

В.Б. Тарельник, д.т.н., проф., В.С. Марцинковский, к.т.н., доцент, А.В. Дзюба, аспирант (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

## Новый способ улучшения прирабатываемости пары трения «вкладыш подшипника – шейка вала»

*Предложен новый способ повышения качества подшипников скольжения путем улучшения прирабатываемости пары трения «вкладыш подшипника – шейка вала», который включает формирование электроэрозионным легированием (ЭЭЛ) поверхностного слоя из мягкого антифрикционного материала с микротвердостью ниже микротвердости основы на поверхности шейки вала, контактирующей с поверхностью вкладыша подшипника.*

**Ключевые слова:** электроэрозионное легирование, электрод, покрытие, прирабатываемость, качество поверхности, шероховатость, микротвердость.

*Запропонований новий спосіб підвищення якості підшипників ковзання шляхом поліпшення припрацювання пари тертя «вкладиш підшипника – шийка валу», який включає формування електроерозійним легуванням (ЕЕЛ) поверхневого шару з м'якого антифрикційного матеріалу з микротвердістю нижче микротвердості основи на поверхні шийки валу, що контактує з поверхнею вкладиша підшипника.*

**Ключові слова:** електроерозійне легування, електрод, покриття, припрацювання, якість поверхні, шорсткість, микротвердість.

*A new method for improving the quality of bearings by improving run-in friction pair "Bearing – neck of the shaft," which includes the formation of electro-erosional alloying of the surface layer of soft anti-friction material with a basis of microhardness microhardness below the surface of the neck of the shaft in contact with the surface of the bearing shell.*

**Keywords:** electro-erosional alloying, electrode, coating, running-in, the quality of the surface roughness, microhardness.

Наиболее распространенной причиной отказов машин является не поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей их деталей и рабочих органов. Поэтому, особенно в последнее время, в связи с увеличением режимных параметров работы машин и механизмов большое внимание уделяется методам снижения трения.

Решение проблемы, связанной с увеличением сроков службы машин, 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.

Таким образом, создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), явля-

ется актуальной задачей.

По отношению к исчерпывающим запасам используемых новых материалов и технологий их нанесения, одним из наиболее эффективных и все чаще используемых в данное время методов снижения к минимуму отрицательных последствий трения, есть соответствующий отбор геометрических признаков, а также свойств поверхностей элементов пары трения. Формирование необходимого (особого) рельефа поверхности может быть возможным благодаря технологическому процессу, особенно такому, который позволяет воздействовать на поверхность в локальном месте.

В статье рассматривается способ электроэрозионного легирования, который может быть использован для обработки подшипниковых шеек валов, контактирующих с вкладышами подшипников скольжения.

Известны подшипниковые материалы из мягких металлов Sn, Pb, Cd, Sb, Zn, характеризующи-

ся наличием твердых структурных составляющих в пластичной матрице, называемые баббитами. Расплав их при температуре 450 – 480 °С заливают на подогретые вкладыши (250 °С). Чаще применяют центробежную заливку. Заливают в кокиль и под давлением, толщина заливки в подшипниках составляет 1–3 мм [1].

Существенным недостатком баббитов является их малое сопротивление усталости, особенно при температуре более 100 °С. С уменьшением толщины слоя баббита в подшипнике сопротивление усталости увеличивается. Минимальная толщина заливки баббита допускается 0,25 – 0,4 мм [1].

Известно, что ускорение изнашивания и развития поврежденных трущихся поверхностей после приработки зависит от наличия на поверхности трения непоправимых микро-, а иногда и макроповреждений, образовавшихся в процессе приработки. К числу таких повреждений относятся локальные разрушения структурных состав-

ляющих в результате перегрузок. В металле в этом случае развиваются повреждения вследствие малоцикло-вой 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 [2].

Повысить качество обработки вкладышей подшипников скольжения можно нанесением на поверхность баббитового покрытия методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) индия или олова при энергиях разряда 0,01 – 0,03 Дж. При этом формируется поверхностный слой с микротвердостью ниже микротвердости основы, в котором отсутствуют твердые включения (SnSb) квадратной формы [3].

Такой способ не лишен недостатков. При нанесении на поверхность баббита мягких антифрикционных металлов индия или олова возникают определенные трудности:

- залипание легирующего электрода;
- низкая производительность;
- сложная механизация процесса ЭЭЛ;
- затруднение контроля сплошности наносимого покрытия.

