

# Электроискровые покрытия на стальной основе и контактной поверхности для оптимизации рабочих характеристик баббитовых подшипников скольжения

\*В. Б. Тарельник<sup>а</sup>, А. В. Паустовский<sup>б</sup>, \*\*Ю. Г. Ткаченко<sup>б</sup>,  
В. С. Марцинковский<sup>а</sup>, Е. В. Коноплянченко<sup>а</sup>, \*\*\*К. Антошевский<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Сумский национальный аграрный университет,

ул. Г. Кондратьева, 160, г. Сумы, 40021, Украина, \*e-mail: [tarelnik@i.ua](mailto:tarelnik@i.ua)

<sup>б</sup>Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины,

ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03680, Украина, \*\*e-mail: [tkachenko\\_yuri@ukr.net](mailto:tkachenko_yuri@ukr.net)

<sup>с</sup>Политехника Свентокржиская,

аллея Тысячелетия Панства Польского, 7, г. Кельце, 25-314, Польша, \*\*\*e-mail: [ktrka@tu.kielce.pl](mailto:ktrka@tu.kielce.pl)

Установлено, что применение переходных слоев из меди, наносимой электроискровым методом в защитной среде аргона, улучшает теплоотвод из зоны контакта и повышает прочность соединения стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем по сравнению с традиционной технологией на 35%. Электроискровое легирование поверхности баббита Б83 индием и оловом позволило сформировать приработочные покрытия без твердых включений толщиной соответственно до 130 и 100 мкм. Новые технологические решения предоставили возможность понизить температуру в зоне трения, повысить толщину масляного слоя и таким образом создать подшипник, обладающий большей несущей способностью, надежностью.

*Ключевые слова:* электроискровые покрытия, энергия искрового разряда, массоперенос, баббитовый подшипник скольжения, прочность соединения, износостойкость подшипника.

УДК 621.9.048.669.268

## ВВЕДЕНИЕ

По статистике до 32% отказов турбокомпрессорных агрегатов, эксплуатирующихся в газовой промышленности, происходят по причине нарушения работы баббитовых подшипников скольжения, чаще всего это связано с разрушением и изнашиванием антифрикционного слоя вкладышей подшипников, что приводит к динамической неустойчивости работы оборудования. Выход из строя подшипников скольжения при нормальных условиях эксплуатации является следствием различных видов износа: кавитация, абразивный износ, изнашивание вследствие пластической деформации, усталостное изнашивание. В связи с этим проблема повышения рабочих характеристик и ресурса работы баббитовых подшипников скольжения является важной и актуальной.

Применение баббита в качестве материала антифрикционного слоя подшипников скольжения, используемых в качестве опор стальных валов агрегатов, работающих в условиях высоких нагрузок, обусловлено его высокими антифрикционными свойствами и способностью к приработке со стальным валом. Структура баббита представляет собой мягкую матрицу с включениями армирующей фазы. Матрицей являются  $\alpha$ -фаза (твердый раствор Sb и Cu в Sn), твердые включения ( $\beta$ -фаза (SnSb) и  $\gamma$ -фаза (Cu<sub>3</sub>Sn)), обеспечивающие высокую износостой-

кость [1, 2]. Опыт показал, что качество антифрикционного слоя подшипника необходимо оценивать по следующим критериям: прочностью сцепления покрытия с основой, когезионной прочностью антифрикционного слоя, пористостью, уровнем остаточных напряжений, однородностью структуры.

Традиционный способ получения баббитовых покрытий для подшипников скольжения – методы литья. Однако литейные технологии имеют ряд недостатков: не удается избежать низкой адгезионной прочности сцепления покрытия с основой, образования в слое баббита усадочных пор, литейных раковин, шлаковых включений, укрупнения зерен, структурной неоднородности, связанной с ликвацией армирующих элементов по сечению отливки. Все перечисленное, являясь концентратором напряжений, приводит в процессе эксплуатации подшипника к зарождению усталостных трещин и разрушению баббита. Поры и литейные раковины существенно снижают прочность адгезионной связи баббита с материалом основы.

С целью повышения износостойкости баббитовых подшипников исследования проводятся в трех основных направлениях. Первое – это совершенствование методов литья баббитовых покрытий, что может позволить свести к минимуму количество дефектов, образующихся в слое баббита при литье, в частности, решить

проблему ликвации армирующей фазы. Не менее важными являются и другие проблемы: повышение прочности сцепления баббитового литого слоя с основой и улучшение теплоотвода из зоны трения, а также оптимизация процесса приработки стального вала к баббитовому покрытию.

