

В.С. Марцинковский, к.т.н., доцент, академик УТА, директор (ООО «ТРИЗ», г. Сумы, Украина)

Новые методы повышения качества поверхностей ответственных деталей высокоэффективного динамического оборудования. Часть 1

Предлагаются к применению новые, малознергозатратные, экологически чистые технологии изготовления ответственных деталей и узлов динамического оборудования.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, качество поверхностного слоя, шероховатость, микротвердость.

Пропонуються до застосування нові, малоенерговитратні, екологічно чисті технології виготовлення відповідальних деталей і вузлів динамічного обладнання.

Ключові слова: електроерозійне легування, якість поверхневого шару, шорсткість, мікротвердість.

New, low-energy, environmentally friendly technologies for the manufacture of critical parts and components of dynamic equipment are proposed for use.

Key words: electroerosion alloying, surface layer quality, roughness, microhardness.

«Износ оборудования - одна из фундаментальных проблем российского химпрома... Именно поэтому для химических и нефтехимических компаний задачи, связанные с оптимизацией процессов технического обслуживания и управления ими, особенно актуальны» [1].

«Надежность оборудования, т.е. бесперебойная работа узла или агрегата в текущих условиях до следующего ремонта, позволит снизить эксплуатационные затраты нефтегазовой компании. Исследования показывают, что при повышении надежности оборудования на 5% прибыльность компании увеличивается более чем на 34%» [2]. На вложенный в повышение надежности оборудования \$ компания получает ≈6\$ прибыли. Отсюда, актуальным остается вопрос куда вложить деньги?

Одним из направлений деятельности **фирмы «ТРИЗ»**, обеспечивающих надежность работы высокоэффективных узлов динамического оборудования, соответствующего требуемому эксплуатационному уровню и обеспечивающего (2-4)-х летний непрерывный пробег, является разработка и применение технологий, гарантирующих высокое качество их изготовления и поставки.

Технологии, базирующиеся на электрофизических методах обработки деталей машин занимают отдельную нишу. Это методы: электроэрозионной обработки, исполь-

зуемые при изготовлении муфт, лабиринтных и импульсных уплотнений; электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), применяемые, как самостоятельно, так и интегрировано с методами поверхностного пластического деформирования (ППД), среди которых особого внимания заслуживают: обкатывание шариком (ОШ) и безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО), используемые для подшипников скольжения (ПС), плавающих и щелевых уплотнений.

Ниже описаны технологии, разработанные в **фирме «ТРИЗ»** и применяемые при изготовлении отдельных деталей и узлов компрессорного и насосного оборудования.

Бронзовые вкладыши подшипников (Патенты UA №78155, №105965, № 64663A, RU № 299790, № 2524467)

Для изготовления вкладышей подшипников (ВП) применяют различные антифрикционные сплавы. Изменение типа и марок сплавов происходит под влиянием ужесточающихся условий работы подшипниковых узлов. Обычно подшипниковые сплавы на основе меди обладают более высокими механическими характеристиками по сравнению с баббитами.

При использовании сплавов на основе меди повреждаемость ПС проявляется в виде повышенного износа, затрудненной прирабатываемости и большей вероятности образования задира. В связи с этим

возникает необходимость формирования на бронзовых ВП специальных покрытий, улучшающих условия приработки. С этой целью специалистами **фирмы «ТРИЗ»** разработаны и используется способы обработки бронзовых ВП.

Прирабочное покрытие сформированное по схеме Ag+Cu+**B83** [3, 4].

Сначала на рабочие поверхности бронзовых вкладышей (микротвердость которых составляет 110–115 кгс/мм²) методом ЭЭЛ наносят покрытие из серебра при энергии разряда $W_p = 0,1-0,3$ Дж. Микротвердость сформированного поверхностного слоя при этом снижается и составляет 75–80 кгс/мм². После этого на покрытие из серебра этим же методом и при такой же энергии разряда наносят покрытие из меди. Микротвердость покрытия после нанесения меди незначительно увеличивается и составляет 85–90 кгс/мм². Третьим слоем наносят электроэрозионное покрытие из оловянного баббита при $W_p=0,01-0,04$ Дж. Медь, входящая в состав покрытия, образует оловом, которое является основным компонентом оловянных баббитов, твердый раствор замещения, обеспечивая гарантированную металлическую связь.