В настоящей работе повысили надежность и долговечность подшипников скольжения путем улучшения прирабатываемости их вкладышей.

Для этого в паре трения «вкладыш подшипника – шейка вала» методом ЭЭЛ на поверхности шейки вала, контактирующей с поверхностью вкладыша подшипника, формируют поверхностный слой из мягкого антифрикционного материала с микротвердостью ниже микротвердости основы. При этом поверхностный слой может быть сформирован на поверхности шейки вала после ее упрочнения, например, поэтапной цементацией методом ЭЭЛ [5].

Основными материалами для валов служат углеродистые и легированные стали благодаря высоким механическим характеристикам,

способности к упрочнению и легкости получения цилиндрических заготовок прокаткой.

Для большинства валов применяют термически обрабатываемые среднеуглеродистые и легированные стали 45, 40Х. Для высоконапряженных валов ответственных машин применяют легированные стали: 40ХН, 40ХН2МА, 30ХГТ, 30ХГСА и др. Валы из этих сталей обычно подвергают улучшению, закалке с высоким отпуском или поверхностной закалке с нагревом ТВЧ.

В зависимости от условий работы шероховатость поверхности в подшипниках скольжения составляет  $Ra = 1,0 - 0,16$  мкм [6].

В современном машиностроении выбор материала и термической обработки валов и осей определяется критериями их работоспособности, в том числе критериями работоспособности шеек валов с подшипниками. Значимость последних критериев в случае ПС может быть определяющей.

Материалы, применяемые для исследования, подразделяли на материалы для катода (детали) и материалы для анода (легирующего электрода).

Используемые для исследований материалы анода и катода, а также некоторые их физико-механические свойства приведены в табл. 1 и 2.

На параметры качества покрытий при ЭЭЛ оказывает влияние множество факторов, из числа ко-

торых, в первую очередь, следует выделить режимы легирования. Влияние материала легирования, режимов ЭЭЛ на качественные параметры покрытий определялось на установке с ручным вибратором модели «ЭИЛ-8А», обеспечивающей энергию разряда в диапазоне 0,1...0,53 Дж.

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

Большинство экспериментов проводили с использованием в качестве материала катода (образца) стали 45, на которой оценивали качество сформированных покрытий (толщину и шероховатость) после ЭЭЛ. Для исследований применяли прямоугольные образцы размером 10x10x8 мм с шероховатостью исходной поверхности  $Ra=0,5$  мкм.

Образцы стали 40Х подвергали цементации методом электроэрозионного легирования. После этого на них методом ЭЭЛ наносили покрытия из меди и серебра и подвергали обработке БУФО. На этих образцах исследовали шероховатость, сплошность, толщину слоя и распределение микротвердости по мере углубления относительно поверхности.

Цементацию электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) выполняли на переносной установке с ручным вибратором модели «Элит-

**Таблица 1. Режимы обработки и физико-механические свойства материалов, применяемых при ЭЭЛ в качестве катода (детали)**

Марка материала	Кристаллическая решетка	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел текучести, МПа	Твёрдость, НВ
Сталь 45	О.Ц.К.	9,68	8,46	280
Сталь 40Х	О.Ц.К.	9,8	8,6	220

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

Марка материала	Температура плавления, °С	Твёрдость	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Коэффициент линейного расширения, $10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>
Медь	1084	88НВ	401	16,5
Серебро	817	25НВ	453	14,2
Олово	232	5НВ	59,8	22
Индий	157	0,9НВ	87	60,5

рон-22А», обеспечивающей энергию разряда в диапазоне 0,1...0,53 Дж, и установке ЭЭЛ большей мощности «Элитрон-52А» с энергией разряда до 6,8 Дж.

Процесс ЦЭЭЛ проводили в автоматическом режиме с помощью специального приспособления на различных режимах в диапазоне энергий разряда ( $W_p$ ) от 0,1 до 6,8 Дж.

Для исследований использовали специальные образцы, изготовленные из стали 40Х в виде катушки, состоящей из двух дисков, диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой проставкой диаметром 15 мм, имеющей два технологических участка такого же диаметра (рис. 1).

Поверхности дисков перед ЦЭЭЛ шлифовали до  $Ra = 0,5$  мкм. Образцы закрепляли в патроне токарного станка, после чего производили ЦЭЭЛ, легирование серебром и медью и обработку БУФО. На всех этапах обработки измеряли шероховатость поверхности. Из дисков, в свою очередь, вырезали отдельные сегменты, из которых изготавливали шлифы для металлографических и дюриметрических исследований.