При длительном нагружении переменными усилиями усталостные трещины, возникающие на поверхности трения подшипника, распространяются в глубь слоя. Раскрытие трещин происходит под действием пульсирующего давления смазочного материала. Трещина, достигнув основания антифрикционного слоя, изменяет свое направление, распространяясь по стыку между основанием и слоем, что приводит к выкрашиванию отдельных участков поверхностного слоя и образованию поверхностных «язв», которые забиваются продуктами износа, действующими как абразив [3]. Износостойкость антифрикционного слоя баббитовых подшипников зависит от состояния и свойств промежуточного слоя в зоне соединения баббита со стальным основанием. На основании анализа существующих технологий изготовления вкладышей подшипников, изучения условий их работы и причин разрушения антифрикционного баббитового слоя было установлено, что для обеспечения прочного сцепления стальной подложки с баббитом, а также интенсификации отвода тепла из зоны трения целесообразно нанесение на стальную подложку перед лужением методом электроискрового легирования (ЭИЛ) промежуточного слоя из меди или оловянной бронзы. Важность отвода тепла связана с тем, что существенным недостатком баббитов является то, что с повышением температуры у них снижаются все показатели механической прочности, в особенности сопротивление усталости. Предварительные исследования подтвердили, что по сравнению с методами наплавки, гальванизации, металлизации и ионной бомбардировки наиболее перспективным для этой цели является электроэрозионный метод, который обеспечивает минимальное проплавление и стабильность качества нанесенного покрытия [4]. Формирование методом ЭИЛ промежуточного слоя из меди, прочно сцепленного с одной стороны со стальной подложкой, а с другой – со слоем олова, путем образования твердых растворов замещения, и баббита, обеспечивает более прочное сцепление стальной подложки с баббитом, а также более интенсивный отвод тепла из зоны трения.

Понятие «антифрикционность» включает комплекс свойств, которым должен удовлетворять подшипниковый материал. К таким свойствам, в первую очередь, относится способность

легко прирабатываться к сопрягаемой детали. При изготовлении корпусов и вкладышей подшипников скольжения, сборке механизмов всегда имеются отклонения от идеальной геометрической формы. Накопление погрешностей уменьшает реальную площадь прилегания вала к поверхности трения подшипника, тем самым снижает эффективность демпфирования и несущую способность подшипника скольжения. В процессе приработки трущейся пары увеличивается фактическая площадь контакта за счет упругого и пластического деформирования поверхностного слоя, уменьшаются сила трения, температура и интенсивность изнашивания в зоне контакта, на поверхности трения, как правило, образуются микро- и макроповреждения. К числу таких повреждений относятся локальные разрушения структурных составляющих в результате перегрузок. Так, при использовании в тонкослойных подшипниках баббита Б83 в зернах SnSb образуются микротрещины, которые впоследствии становятся очагами развития трещин уже в объеме всего слоя [5]. Формирование на поверхности баббитового слоя покрытия из индия или олова, микротвердость которых ниже микротвердости основы, и отсутствие твердых включений улучшат условия приработки вкладышей подшипников к стальному валу и повысят надежность и долговечность подшипников скольжения.

Таким образом, цель работы – повышение качества баббитовых подшипников скольжения путем формирования электроискровым методом переходных слоев, увеличивающих теплоотвод и прочность сцепления антифрикционного баббитового слоя с основой, а также прирабочных покрытий, повышающих работоспособность и способность выдерживать большие нагрузки более продолжительное время.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований служили образцы с электроискровыми покрытиями, полученными на установках «ЭИЛВ-8А» (Украина) с ручным вибратором. Для изучения структуры и свойств слоистых поверхностных слоев электроискровые покрытия наносились как в воздушной среде, так и в среде аргона на образцы 10x10x10 мм из стали 20 в состоянии поставки (175–180 HV). При этом использовали различные режимы установки при емкости накопительного конденсатора 150 и 300 мкФ и энергии разряда в пределах 0,04–0,68 Дж. Данные о режимах, используемых в работе, приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Режимы работы модифицированной установки «ЭИЛВ-8А»

Номер режима	Напряжение холостого хода $U_{х.х.}$ , В	Рабочий ток $I_p$ , А		Энергия разряда $W_p$ , Дж	
		$C = 150$ мкФ	$C = 300$ мкФ	$C = 150$ мкФ	$C = 300$ мкФ
3	30	0,5–0,6	1,6–2,0	0,04	0,08
5	47	0,7–0,8	2,0–2,2	0,10	0,20
7	67	0,9–1,0	2,4–2,7	0,20	0,40
9	87	1,1–1,3	2,6–3,5	0,34	0,68

**Таблица 2.** Серии исследуемых образцов

Номер образца	Материал	
	Основы	Покрытия
1	Сталь 20	медь (ЭИЛ) – олово (ЭИЛ)
2	Сталь 20	медь (ЭИЛ) – олово (лужение)
3	Сталь 20	бронза (ЭИЛ) – олово (ЭИЛ)
4	Сталь 20	бронза (ЭИЛ) – олово (лужение)
5	Сталь 20 – олово (лужение) – баббит	индий (ЭИЛ)
6	Сталь 20 – олово (лужение) – баббит	олово (ЭИЛ)

Подачу аргона в зону легирования проводили с помощью специального приспособления. Последовательность электроэрозионного легирования, лужения поверхности образцов и материалы электродов представлены в табл. 2.

Эрозию анода и привес катода определяли гравиметрическим методом на аналитических весах. Взвешивания производились через 30 с (до 2 мин), а затем через 60 с (до 4 мин). Перед каждым взвешиванием легирование производили на новой поверхности образца. Толщину слоя покрытия измеряли микрометром, а шероховатость поверхности – на приборе профилограф-профилометре мод. 201 завода «Калибр» путем снятия и обработки профилограмм.