Нанесение оловянного баббита способствует получению механической смеси по эвтектической реакции на основе серебра, которое состоит из ϵ -фазы и Sn с температу-

рой плавления около 220°C. Микро- твердость структуры после нанесе- ния электроэрозионного покрытия из оловянного баббита составляет 35-38 кгс/мм². Свинец, который содержится в бронзе, практически не растворяется в серебре и нахо-

дится в свободном состоянии.

Таким образом получают ком- бинированное электроэрозионное покрытие (КЭП) в виде дискретных зон с максимальной толщиной 30 мкм, то есть формируется регуляр- ный микрорельеф поверхности,

вершины которого имеют микро- твердость – 35-38 кгс/мм².

На рис. 1 показаны отдельные стадии изготовления ПС и нанесе- ния КЭП в условиях **фирмы «ТРИЗ»**.

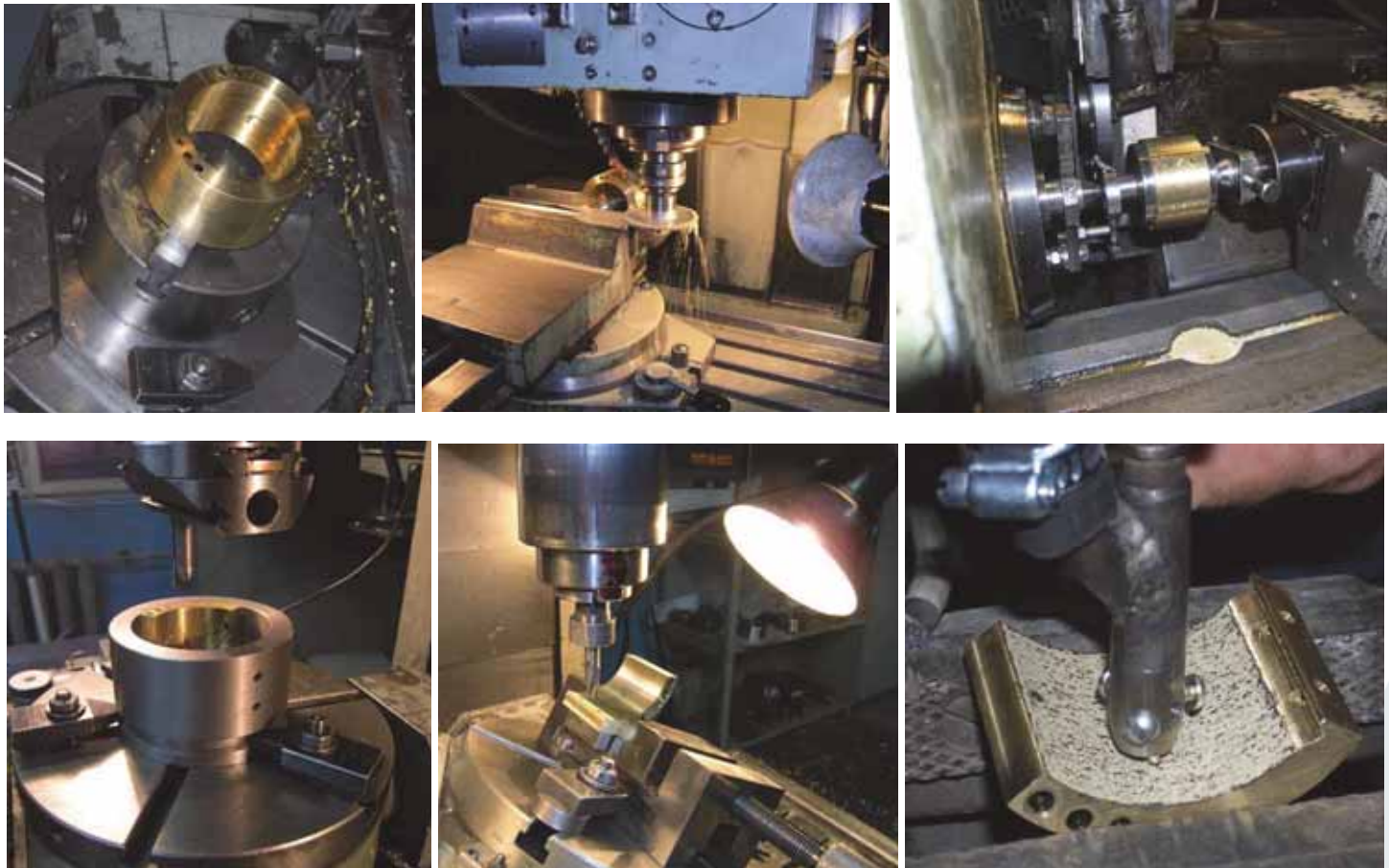


Рис. 1. Отдельные стадии изготовления фирмой «ТРИЗ» ВП из бронзы с приработочными покрытиями