Изготовленные шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводили оценку качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводили дюриметрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды.

При ЦЭЭЛ деталей использовали графитовые электроды марки ЭГ-4 ОСТ 229-83.

Ниже представлены результаты исследования следующих серий образцов из стали 40Х:

- поэтапная цементация ( $W_p=2,83$  и  $0,9$  Дж; с производительностью, соответственно, 5 и 2,0 мин/см<sup>2</sup>); обработка БУФО;

- цементация ( $W_p=2,83$  Дж; с производительностью 5 мин/см<sup>2</sup>); легирование серебром ( $W_p=0,4$  Дж; с производительностью 1 мин/см<sup>2</sup>); обработка БУФО;

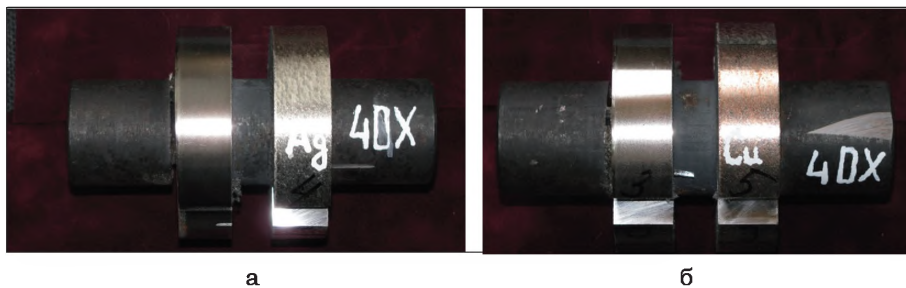


Рис. 1. Образец стали 40Х для исследования результатов ЦЭЭЛ и ЭЭЛ серебром (а) и медью (б)

- цементация ( $W_p=2,83$  Дж; с производительностью 5 мин/см<sup>2</sup>); легирование медью ( $W_p=0,4$  Дж; с производительностью 1 мин/см<sup>2</sup>); обработка БУФО.

На основании проведенных исследований получены качественные параметры покрытий из мягких металлов (медь, индий, олово, серебро), нанесенных методом ЭЭЛ на сталь 45 (табл. 3).

При замене материала подложки стали 45 на чугун механизм формирования покрытия из мягких антифрикционных металлов практически не изменяется. Последующая обработка БУФО позволяет снизить шероховатость поверхности до  $Ra = 0,5$  мкм.

В табл. 4 и 5 представлены результаты измерения шероховатос-

Таблица 3. Качественные параметры покрытий из мягких металлов (медь, индий, олово и серебро), нанесенных методом ЭЭЛ на сталь 45

Режим $W_p$ , Дж	Трац, мин	Шероховатость, мкм				Прирост, $\Delta h$ , мм			
		Cu	In	Sn	Ag	Cu	In	Sn	Ag
0,01	4,0	0,6	0,6	0,6	0,6	0,01	0,01	0,01	0,01
0,02	3,5	0,7	0,7	0,7	0,6	0,01	0,02	0,01	0,01
0,04	3,0	0,1	0,8	1,0	0,7	0,02	0,02	0,03	0,02
0,05	2,7	1,2	-	1,5	0,8	0,03	-	0,05	0,02
0,08	2,0	1,3	-	4,5	1,0	0,03	-	0,10	0,03
0,10	2,0	1,4	-	5,6	1,0	0,04	-	0,12	0,035
0,20	1,2	1,5	-	-	1,2	0,05	-	0,13	-
0,34	1,0	1,6	-	-	1,4	0,09	-	0,13	-
0,40	1,1	2,0	-	-	-	0,09	-	-	-
0,68	0,75	27	-	-	-	0,14	-	-	-

Таблица 4. Шероховатость поверхности после поэтапной цементации с энергиями разряда  $W_p=2,83$  и  $0,9$  Дж

Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм						Среднее значение параметра шероховатости, мкм	
$R_a$							
3,09	2,73	2,19	3,41	2,31	2,24	$R_a$	$R_z$
$R_z$							
10,27	8,19	13,21	10,20	14,70	12,57	2,3	11,5

Таблица 5. Шероховатость поверхности после поэтапной цементации с энергиями разряда  $W_p=2,83$  и  $0,9$  Дж и БУФО

Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм							Среднее значение параметра шероховатости, мкм	
$R_a$								
0,7	0,47	0,52	0,64	0,59	0,45	0,7	$R_a$	$R_z$
$R_z$								
1,93	1,31	1,49	1,81	1,67	1,29	1,93	0,56	1,58

ти, соответственно, после поэтапной ЦЭА и БУФО.