Для оптимизации процесса приработки пары «вал – подшипник» на стальные образцы с баббитовым слоем методом ЭИЛ наносили покрытия из индия или олова. ЭИЛ осуществлялось в защитной среде аргона на мягких режимах легирования с энергией импульса 0,01–0,03 Дж. Нижняя граница энергии импульса ограничивается эффективностью способа, увеличение энергии разряда выше 0,03 Дж при нанесении индия или олова ведет к быстрому нагреванию и потере формы электрода из индия и резкому повышению шероховатости легируемой поверхности при использовании электрода из олова.

Центробежная заливка баббитового слоя на стальную основу, подогретую до 100–120°C и предварительно очищенную и обезжиренную, проводилась с использованием токарного станка. Температура баббита при заливке  $420 \pm 10^\circ\text{C}$ . Основание подшипника устанавливалось в патроне токарного станка и закрывалось предохранительным кожухом. Заливка баббита производилась короткой непрерывной струей.

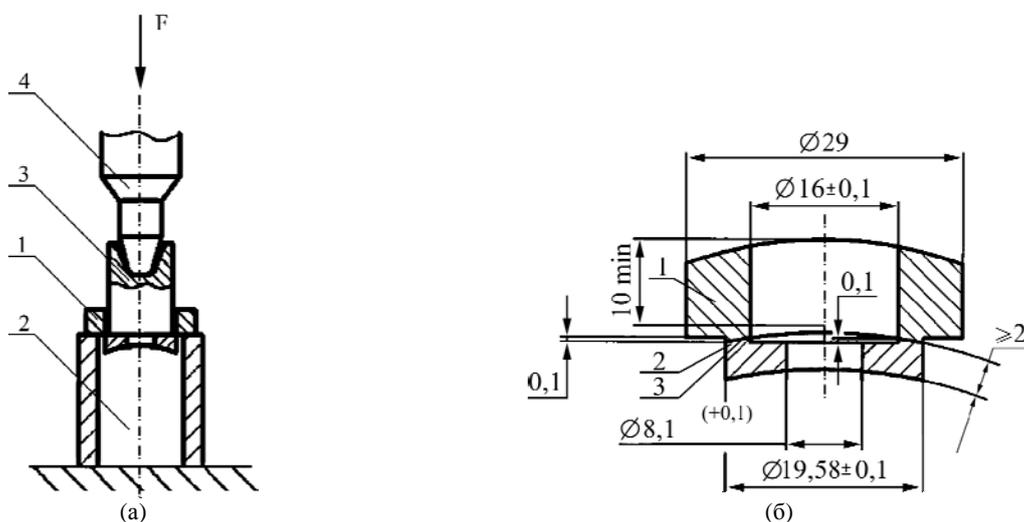
Толщина баббитового слоя составляла 2–2,5 мм, а после механообработки – 1,5–0,2 мм [6].

Металлографические исследования выполнены на оптическом микроскопе «Неофот-2» и растровом электронном микроскопе JOEL JSM-540. Проведена оценка сплошности слоя, толщины и структуры подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. На микротвердометре ПМТ-3 при различной нагрузке исследовано распределение микротвердости в поверхностном слое по глубине. Для исследования распределения элементов по глубине слоя проводили рентгеноспектральный микроанализ, основанный на регистрации характеристического рентгеновского излучения, возбужденного электронным пучком присутствующих в микрообъеме возбуждения химических элементов. При этом использовали электронный микроскоп – микроанализатор ISIS 300 Oxford instruments.

Для исследований прочности соединения баббитового слоя (баббиты Б83 и Б88) с подложкой проводили испытания по ГОСТу ИСО 4386-2-99. Для этого были сделаны заготовки подшипников скольжения размером  $\varnothing 100/\varnothing 80$  мм,  $b = 45$  мм с антифрикционными слоями на внутренней поверхности следующих четырех составов:

- 1 – сталь 20 – лужение оловом – центробежная заливка баббита (традиционная технология);
- 2 – бронза БрОЦС5-5-5 – лужение оловом – центробежная заливка баббита;
- 3 – сталь 20 – ЭИЛ медью М1 – лужение оловом – центробежная заливка баббита;
- 4 – сталь 20 – ЭИЛ бронзой БрОЦС 5-5-5 – лужение оловом – центробежная заливка баббита.

Электроискровое легирование медью и бронзой осуществляли в среде аргона. При этом



**Рис. 1.** Приспособление для испытания на прочность соединения антифрикционного слоя с основой (а): 1 – испытуемый образец; 2 – втулка опорная; 3 – промвставка; 4 – толкатель; испытываемый образец (б): 1 – основа; 2 – баббит; 3 – испытуемый переходной слой.

использовали режим с энергией разряда 0,34 Дж. В качестве электродов применялись прутки диаметром 3 мм меди М1 и бронзы ОЦ5-5-5. Схема приспособления для испытания на прочность соединения антифрикционного слоя с основой и размеры испытываемых образцов, изготовленных из втулок, представлены на рис. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### *Покрyтия в зоне контакта баббита с металлической основой*

Исследован массоперенос меди и бронзы на стальную подложку при электроискровом легировании. Опыты показали, что как на воздухе, так и в среде аргона с увеличением энергии разряда увеличивается количество перенесенного материала с анода на катод. Наиболее интенсивный массоперенос происходит в начале легирования, затем он замедляется и постепенно сменяется эрозией нанесенного ранее слоя. При легировании в защитной среде массоперенос при равенстве всех прочих условий больше. Это прежде всего свидетельствует о том, что оксиды металлов в зоне легирования препятствуют формированию поверхностного слоя.

