

А. Д. Лазаренко, техник-конструктор (ООО «ТРИЗ» ЛТД, г. Сумы, Украина),
В. С. Серый, магистрант (Сумский национальный аграрный университет, г. Сумы, Украина)

Оптимизация режимов электроэрозионного легирования элементов подшипников скольжения

В работе на основании проведенных исследований разработана методика определения оптимальных режимов формирования методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) переходного слоя из меди, повышающих прочность сцепления подложки из стали 20 и антифрикционного баббитового слоя. Получено уравнение прогнозирования производительности процесса ЭЭЛ стали 20 медью и определены его константы: минимальное время легирования (T) и энергия активации процесса (E_a).

Ключевые слова: подшипник скольжения, баббит, сцепление, электроэрозионное легирование, производительность, энергия активации, микротвердость.

В роботі на підставі проведених досліджень розроблена методика визначення оптимальних режимів формування методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) перехідного шару з міді, що підвищують міцність зчеплення підкладки зі сталі 20 і антифрикційного бабітові шару. Отримано рівняння прогнозування продуктивності процесу ЕЕЛ сталі 20 міддю і визначені його константи: мінімальний час легування (T) і енергія активації процесу (E_a).

Ключові слова: підшипник ковзання, бабіт, зчеплення, електроерозійне легування, продуктивність, енергія активації, микротвердість.

In the work, on the basis of the conducted research, a method has been developed for determining the optimal modes of formation by the electroerosive doping (EEL) of a transitional layer of copper, which increase the adhesion strength of the substrate of steel 20 and the antifriction babbitt layer. The equation for predicting the performance of the EEL steel 20 process with copper was obtained and its constants were determined: the minimum doping time (T) and the process activation energy (E_a).

Keywords: sliding bearing, babbitt, adhesion, electro erosion alloying, performance, activation energy, microhardness.

Введение

Решение проблемы, связанной с увеличением сроков службы машин, зависит от повышения износостойкости и надежности узлов трения. При большом разнообразии условий работы деталей наиболее нагруженным у них является поверхностный слой. Разрушение и износ деталей машин и механизмов начинается, как правило, с поверхности, поэтому улучшение ее качества является актуальной задачей. Наиболее эффективно повышение качества поверхности, а соответственно и эксплуатационных свойств деталей достигается технологическими методами. Улучшения защитных и трибологических свойств поверхностей деталей можно достигнуть, как за счет образования специального рельефа поверхностного слоя, так и нанесением специальных покрытий.

Таким образом, проведение исследований, направленных на создание специальных покрытий, обладаю-

щих более высокими показателями, характеризующими качество поверхности детали, а также разработка новых, экологически чистых и менее энергозатратных технологий их формирования, является резервом для повышения надежности и долговечности узлов трения.

Анализ основных достижений и публикаций

Для пар трения наибольшее применение нашли баббитовые подшипники скольжения (ПС) у которых баббитовое покрытие может наноситься как на криволинейные (рис. 1, а, б), так и на плоские поверхности (рис. 1, в).

В значительной мере надежность ПС, при прочих равных условиях, зависит от качества его изготовления, а также проведения монтажных и ремонтных работ, выполнения всех требований конструкторской и технологической документации.

При изготовлении корпусов и вкладышей подшипников (ВП), а также подшипниковых шеек (цапф) рото-



Рис. 1. Конструктивные элементы ПС с баббитовым покрытием:

а – внешняя поверхность опорных пальцев зубчатых колес, б – внутренняя поверхность вкладышей опорных ПС, в – плоская поверхность упорного ПС

ров 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 может стать причиной перекосов цапф относительно подшипников и концентрации нагрузки у краев. Результатом повышенного кромочного давления может быть трещинообразование либо пластический сдвиг мягкого сплава.

Увеличение податливости одной из деталей сопряженного узла может благоприятно влиять на его долговечность. Самоустанавливающийся опорный подшипник является простейшим примером конструкции, имеющей деталь свободной податливости в виде вкладыша, обладающего угловой подвижностью.

Облегчение условий приработки и улучшение режима работы в послеприработочном периоде можно обеспечить за счет увеличения податливости ВП и более плотного прилегания к «постели», путем нанесения на одну или обе контактирующие поверхности методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) мягких металлов, как правило меди или олова. Мягкий металл, деформируясь под воздействием высоких удельных нагрузок, обеспечит самоустановку ВП, компенсируя погрешности изготовления ПС [1, 2].