На рис. 2 показана топогра- фия участка поверхности бронзо- вых образцов с КЭП, на которой выбраны 3 характерные точки (1 – гладкая поверхность, 2 – шерохова- тая поверхность, 3 – пора).

Поэлементный состав, как в характерных точках, так и со всей исследуемой поверхности, показан в табл. 1. Как видно из таблицы во всех характерных точках присут- ствуют элементы, входящие в со- став КЭП.

Толщина приработочного по- крытия составляет 30 мкм.

Успешный опыт применения бронзовых ВП с антифрикционным приработочным покрытием полу- чен на корпусе КВД (n=12600 об/мин), воздушного компрессора С102 (рис. 3).

Приработочное покрытие, сформированное по схеме Ag+Pb+Ag [5, 6].

Следует отметить, что приме- нение ВП, обработанных предлага- емым способом, требует высокой точности изготовления и сборки

подшипниковых узлов. Из-за малой толщины покрытия в ужесточен- ных условиях работы (большие числа оборотов и высокие удельные давления) во время приработки может произойти задира рабочей по- верхности ВП.

Техническая задача решена путем нанесения на вкладыши КЭП. Первый слой из серебра нано- сили при энергии импульса $W_u=0,1...0,3$ Дж, при этом производи- тельность процесса (Т) находи- лась в пределах 1,0...2,0 см²/мин, толщина слоя (h) - в пределах 30...35 мкм, а шероховатость (Rz) - 3,6...4,0 мкм. Второй слой из свинца наносили при $W_u=0,3-0,4$ Дж, Т - 2,0...3,0 см²/мин, h - 80...130 мкм, а Rz - 26...32 мкм. Третий слой из серебра наносили при $W_u=0,04...0,1$ Дж, Т - 0,2...2,0 см²/мин, h - 80...120 мкм, а Rz - 3,6...4,0 мкм.

Распределение элементов по мере углубления поверхностного слоя, при сканировании, согласно рис. 4, а, представлено в табл. 2.

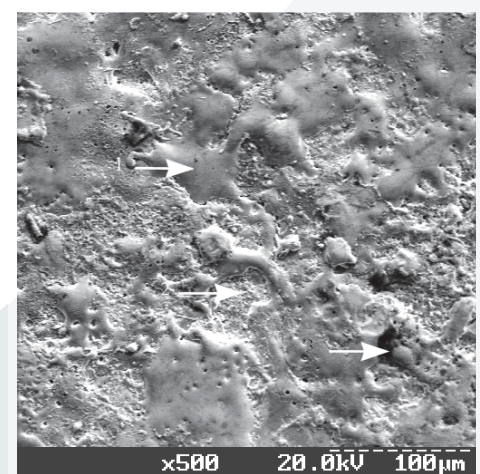


Рис. 2. Топография участка по- верхности бронзовых образцов с КЭП

В результате установлено, что при нанесении на бронзовую под- ложку КЭП из серебра и свинца по- верхностный слой состоит из трех зон (рис. 4, б). Верхний слой с микротвердостью 600 МПа распространяется на глу- бину 70...80 мкм. Ниже распола-

Таблица 1. Поэлементный состав покрытия в характерных точках и со всей исследуемой поверхности.

Исследуемая точка, участок (Σ) 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
Σ	26.854	2.920	16.939	50.347	2.940

Таблица 2. Поэлементный состав покрытия по глубине поверхностного слоя

Исследуемая точка поверхности	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

гается переходная зона повышенной твердости с микротвердостью 1270...1400 МПа и 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).

В [7] предложен новый способ формирования методом ЭЭЛ на поверхностях ВП специального рельефа, повышающего надежность работы за счет увеличения несущей способности. Способ осуществляется следующим образом. На рабочую поверхность ВП методом ЭЭЛ наносят с помощью электрода-инструмента слои из серебра, меди и оловянного баббита (рис. 5).