Результаты измерения шероховатости и толщины покрытия, а также коэффициент ( $K_m = \Delta P_{\text{аргон}} / \Delta P_{\text{воздух}}$ ), учитывающий отношение привесов катода при ЭИЛ в среде аргона и на воздухе в течение 1 мин, приведены в табл. 3. Установлено, что для каждого режима работы существует рациональное время легирования ( $T_{\text{рац.}}$ ), необходимое для получения качественного покрытия. В данном случае критерием выбора времени легирования являлось получение покрытий 100% сплошности.

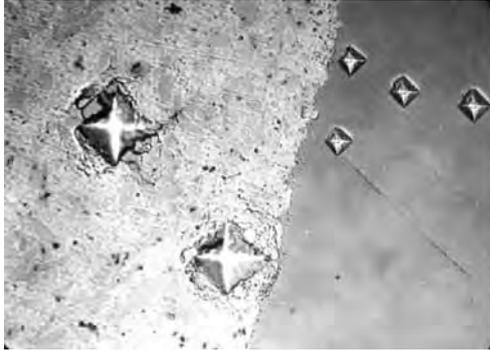
Электроды из меди и оловянной бронзы постепенно окисляются, что сказывается на качестве формируемых покрытий. Появляются прижоги, электроды механически разрушаются и отдельные частички размером до 0,2–0,5 мм «привариваются» к легируемой поверхности. Это проявляется при длительном легировании на воздухе. В среде аргона окисление практически отсутствует. В процессе работы поверхность электрода, контактирующую с легируемой поверхностью, периодически очищали от оксидов.

Установлено, что лучшее качество покрытия (сплошность, шероховатость, равномерность) достигается при нанесении покрытий в аргоне при энергии разряда 0,2–0,4 Дж, что обеспечивает 100% сплошность и шероховатость  $R_z = 8–10$  мкм. При ЭИЛ на воздухе толщина формируемых слоев составляет в зависимости от режима для меди 30–70 мкм, а для оловянной бронзы – 30–80 мкм. Сплошность слоя находится на уровне ~ 90%. В среде аргона равномерность слоя значительно возрастает, а его толщина составляет при ЭИЛ на тех же режимах для меди 20–30 мкм, а для оловянной бронзы – 30–40 мкм. Сплошность слоя при этом практически для обоих материалов электродов и применяемых режимов легирования находится на уровне 100%.

Исследование структуры электроискровых покрытий показало, что поверхностный слой стали 20 с покрытием из меди или оловянной бронзы как на воздухе, так и в среде аргона состоит из двух зон: ближе к поверхности белый слой, а под ним переходной слой. Наличие и глубина третьего слоя с повышенной микротвердостью – зоны термического влияния (ЗТВ) – зависят от величины энергии искрового разряда.

Таблица 3. Параметры поверхностных слоев при ЭИЛ стали 20 медью и оловянной бронзой

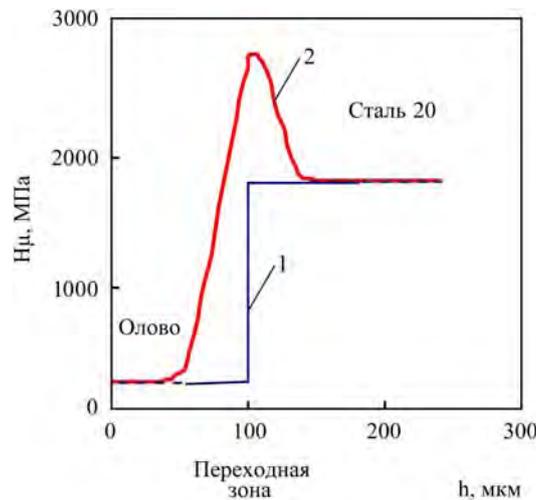
Режим	$T_{рац}$ , мин	Аргон/воздух	Шероховатость $R_z$ , мкм				Прирост $\Delta h$ , мм				$K_m$ , раз	
			медь		бронза		медь		бронза		медь	бронза
			воздух	аргон	воздух	аргон	воздух	аргон	воздух	аргон		
150 мкФ	3	2,5/3,0	8	7	10	7	0,025	0,01	0,04	0,02	0,75	1,6
	5	1,5/2,0	10	8	12	8	0,04	0,02	0,06	0,03	1,2	1,5
	7	1,0/1,2	12	9	14	9	0,05	0,02	0,07	0,03	1,3	2,3
	9	0,75/1,0	15	10	17	11	0,07	0,03	0,08	0,04	1,5	1,36
300 мкФ	3	1,5/2,0	9	7	11	8	0,01	0,01	0,01	0,01	1,0	2,0
	5	1,0/1,2	12	8	14	9	0,05	0,02	0,07	0,02	1,1	2,0
	7	0,8/1,1	16	9	19	10	0,09	0,03	0,11	0,04	1,3	1,9
	9	0,5/0,75	27	11	30	12	0,14	0,04	0,17	0,05	1,2	1,15