На рис. 2 изображен микрошлиф (а), и распределение твердости образца из стали 40Х (б) после поэтапной ЦЭА и БУФО.

Как видно из рисунка, максимальная микротвердость образца (до 650 HV) присутствует на его поверхности и по мере углубления плавно снижается до микротвердости основы, которая составляет 220 HV. Глубина зоны повышенной твердости при этом распространяется до 100 мкм.

Таким образом, после поэтапной ЦЭА с энергиями разряда  $W_p=2,83$  и  $0,9$  Дж и БУФО шероховатость поверхности ( $R_a$ ) круглого образца из стали 40Х, составляет  $0,56$  мкм, при этом глубина зоны повышенной твердости распространяется до 100 мкм.

Результаты измерения шероховатости поверхности образца после поэтапной ЦЭА и ЭА серебром представлены в табл. 6, а с последующей обработкой БУФО - в табл. 7.

Следует отметить, что при ЭА серебром диаметр увеличился на  $0,05$  мм, а после обработки БУФО снизился на  $0,03$  мм.

На рис. 3 изображен микрошлиф (а), и распределение микротвердости (б) в образце из стали 40Х после поэтапной цементации, электроэрозионного легирования серебром и последующей обработкой БУФО. Как видно из рисунка, на поверхности образца располагается слой микротвердостью порядка  $80-90$  HV, что ниже микротвердости основы ( $220$  HV), и глубиной до  $35$  мкм. Далее, по мере углубления микротвердость плавно повышается и на глубине  $\sim 60$  мкм достигает максимального значения  $470$  HV, после чего снова плавно понижается до глубины  $100$  мкм, на которой соответствует микротвердости основы.

Результаты измерения шероховатости поверхности после поэтапной цементации и ЭА медью представлены в табл. 8 и с последующей обработкой БУФО - в табл. 9.

Следует отметить, что при ЭА медью диаметр образца № 5 увели-

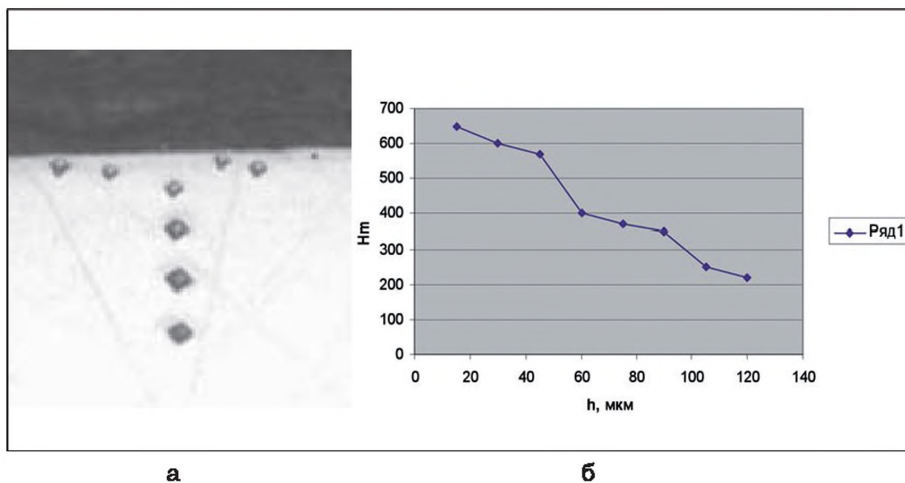


Рис. 2. Микрошлиф (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40Х (б) после поэтапной цементации и БУФО

Таблица 6. Шероховатость поверхности образца № 4 после поэтапной цементации и ЭА серебром

Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм						Среднее значение параметра шероховатости, мкм	
$R_a$							
1,92	3,3	1,55	2,57	2,15	2,04		
$R_z$						$R_a$	$R_z$
5,43	9,37	4,38	7,26	6,17	5,76	2,26	6,40

Таблица 7. Шероховатость поверхности образца № 4 после поэтапной цементации, ЭА серебром и обработки БУФО

Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм							Среднее значение параметра шероховатости, мкм	
$R_a$								
0,59	0,86	1,27	0,47	1,33	0,76	0,59		
$R_z$							$R_a$	$R_z$
1,68	2,44	3,59	1,33	3,76	2,14	1,68	0,88	2,49

Таблица 8. Шероховатость поверхности образца после поэтапной цементации и ЭА медью

Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм						Среднее значение параметра шероховатости, мкм	
$R_a$							
3,02	4,46	2,5	3,38	2,14	3,41		
$R_z$						$R_a$	$R_z$
8,54	12,63	7,07	9,67	6,06	10,2	3,15	9,03

чился на 0,04 мм, а после обработки БУФО снизился на 0,02 мм.