Слои электроэрозионных покрытий ВП наносят в разных направлениях – вдоль, поперек и наименьшим углом к поверхности ВП. Кроме того, на боковых и входных краях формируются полосы дополнительного микрорельефа. Следует отметить, что формирование регулярного микрорельефа обеспечивается самим процессом ЭЭЛ.

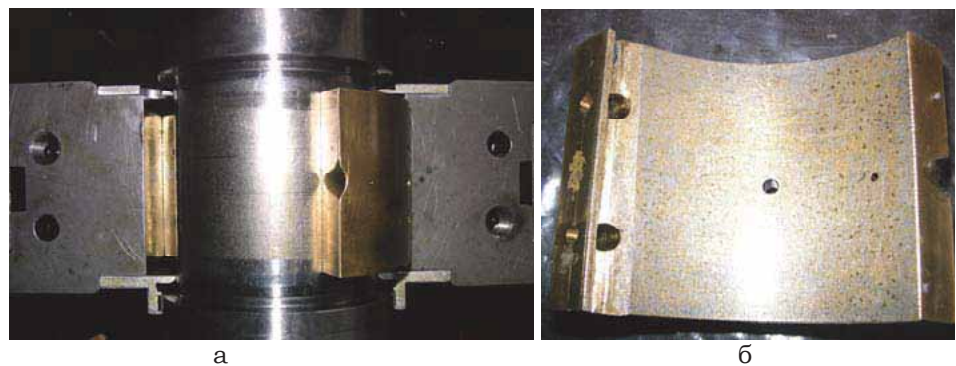


Рис. 3. а – ПС с ВП с приработочным с КЭП и ЭЭЛ подшипниковой шейкой (ШПШ) вала, б – состояние ВП после двухнедельного пробега

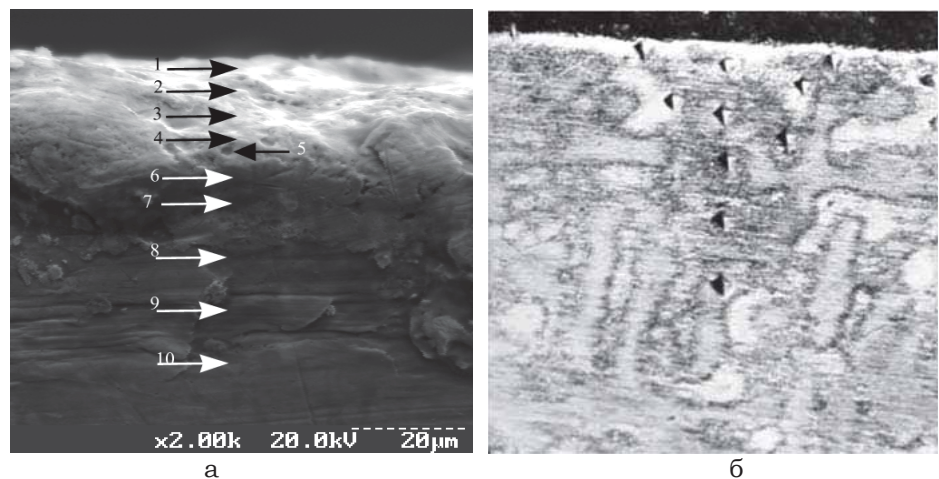


Рис. 4. Сканирование элементов по мере углубления поверхностного слоя (а), дюрометрический анализ поверхностного слоя (б)

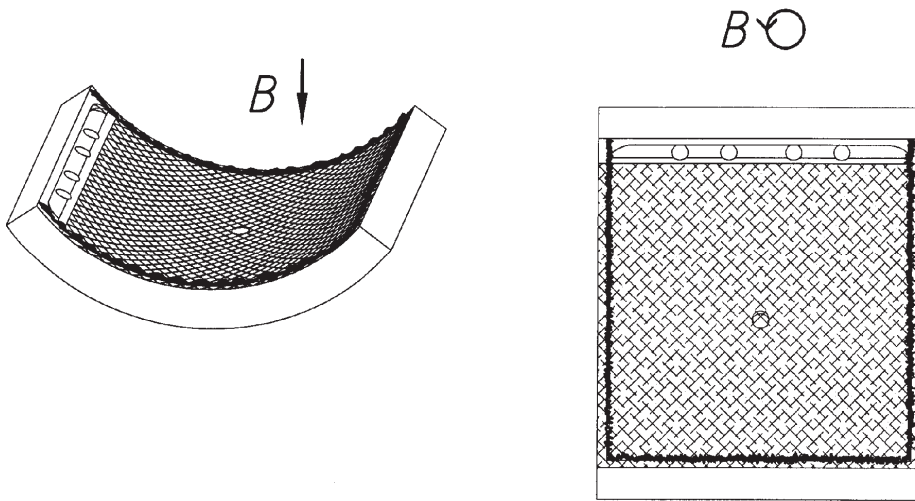


Рис. 5. Вкладыш подшипника с специальным микрорельефом и дополнительными полосами микрорельефа поверхности