(а) x 400



(б) x 400



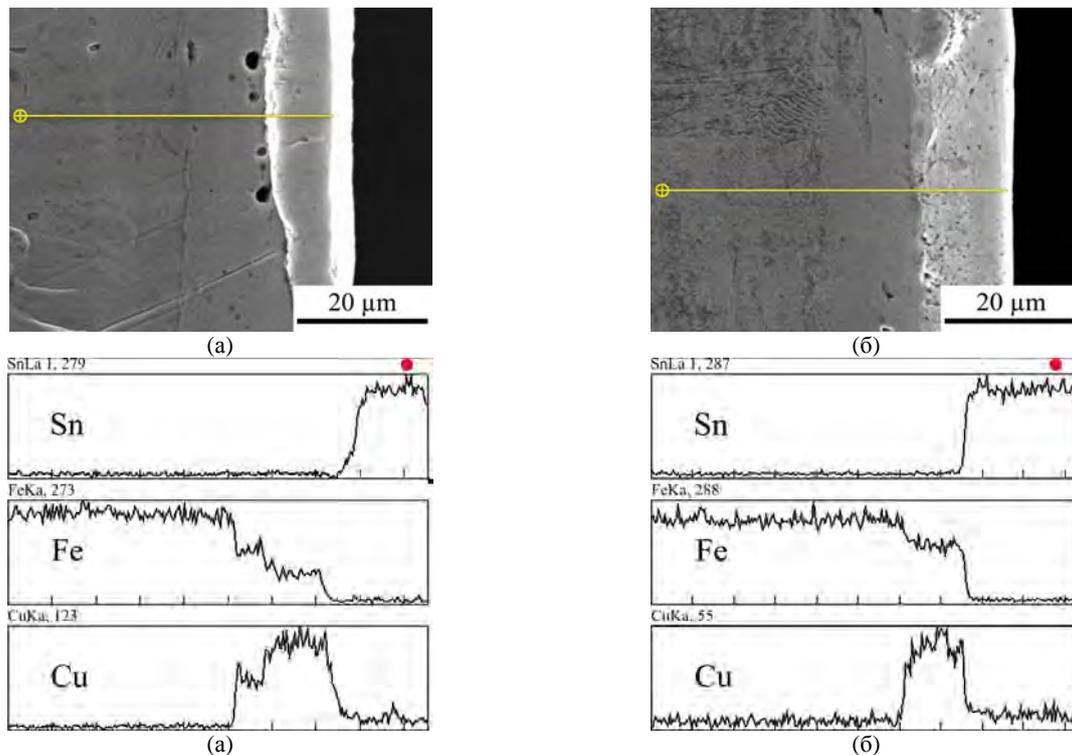
(в)

Рис. 2. Микроструктура после лужения оловом стали 20 (а) и с подслоем из меди (ЭИЛ) (б); распределение микротвердости (в): 1 – сталь-олово; 2 – сталь-медь (ЭИЛ).

ДюрOMETрический анализ показывает, что при легировании медью и оловянной бронзой в различных средах микротвердость на поверхности слоя составляет соответственно 850–900 и 1050–1150 МПа. По мере углубления в ЗТВ она плавно увеличивается до 2500–3000 МПа и затем снижается до микротвердости стали (1750–1800 МПа). Толщина ЗТВ с микротвердостью выше микротвердости основного металла при легировании на 9-м режиме на воздухе достигает 50 мкм, а в среде аргона – 40 мкм. Снижение толщины ЗТВ при легировании в среде аргона по сравнению с легированием на воздухе объясняется охлаждением зоны ЭИЛ

струей подаваемого газа. На рис. 2а,в показаны микроструктура и распределение микротвердости в граничной зоне между сталью 20 и оловом, нанесенным с использованием традиционной технологии – лужением. Переходной слой между оловом и подложкой (сталью 20) отсутствует. Микротвердость резко изменяется по величине от 310–340 (олово) до 1750–1800 МПа (сталь 20). Олово в данном случае удерживается на стальной подложке только за счет адгезии.

При ЭИЛ стали 20 медью или оловянной бронзой между оловом и медью или оловом и компонентами оловянной бронзы в диффузионной зоне образуются твердые растворы замеще-



**Рис. 3.** Вид поперечного сечения покрытий на стали 20: ЭИЛ последовательно медью и оловом (а) и ЭИЛ медью и последующим лужением оловом (б) и распределение Sn, Fe и Cu по глубине покрытий. х 2000.

ния, обеспечивающие более прочную связь. Микротвердость в переходной зоне первоначально плавно повышается от 210–230 (олово) до 2700–2800 МПа (ЗТВ), а затем постепенно снижается до микротвердости основы (рис. 2б,в).

На рис. 3а изображен наиболее характерный участок поверхностного слоя стали 20 после ЭИЛ медью и оловом в плоскости, перпендикулярной покрытию. Сформированный поверхностный слой состоит из двух зон. На поверхности располагается слой олова толщиной 10–15 мкм. Ниже находится слой, состоящий преимущественно из меди толщиной 15–20 мкм. Как в первом, так и во втором слоях есть замкнутые поры размером от долей до 3 мкм, причем поры большего размера находятся в слое меди. Исследование состава покрытия по глубине свидетельствует о том, что граничные участки между оловом, медью и сталью 20 состоят из элементов соседних слоев, что указывает на их диффузионное перераспределение в покрытии. По мере углубления в нижних слоях олова возрастает концентрация меди. На границе между медью и сталью концентрация меди снижается, а железа – возрастает.