Формирование качественного поверхностного слоя в значительной степени зависит от прочности сцепления антифрикционного баббитового слоя со стальной подложкой. Так, причиной выхода из строя ПС может служить некачественная заливка баббита, которая проявляется в отслоении баббитового слоя (рис. 2, а), выкрашиванию отдельных участков (рис. 2, б), разрушении в процессе эксплуатации (рис. 2, в).

Причиной выхода из строя ВП на стадии эксплуатации является влияние различных видов износа: кавитация, абразивный износ, изнашивание вследствие пластической деформации, усталостное изнашивание и др, а также воздействие окружающей среды (рис. 3).

Ускорение изнашивания и развития повреждений, трущихся поверхностей в послеприработочном периоде, зависит от наличия на поверхности трения неисправимых микро-, а иногда и макроповреждений, образовавшихся в процессе приработки. К числу таких повреждений относятся локальные разрушения структурных составляющих в результате перегрузок. 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 [3].

Для приработки баббитовых подшипников скольжения предложен способ, который заключается в ЭЭЛ поверхности баббита Б83 индием и оловом, что позволяет сформировать поверхностный слой толщиной соответственно до 130 и 100 мкм, микротвердость которого ниже микротвердости основы. Металлографический анализ показал, что в структуре сформированного слоя твердые включения отсутствуют, поэтому такие покрытия могут улучшить условия приработки ВП [4, 5].

Последующими исследованиями было установлено, что более технологично защитить баббитовый слой от разрушения можно путем нанесения приработочного покрытия не на баббитовый слой, а на цапфу вала [6]. На рис. 4 изображены процесс нанесения (а) и цапфа вала ротора центробежного компрессора с приработочным покрытием (б).

Наиболее известные способы нанесения баббита на основу вкладышей ПС, это: ручная заливка, центробежная заливка, под давлением, газотермическое напыление [7- 9].

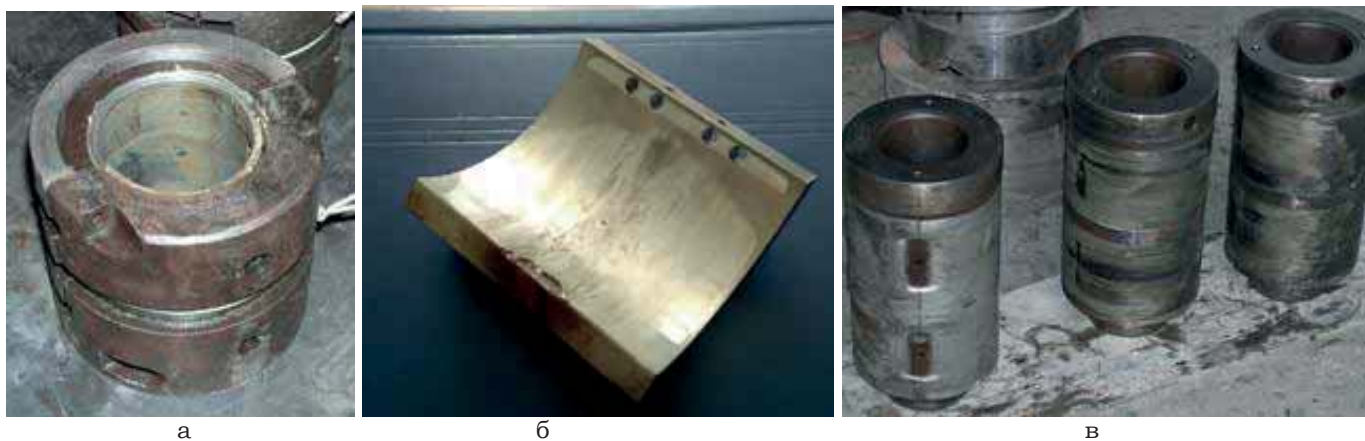


Рис. 2. Разрушение баббитового слоя ПС в результате его некачественной заливки.



Рис. 3. Разрушение антифрикционного слоя ВП в результате: а – абразивного износа и образования натиров, б – кавитации и усталостного изнашивания.

Как правило, во всех случаях основой для напыления является сталь 20 (ГОСТ 1050-88). Хотя могут использоваться и другие материалы, имеющие хорошую адгезию с оловом, такие, как стали 10, 15, бронза, латунь. При заливке вкладышей с основой из чугуна поверхности, на который наносится баббитовый слой, никелируются [10].