Совершенствование технологии изготовления баббитовых ВП (Патенты UA № 64663A, № 92814, № 109229, № 95009, RU № № 2404378, № 2422690)

На основании анализа технологии изготовления ВП, изучения условий их работы и причин разрушения баббитового слоя, специалистами ООО «ТРИЗ» проведены исследования, направленные на повышение их качества. Усовершенствованная технология их изготовления заключается в том, на стальную подложку, перед лужением оловом, наносят методом ЭЭЛ слой из меди. Это обеспечивает более прочное сцепление стальной под-

ложки с баббитом, а также улучшает отвод тепла из зоны трения [8].

На рис. 5 показаны микроструктура (а) и распределение микротвердости в граничной зоне (в) 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 МПа (олово) до 1750-1800 МПа (сталь 20). Олово удерживается на стальной подложке только за счет адгезии.

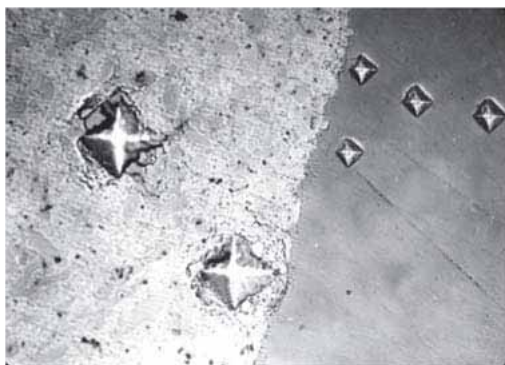
При ЭЭЛ стали 20 медью или оловянной бронзой между оловом и

медью или оловом и компонентами оловянной бронзы в диффузионной зоне образуются твердые растворы замещения, обеспечивающие более прочную связь. Микротвердость в переходной зоне первоначально плавно повышается от 210-230 МПа (олово) до 2700-2800 МПа (ЗТВ), а затем постепенно снижается до микротвердости основы (рис. 6, б, в).

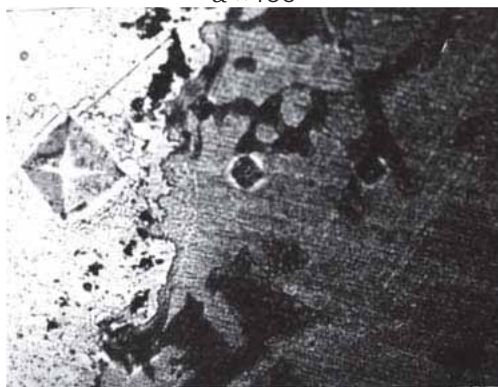
Анализ результатов испытания образцов показал, что применение переходных слоев из меди, наносимых методом ЭЭЛ в защитной среде аргона (рис. 7), повышает прочность соединения стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем по сравнению с традиционной технологией (сталь 20 + баббит) на 35%.

Предложенный способ актуален для ПС плавающих уплотнений, опорных пальцев зубчатых колес планетарных мультипликаторов и др.