В случае ЭИЛ стали медью и последующего лужения оловом (рис. 3б) существенных отличий в структуре сформированного поверхностного слоя не наблюдается. Исследование распределения элементов в покрытии указывает на отсутствие переходного слоя между медью и оловом. В переходной зоне от покрытия из меди к желез-

ной основе концентрация меди снижается. На том же участке плавно возрастает концентрация железа. Это свидетельствует об интенсивном перемешивании и взаимной диффузии элементов подложки и покрытия.

В случае последовательного нанесения методом ЭИЛ на сталь 20 оловянной бронзы и олова поверхностный слой состоит из двух слоев. Верхний слой толщиной 15–20 мкм из олова менее пористый, чем нижний толщиной 20–30 мкм из оловянной бронзы. Переходные участки между оловом, оловянной бронзой и сталью 20 состоят из элементов граничных слоев. В случае замены способа нанесения олова с ЭИЛ на лужение наблюдается более резкий переход от меди к олову.

Результаты испытания образцов на прочность соединения антифрикционного слоя и металлической основы представлены в табл. 4. Во всех случаях площадь поверхности соединения равна 100 мм<sup>2</sup>.

Исследования показали, что применение переходного слоя из меди, наносимого методом ЭИЛ в защитной среде (аргон), на 35% повышает прочность соединения стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем по сравнению с традиционной технологией (сталь 20 – баббит). При применении переходного слоя из бронзы прочность повышается незначительно, а при замене стальной подложки на бронзовую прочность соединения снижается.

**Таблица 4.** Прочность соединения антифрикционного слоя и металлической основы

Материал подложки и антифрикционного слоя	Прочность соединения, Н/мм <sup>2</sup>	Характер разрушения
1	2	3
Бронза ОЦС 5-5-5 – олово (лужение) – Б83	18	Разрыв по границе баббита с основным металлом
Бронза ОЦС 5-5-5 – олово (лужение) – Б83	20	Разрыв по границе баббита с основным металлом
Сталь 20 – олово (лужение) – Б83	22	Разрыв по баббиту
Сталь 20 – олово (лужение) – Б88	22	Разрыв по баббиту
Сталь 20+бронза (ЭЭЛ) – олово (лужение) – Б83	22	Разрыв по баббиту
Сталь 20+ бронза (ЭЭЛ) – олово (лужение) – Б88	24	Разрыв по баббиту
Сталь 20+медь (ЭЭЛ) – олово (лужение) – Б83	30	Разрыв по баббиту
Сталь 20+медь (ЭЭЛ) – олово (лужение) – Б88	36	Разрыв по баббиту

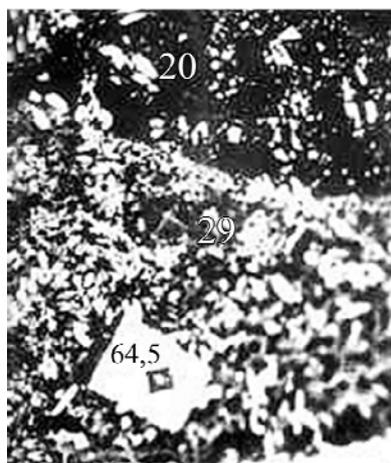
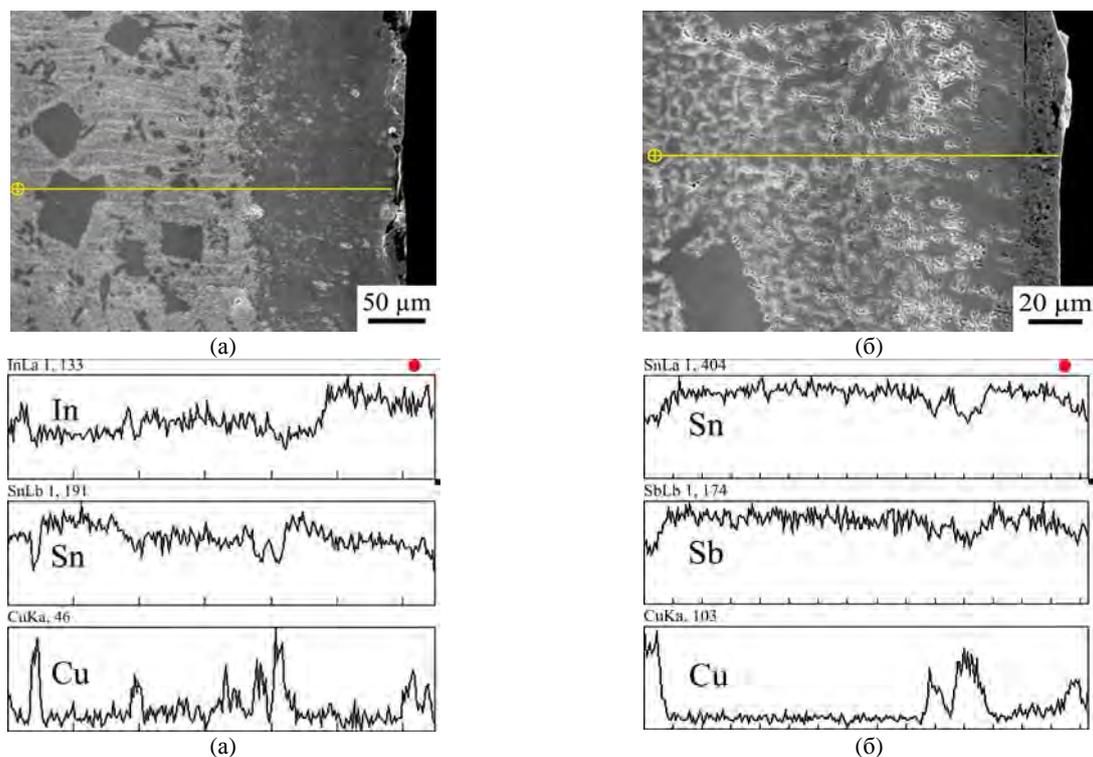
**Рис. 4.** Структура и распределение микротвердости поверхностного слоя баббита Б83, легированного индием.**Рис. 5.** Распределение элементов по глубине поверхностного слоя баббита Б83 после ЭИЛ: (а) – индием, х 350; (б) – оловом, х 750.