На рис. 4 изображены микрошлиф (а) и распределение микротвердости (б) в образце из стали 40Х после поэтапной цементации, ЭЭЛ медью и последующей обработкой БУФО. Как видно из рисунка, на поверхности образца располагается слой микротвердостью порядка 140 – 170 НВ, что ниже микротвердости основы (220 НВ), и глубиной до 40 мкм. Далее, по мере углубления микротвердость плавно повышается и на глубине ~ 75 мкм достигает максимального значения 510 НВ, после чего снова плавно

тодом ЭЭЛ, поверхность детали формируется из двух слоев:

– слой из мягкого антифрикционного металла, находящийся снаружи;

– слой из твердого износостойкого металла, находящийся ниже.

Нанесение мягкого антифрикционного металла позволяет при последующей обработке БУФО получить качественный износостойкий слой с требуемой шероховатостью.

#### Выводы

Для повышения надежности и долговечности подшипников

с энергией разряда 0,01-0,04 Дж. Дальнейшее увеличение энергии разряда приводит к возрастанию шероховатости поверхности  $R_a > 1$  мкм. Покрытия из этих металлов, наносимые с энергией разряда 0,04–0,4 Дж, необходимо подвергать последующей обработке БУФО.

#### Список литературы:

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
2. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка /А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и

Таблица 9. Шероховатость поверхности образца после поэтапной цементации, ЭЭЛ медью и обработки БУФО

Значение шероховатости поверхности в отдельных точках, мкм							Среднее значение параметра шероховатости, мкм	
$R_a$								
0,55	0,65	0,91	0,62	0,87	0,71	0,51		
$R_z$							$R_a$	$R_z$
3,05	2,40	2,35	2,64	2,48	3,01	3,25	0,80	3,19

понижается до глубины 120 мкм, на которой соответствует микротвердости основы.

Анализ проведенных исследований показал, что при нанесении мягких антифрикционных металлов, например меди или серебра, на участки, цементированные ме-

скольжения путем улучшения прирабатываемости их вкладышей, например из баббита, можно рекомендовать покрытия из мягких антифрикционных металлов: индия, олова, меди и серебра, которые наносят методом ЭЭЛ на подшипниковые шейки валов

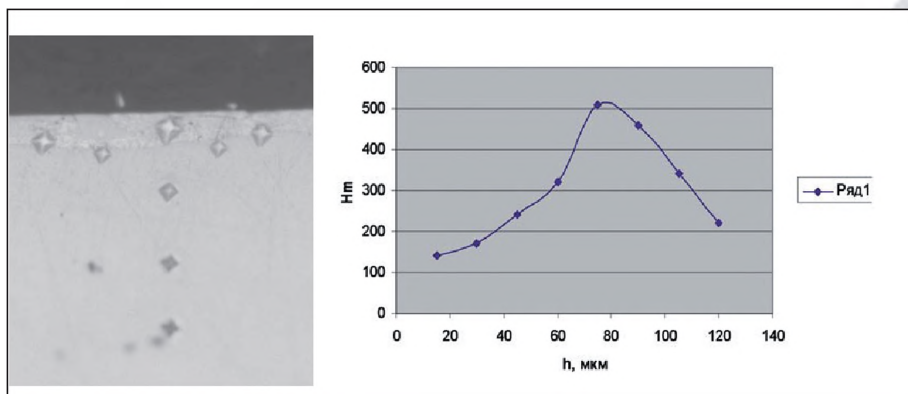
др./М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.

3. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – М.: Машиностроение, 1976. – 46 с.

4. Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання: Пат. 92814. Україна. МПК (2009); F16C 33/04; B23H 1/00; B23H 5/00 /Марцинковський В.С., Тарельник В.Б.; Опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. – 4 с.

5. Спосіб цементції сталевих деталей електроерозійним легуванням: Пат. 66993. Україна. МПК (2011); B23H 9/00 /Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Браутуцак М.П.; Опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2. – 4 с.

6. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 321 с.



а

б

Рис. 4. Микрошлиф (а) и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40Х (б) после поэтапной цементации, ЭЭЛ медью и БУФО