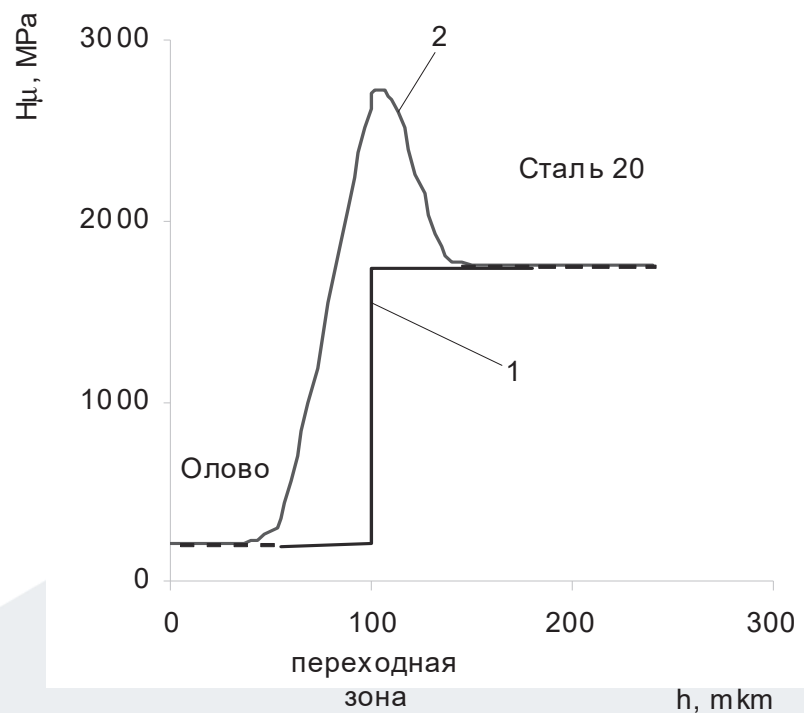
При изготовлении вкладышей ПС и ПШ роторов компрессоров и насосов всегда имеются отклонения от их идеальной геометрической формы, которые называются погрешностями. Дополнительные неточности привносятся при установке ротора. Накопление погрешностей значительно снижает реальную площадь контакта ШВ и ВП, что является причиной перенапряжения антифрикционного слоя,



а ×400



б ×400



в

Рис. 6. Микроструктура после лужения оловом стали 20 (а) и с подслоем из меди (ЭЭЛ) (б); распределение микротвердости (в): 1 - сталь-олово, 2 - сталь-медь (ЭЭЛ)



а
Рис. 7. ЭЭЛ медью стали 20 перед лужением и заливкой баббитом (а) и детали с электроэрозионным покрытием (б)

особенно в период приработки. Приработка является как бы заключительной технологической доводочной операцией, в результате которой нивелируются все неточности изготовления контактирующих поверхностей деталей в паре трения.

Ускорение изнашивания и развития повреждений, трущихся поверхностей в послеприработочном периоде, зависит от наличия на поверхности трения непоправимых микро, а иногда и макроповреждений, образовавшихся в процессе приработки. В металле в этом случае развиваются повреждения вследствие малоциклового усталости, причем поражаются наиболее слабые структурные составляющие. Так при использовании в тонкослойных подшипниках

баббита Б83 в кубических кристаллах SnSb образуются микротрещины, которые впоследствии становятся очагами развития трещин уже в объеме всего слоя [9].

С целью изучения возможности улучшения прирабатываемости ВП на образцы стали 20, с баббитовым слоем, методом ЭЭЛ наносили покрытия из индия и олова. ЭЭЛ осуществлялось в защитной среде аргона. При этом использовались режимы легирования с энергией разряда до 0,03 Дж.

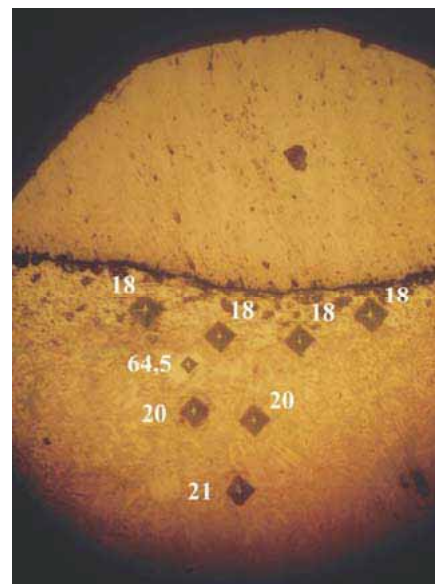
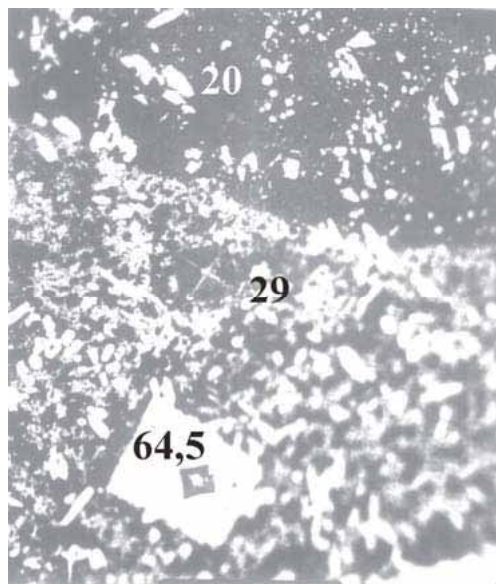
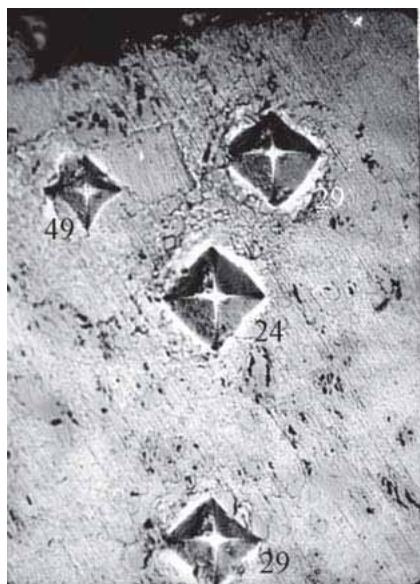
На рис.8 приведена микроструктура поверхностного слоя баббита Б83 без покрытия (а) и с покрытиями из индия (б) и олова (в).