Таблица 5. Сравнительные характеристики подшипников турбины 103JT

Модификация подшипников	Несущая способность F, кгс	Удельное давление P, кгс/см <sup>2</sup>	Удельный расход смазки $\theta$ , л/мин х т	Вибрация ротора $\delta$ , мкм
Штатные подшипники ПО120	2300	28	15	35
Подшипники с электроискровыми покрытиями ПД120	3600	42	11	7



(а)



(б)

Рис. 6. Подшипники скольжения компрессора низкого давления: (а) – штатный; (б) – демпферный фирмы «ТРИЗ».

#### Покрyтия на поверхности баббитового слоя для улучшения приработки

С целью изучения возможности улучшения прирабатываемости подшипников скольжения на образцы стали 20 с баббитовым слоем методом ЭИЛ наносили покрытия из индия и олова. В результате легирования индием на поверхности баббита формируется слой толщиной до 130 мкм и микротвердостью  $H_{\mu} = 200\text{--}210$  МПа. При этом микротвердость нижележащих слоев баббита составляет 240–310 МПа, а твердых включений квадратной формы (SnSb) – 460–645 МПа. В случае легирования поверхности баббита оловом глубина прирабочного покрытия составляет 90–100 мкм, а микротвердость – 180–190 МПа. Микротвердость нижележащих слоев – 240–310 МПа.

На рис. 4 приведены микроструктура и распределение микротвердости поверхностного слоя баббита Б83 с прирабочным покрытием из индия, нанесенным методом ЭИЛ. Микроструктура баббита Б83 выглядит следующим образом. Темное поле представляет собой пластичную массу  $\alpha$  – твердого раствора сурьмы и меди в олове, светлые кристаллы квадратной формы являются соединением SnSb ( $\beta$ -фазой), а кристаллы в виде звездочек или удлинненных игл – соединением  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ .

На рис. 5 показано распределение элементов в поверхностном слое баббита Б83 после ЭИЛ индием и оловом. Следует отметить, что в структуре прирабочных покрытий твердые включения соединения SnSb ( $\beta$ -фазы) отсутствуют. Сформированные поверхностные слои состоят из элементов основы и легирующих элементов.

Электроэрозионная обработка поверхности баббита Б83 индием или оловом позволяет сформировать поверхностный слой толщиной соответственно до 130 и 100 мкм с микротвердостью ниже микротвердости основы, что в конечном итоге улучшает условия приработки вкладышей подшипников.

#### Использование результатов исследований в промышленности

Проведенные исследования позволили разработать технологию повышения качества подшипников скольжения высокоскоростных турбокомпрессорных агрегатов наиболее экономичными методами. Новые технологические решения дали возможность понизить температуру в зоне трения, увеличить толщину масляного слоя и таким образом создать подшипник, обладающий большей несущей способностью, надежностью, экономичным расходом смазки, что в конечном итоге положительно влияет на динамику ротора и роторной машины в целом [7, 8].

Используя результаты исследований и практический опыт, на предприятии «Товарищество решения инженерных задач» (ТРИЗ) (г. Сумы, Украина) изготавливаются демпферные опорные подшипники, которые при тех же габаритах, что и штатные, имеют более высокую несущую и демпфирующую способность во всем диапазоне режимов эксплуатации (рис. 6). Электроискровые технологии применяются для различных типоразмеров подшипников скольжения, рабочих параметров и условий работы на центробежных компрессорных и насосных агрегатах, турбинах и электродвигателях большой мощности.

Применение этих технологий в подшипниках скольжения, плавающих уплотнениях, динамических демпферах обеспечило 3-годовой гарантийный пробег компрессоров синтез-газа, входящих в состав технологических линий производства аммиака, при одновременном увеличении производительности с 1300 до 1700 т/сутки аммиака. Ранее регламентные работы предусматривались каждый год с остановкой до 30 дней. Подшипники скольжения, обладая высокой демпфирующей способностью, успешно справляются с пусковыми режимами, при этом уровень вибрации снижается до десяти раз. Несущая способность опорных подшипников с электроискровыми покрытиями в 1,5 раза выше штатных (табл. 5).

