; г – серия № 3

2. Герасименко С.С. Подшипники герметичных насосов / С.С. Герасименко, А.А. Иванов.- Минск: Наука и техника, 1989.- 159 с.

3. Воскресенский, В.А. Расчет и проектирование опор скольжения / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков.- М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.

4. Иванов М.Н. Детали машин: 5-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991.– 383 с.

5. Moschenok V.I. Bulletin of KhNAHU / V.I. Moschenok, L.B. Glushkova, O.A. Nesterenko. 38, 48 (2007). (in Russian).

6. Mahan J.E.. Physical vapor deposition of thin films. John Wiley & Sons. (2000) p. 312.

7. Валеева А.Х. Микроструктура и свойства электроосажденного сплава SnSbCu / А.Х.Валеева, И.Ш. Валеев, Р.Ф.Фазлыхметов // Письма о материалах 4(3), 2014.– С. 134-136.

8. Viacheslav Tarellynyk, Vasyl Martsynkovskyy, Aleksandr Dziuba, New Method of Friction

Assemblies Reliability and Endurance Improvement// Applied Mechanics and Materials Vol. 630 (2014). – Trans Tech Publications, Switzerland. – P. 388-396.

9. Патент України № 105422 МКВ В23Н5/00. Спосіб поліпшення припрацьовуваності пари тертя «вкладиш підшипника-шийка вала» / В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник, О.В. Дзюба / Опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

10. Тарельник В.Б. Аналіз технологій нанесення антифрикційних покриттів підшипників ковзання / В.Б. Тарельник, О.В. Дзюба // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка.- Випуск 134.– 2013.– С. 244-251.

11. Патент України № 64663А МКВ В23Н1/00. Спосіб обробки вкладише підшипників ковзання/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник/ Опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2.

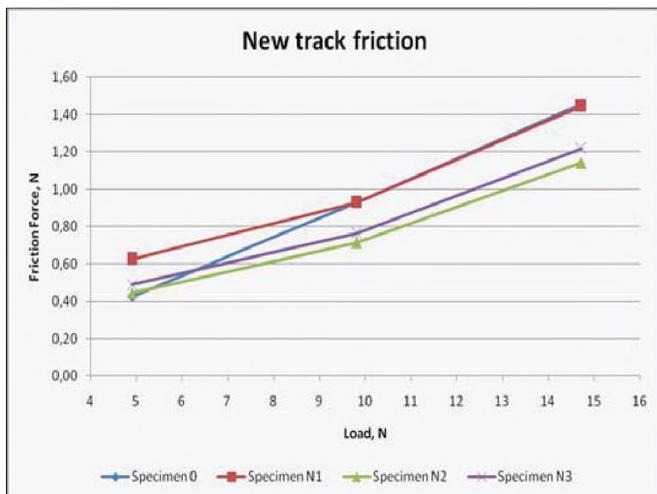
12. Патент України № 92814 МПК В23Н1/00. Спосіб обробки вкладише підшипників ковзання/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник/ Опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.

13. Патент Російської Федерації № 2404378 МПК В23Н9/00. Спосіб обробки вкладише підшипників/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник/ Опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32.

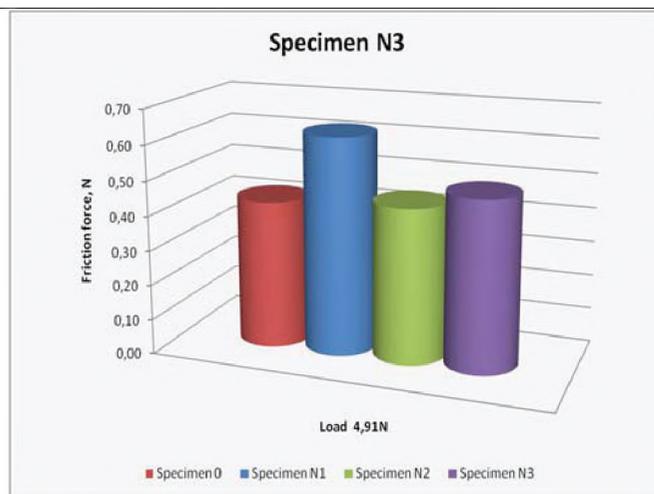
14. Патент України на винахід № 77906, В23Н1/00, 3/00, 5/00. Спосіб обробки вкладише підшипників ковзання / Марцинковський В.С./ Опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

15. Патент України на винахід № 95009, 23Н 9/00. Спосіб складання підшипника ковзання/ В.С. Марцинковський, В.Б. Тарельник, Н.В. Тарельник/ Опубл. 25.06.2011, бюл. № 12.