В результате легирования индием на поверхности баббита формируется слой толщиной до 130 мкм и микротвердостью

$H_{\mu}=200-210$ МПа (рис. 7, б). При этом микротвердость нижележащих слоев баббита составляет $H_{\mu}=240-310$ МПа, а твердых включений квадратной формы (SnSb) – 460-645 МПа.

В случае легирования поверхности баббита оловом глубина приработочного покрытия составляет 90-100 мкм, а микротвердость $H_{\mu}=180-190$ МПа. Микротвердость нижележащих слоев – 240-310 МПа [10, 11].

Вкладыши ПС, изготавливаемые традиционным способом, имеют недостаточную надежность и долговечность, вследствие отказа подшипника при разрушении баббита. Весь арсенал методов контроля заливки баббита не может дать полной гарантии качества заливки.



а б в
Рис. 8. Структура поверхностного слоя баббита Б83: а – без покрытия, б – легированного индием, в – легированного оловом

Специалистам **фирмы «ТРИЗ»** была поставлена задача усовершенствования способа обработки вкладышей ПС путем формирования на рабочей поверхности вкладышей антифрикционного баббитового покрытия методом ЭЭЛ, который бы повысил качество вкладышей, несущую и нагрузочную способность, надежность и долговечность их работы, снизил бы трудоемкость изготовления.

Разработанный новый способ обработки вкладышей ПС, включает нанесение на вкладыши электроэрозионного покрытия из мягкого материала методом ЭЭЛ электродом-инструментом при энергиях импульса 0,01-0,5 Дж [12]. При этом покрытие из меди, оловянной бронзы, или олова наносят поэтапно, затем на него наносят электроэрозионное покрытие из оловянно-сурьмяного баббита, после чего проводят поэтапное ЭЭЛ полученного слоя графитовым электродом. ВП, обработанные предлагаемым способом, имеют высокую надежность и долговечность вследствие того, что на всех этапах формирования антифрикционного покрытия, методом ЭЭЛ, обеспечивается прочная металлическая связь, как между подложкой и промежуточным слоем из меди, оловянной бронзы или олова, так и с последующим слоем из оловянно-сурьмяного баббита.

При изготовлении корпусов и вкладышей подшипников (ВП), а также подшипниковых шеек (цапф) 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 цапфы и ВП, что является причиной перенапряжения антифрикционного слоя, особенно в период приработки.

Кроме того, в местах неудовлетворительного прилегания, поверхности вкладыша и «постели» могут подвергаться щелевой и фреттинг коррозии.

Недостаточная жесткость вала, корпусов и «постелей» может стать причиной перекосов цапф относительно подшипников и концентрации нагрузки у краев. Результатом повышенного кромочного давления на подшипниках может быть трещинообразование либо пластический сдвиг мягкого сплава. При неудовлетворительном прилегании ВП к «постелям»

участки вкладышей с неплотным контактом прогибаются; одновременно перегружается остальная рабочая поверхность.