На рис. 7 показана схема антифрикционного слоя, который формируется на вкладыше подшипника скольжения. При нанесении меди и приработочного покрытия из олова используются установки «Элитрон – 22А» и «УИЛВ – 8А» производства соответственно Республики Молдова и Украины. Лужение оловом и центробежная заливка баббита производятся традиционным способом.

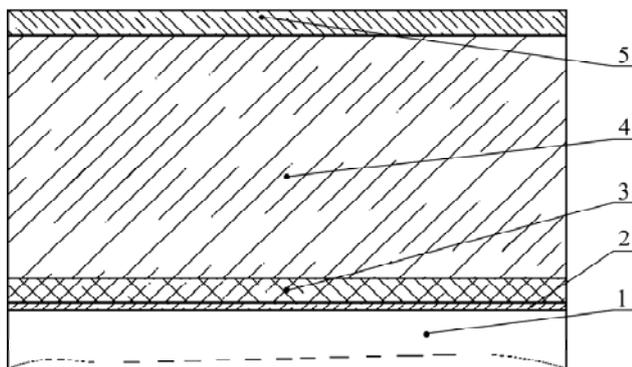


Рис. 7. Схема антифрикционного слоя вкладышей подшипников скольжения: 1 – колодка (сталь 20) – 8–25 мм; 2 – медь – 20–30 мкм; 3 – лужение (олово) – 80–100 мкм; 4 – баббит (Б83 или Б88) – 1,0–1,5 мм; 5 – приработочное покрытие (олово) – 90–100 мкм.

Подшипники с электроискровыми покрытиями используются в паровых турбинах синтез-газа на ряде предприятий Украины и России, в том числе на Одесском припортовом заводе «Азот», (г. Кемерово, «Минеральные удобрения» (г. Пермь) и других.

## ВЫВОДЫ

1. При исследовании массопереноса меди и бронзы на стальную подложку в процессе электроискрового легирования установлены оптимальные технологические режимы. Толщина формируемых слоев в зависимости от режима и среды (воздух, аргон) находится в пределах 30–80 мкм, сплошность слоя близка к 100%.

2. Исследование структуры поверхностного слоя стали с покрытием из меди или оловянной бронзы показало, что он состоит из двух зон: ближе к поверхности белый слой, а под ним переходной слой. Наличие и глубина зоны термического влияния зависят от величины энергии искрового разряда и составляют до 50 мкм. Микротвердость на поверхности слоя равна 850–1150 МПа. По мере углубления она плавно увеличивается до 2500–3000 МПа и затем переходит в микротвердость основного металла (1750–1800 МПа).

3. Показано, что применение переходных слоев из меди, наносимой методом ЭИЛ в защитной среде аргона, улучшает теплоотвод из зоны контакта и повышает прочность соединения стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем по сравнению с традиционной технологией на 35%. При замене стальной подложки на бронзовую прочность соединения снижается.

4. Установлено, что ЭИЛ поверхности баббита Б83 индием или оловом позволяет сформировать приработочные покрытия без твердых включений толщиной соответственно до 130 и 100 мкм.

5. Новые технологические решения позволили понизить температуру в зоне трения, повысить толщину масляного слоя и таким образом создать подшипник, обладающий большей несущей способностью, надежностью, экономичным расходом смазки. На предприятии «Товарищество решения инженерных задач» (ТРИЗ) (Украина, г. Сумы) изготавливаются опорные подшипники, которые имеют более высокую, чем штатные, несущую и демпфирующую способность и успешно применяются в компрессорах на ряде предприятий Украины и России.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Потехин Б.А., Илюшин В.В., Христолюбов А.С. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009, (8), 16–21.
2. Барыкин Н.П., Фазлыяхметов Р.Ф., Валеева А.Х. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006, (2), 44–46.
3. Кукушкин Е.В., Меновщиков В.А., Ереско Т.Т. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Технические науки*. 2014, 1(10), 148–150.
4. Тарельник В.Б., Дзюба О.В. *Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2013, (134), 244–251.
5. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. и др. *Трение, износ и смазка*. М.: Машиностроение, 2003. 575 с.

6. Галиахметов И.Г. *Конструкционные материалы центробежных и винтовых компрессоров. Выбор и технология их применения.* Казань: ФОН, 2009. 155 с.
7. Марцинковський В.С., Тарельник В.Б. *Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання.* UA пат. 92814 МПК В23Н1/00. 2010. Бюл. № 23. 3 с.
8. Марцинковський В.С., Тарельник В.Б. *Спосіб обробки вкладышей подшипников.* RU пат. 2404378 МПК В23Н9/00. 2010, Бюл. № 32. 3 с.

*Поступила 04.07.16*

### **Summary**

It is found, that the use of transition layers of copper, which is coated by the electric-spark method in protective

argon atmosphere, improves the heat removal from the contact area and increases the steel bases adhesion strength with antifriction babbitt layer as compared with the traditional technology by 35%. Electric-spark alloying babbitt B83 by indium and stannum allowed to form a running-in coatings without hard inclusions with thickness 130 and 100 microns, respectively. New technological solutions allow decreasing the temperature in the friction zone, increasing the thickness of the oil layer, and, as a result, creating the bearing with better load carrying capability and reliability.

*Keywords: electric-spark coating, spark discharge energy, mass transfer, babbitt friction bearing, strength of adhesion, bearing wear-resistance.*