В последние годы для изготовления и ремонта ПС

нашли применение несколько новых методов: гальваническое наращивание, штамповка в температурном интервале и электроосаждения. Кроме того, для нанесения антифрикционных покрытий все шире используется метод ЭЭЛ [11].

В [12] предложен способ обработки вкладышей подшипников, повышающий прочность сцепления баббитового слоя со стальной подложкой за счет формирования методом ЭЭЛ промежуточного слоя из меди и может применяться как для ПС, так и для плавающих уплотнений, опорных пальцев планетарных мультипликаторов и др.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что для каждого режима работы установки ЭЭЛ существует рациональное время легирования, необходимое для получения наиболее качественного покрытия. Учитывая большое количество различных установок ЭЭЛ, которые отличаются как конструктивно, так и режимами легирования возникает необходимость решения задачи выбора наиболее рациональных режимов нанесения переходных слоев из меди на любом оборудовании.

Таким образом, **целью работы** является повышение качества элементов подшипников скольжения путем оптимизации режимов нанесения переходных слоев

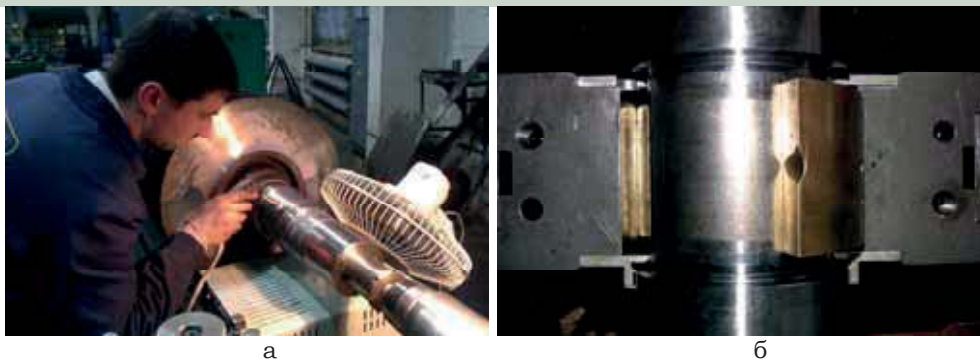


Рис. 4. Нанесение методом ЭЭЛ на подшипниковую шейку вала центробежного компрессора приработочного покрытия (а) и цапфа вала ротора с приработочным покрытием (б).

из меди методом электроэрозионного легирования, которые увеличат силу сцепления баббита и подложки из стали 20.

Методика исследований

Влияние материала легирования, среды, режимов ЭЭЛ на качественные параметры покрытий определялось на модифицированной установке с ручным вибратором модели «ЭИЛ-8А».

Для исследования структуры и измерения твердости поверхностного слоя использовали шлифы образцов после ЭЭЛ. ЭЭЛ образцов из стали 20 медью и оловянной бронзой производили на установке «ЭИЛ – 8А». При этом использовали 7-й режим легирования (рабочий ток $I_p = 0,9-1,0$ А; напряжение холостого хода $U_{х.х} = 67$ В) и 9-й ($I_p = 1,1-1,3$ А; $U_{х.х} = 87$ В) при емкости накопительного конденсатора $C = 150$ мкФ.

Критерием выбора времени легирования являлось получение покрытий 100% сплошности.

При изготовлении поверхности 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 контртелом в струбцине. Затем шлиф подвергался химическому травлению для выявления структуры в реактиве в соответствии с материалом основы. Для стали 20 применяли обычный стандартный реактив – 3% -й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрометрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине от поверхности шлифа.

Замер микротвердости проводили на микротвердометре ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды при различной нагрузке. Кроме того, на некоторых образцах проводилась оценка твердости на поверхности легирования.

Толщину слоя покрытия измеряли микрометром, а шероховатость поверхности - на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр» после снятия и обработки профилограмм.