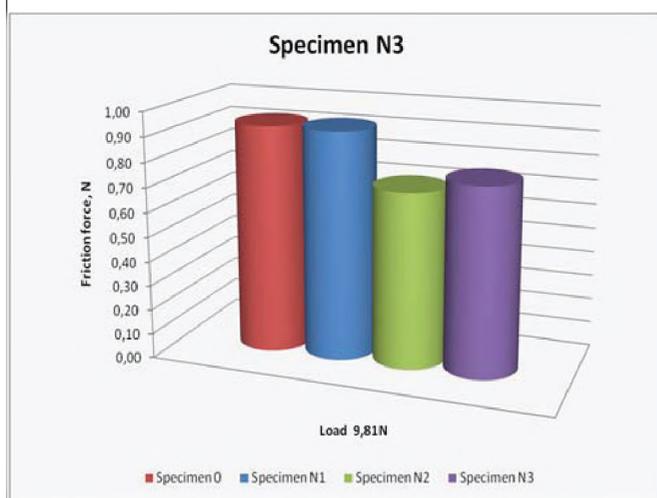
16. Патент Російської Федерації на изобретение № 2422690, с1, F16с 17/02. Спосіб сборки підшипників скольжения/В.С. Мар-



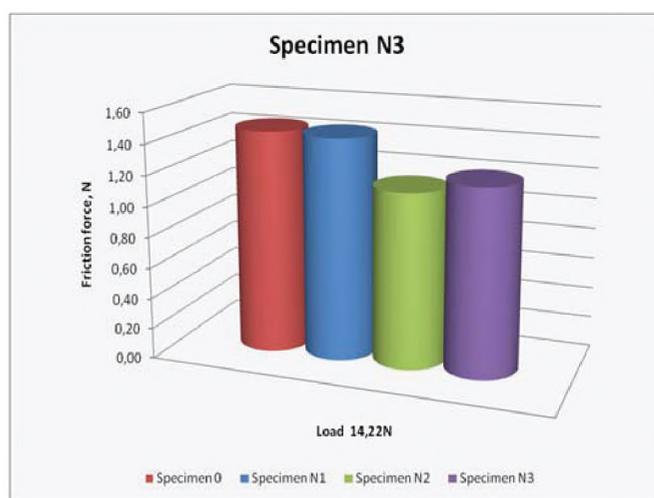
а



б



в



г

Рис. 11. Сводный график (а) и сравнительные диаграммы (б, в, г) изменения сил трения для всех серий образцов при нагрузках 4,91; 9,81 и 14,72 Н

цинковский, В.Б. Тарельник, Н.В. Тарельник/ Оpubл. 27.06.2011, бюл. № 18.

17. Патент Российской Федерации на изобретение № 2337796. МПК В 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Белоус А.В./ Оpubл. 10.04. 2008, Бюл. № 31.- Зс.

18. Патент Украины на винахід № 82948, 23С 8/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием/ В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Белоус / Оpubл. 25.03.2008, бюл. № 10.

19. Патент Российской Федерации на изобретение № 2468899. МПК В 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электро-

эрозионным легированием / Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., М.П. Братуцак/ Оpubл. 10.12. 2012, Бюл. № 34.

20. Патент Украины на винахід № 101715, 23Н 9/00. Способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием/ В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братуцак / Оpubл. 25.01.2013, бюл. № 8.

21. Патент Украины на винахід № 78155 А, В23Н 1/00, 3/00, 5/00. Способ обработки вкладышей подшипников ковзання/ Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Пчелинцев В.А./ Оpubл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

22. Патент Российской Федерации № 2299790 МПК В23Н 1/00. Способ обработки вкладышей подшипников/ В.С. Марцинковский,

В.Б. Тарельник, В.А. Пчелинцев/ Оpubл. 27.05.2007, Бюл. № 15.

23. Патент Украины на винахід № 105965, В23Н 5/00. Способ обработки вкладышей подшипников ковзання / Марцинковский В.С., В.Б. Тарельник, О.В. Дзюба / Оpubл. 15.02.2014, Бюл. № 13.

24. Патент Российской Федерации № 2524467, С1, МПК В23Н 9100. Способ обработки вкладышей подшипников скольжения/ В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, А.В. Дзюба / Оpubл. 27.07.2014, Бюл. № 21.

25. Гуляев А.П. Металловедение / М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

26. Детали машин. Под ред. Ачеркана Н.С.– Книга 2.– М.: Машиностроительной и судостроительной литературы, 1954.– 560 с.