Площадь фактического контакта поверхностей состоит из множества малых дискретных площадок, расположенных на различных высотах пятен касания в местах наиболее плотного сближения поверхностей и зависит от микро- и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-механических свойств поверхностного слоя и от нагрузки.

Увеличение податливости одной из деталей сопряженного узла может благоприятно влиять на его долговечность. Под податливостью понимают способность детали выдерживать деформации за пределами упругости с сохранением несущей способности. Чрезвычайно важное свойство для массивных деталей трения, например, ПС, тормозных колодок и др. Высокая податливость материала или изделия позволяет обеспечивать хорошее прилегание поверхностей и тем самым большую эффективность работы и износостойкость. В данном случае рассматривается податливость поверхности ВП, контактирующей с поверхностью цапфы.

Долговечность сопряженного узла повышается за счет увеличения податливости контактирующих поверхностей путем формированием методом ЭЭЛ на поверхностях ВП, контактирующих с постелью и постели, или на одной из них, покрытий из мягких металлов, обладающих низким сопротивлением деформации, и обеспечивающих более плотное прилегание. Для подложки из стали 20, в качестве анода используют олово и баббит, позволяющие формировать покрытия до 0,12 мм с шероховатостью $R_z=24,4$ мкм [13, 14].

Будем рады сотрудничеству, наши реквизиты: «ТРИЗ» ЛТД ООО Украина, г. Сумы, 40020, ул. Машиностроителей, 1, а/я 1421.

Веб-сайт: www.triz.sumy.ua
E-mail: triz@triz.sumy.ua

Список литературы:

1. Применение ЕАМ – решение главной проблемы химических предприятий России. Хим-курьер 14.09.2009г. С. 16-17.
2. ЕАМ – решение как инструмент для гибкого управления затратами на техническое обслуживание в нефтегазовой отрасли. С. Гореленков. Сфера нефтегаз стр. 166.
3. Патент Украины на винахід

№ 78155 А, В23Н 1/00, 3/00, 5/00. Спосіб обробки вкладышів підшипників ковзання/ Марцінковський В.С., Тарельник В.Б., Пчелинцев В.А./ Опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.

4. Патент Российской Федерации № 2299790 МПК В23Н 1/00. Способ обработки вкладышей подшипников/ В.С. Марцінковський, В.Б. Тарельник, В.А. Пчелинцев/ Опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15.

5. Патент України на винахід № 105965, В23Н 1/00, 5/00. Спосіб обробки вкладышів підшипників ковзання/ Марцінковський В.С., Тарельник В.Б., Дзюба О.В./ Опубл. 10.07.2014, Бюл. № 13.

6. Патент Российской Федерации № 2524467 МПК В23Н 1/00. Способ обработки вкладышей подшипников скольжения/ В.С. Марцінковський, В.Б. Тарельник, Дзюба О.В./ Опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21.

7. Патент України № 77906, В23Н1/00, 3/00, 5/00. Спосіб обробки вкладышів підшипників ковзання/ Марцінковський В.С./ Опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

8. Патент України № 64663А МКВ В23Н1/00. Спосіб обробки вкладышів підшипників ковзання/ В.С. Марцінковський, В.Б. Тарельник/ Опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2.

9. Трение, износ и смазка /А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др./М.: Машиностроение, 2003.- 575 с.

10. Патент № 92814 Украина, МПК В23Н1/00. Спосіб обробки вкладышів підшипників ковзання / Марцінковський В. С., Тарельник В. Б. ; заявл. 29.01.2009, опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. – 2 с.

11. Патент № 2404378 Российская Федерация МПК В23Н9/00. Способ обработки вкладышей подшипников / Марцінковський В. С., Тарельник В. Б. ; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. – 2 с.

12. Патент № 92814 Украина, МПК В23Н1/00. Спосіб обробки вкладышів підшипників ковзання / Марцінковський В.С., Тарельник В.Б., Дзюба О.В.; заявл. 29.11.2014, опубл. 25.08.2016, Бюл. №16. – 17с.

13. Патент № 2422690, Российская Федерация МПК С1, F16С 17/02. Способ сборки подшипников скольжения / Марцінковський В. С., Тарельник В. Б., Тарельник Н.В.; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. – 7 с.

14. Патент № 95009 Украина, МПК В23Н1/00. Спосіб складання підшипників ковзання /Марцінковський В.С., Тарельник В.Б., Тарельник Н.В.; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18. – 7 с.