Результаты исследования

Исследование микрошлифов показало, что при легировании на воздухе толщина формируемых слоев не равномерная и составляет, соответственно при 7-м и 9-м режимах, для меди 30-50 и 30-70 мкм, а для оловянной бронзы – 30-70 и 40-80 мкм (рис. 5 а, в). При этом сплошность слоя находится на уровне ~ 90%. При легировании в среде аргона равномерность слоя значительно возрастает и составляет при ЭЭЛ на тех же режимах соответственно для меди около 20 и 30 мкм, а

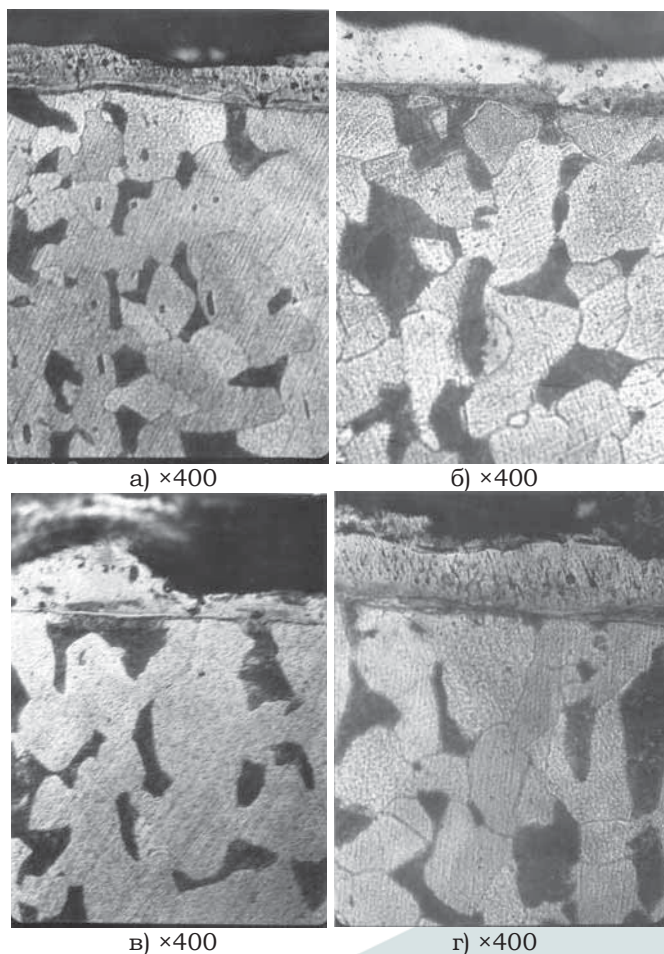


Рис. 5. Микроструктура поверхностных слоев стали 20 после ЭЭЛ оловянной бронзой BrO10Ц1,5H: на воздухе - режимы 7 и 9 соответственно, а, в; в среде аргона - режимы 7 и 9, соответственно б, г..

для оловянной бронзы 30 и 40 мкм (рис. 5 б, г). Сплошность слоя при этом практически для обоих материалов электродов и для применяемых режимов легирования находится на уровне 100%.

При рассмотрении микроструктуры поверхностного слоя стали 20 с покрытием из меди и оловянной бронзы как на воздухе, так и в среде аргона, можно отметить, что поверхностный слой состоит из двух зон. Вверху расположен «белый слой». Ниже располагается зона более темного травления – переходной слой с переменной концентрацией диффузионного характера. Еще ниже различают третью зону – зону термического влияния (ЗТВ), наличие которой и глубина воздействия определяется величиной энергии разряда. В данном случае, когда используются образцы стали 20 в состоянии поставки, микротвердость в зоне термического влияния может повышаться за счет закалочных процессов.

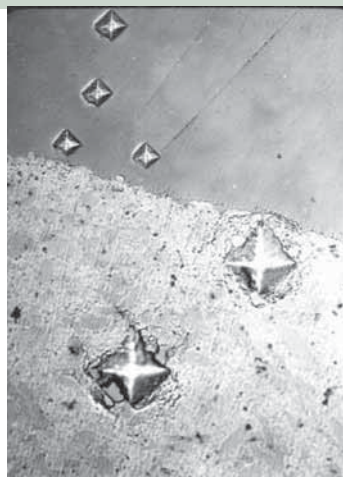
Характер взаимного распределения элементов в поверхностных слоях при ЭАЛ свидетельствует о высокой подвижности атомов в кристаллической решетке металлов, подвергнутых воздействию импульсных разрядов. Подобные явления наблюдаются при воздействии на твердое тело факела искрового разряда, лазерного излучения и других локальных энергетических воздействий.

ДюрOMETрический анализ показывает, что при легировании стали 20 медью и оловянной бронзой как на воздухе, так и в среде аргона, микротвердость на поверхности слоя составляет, соответственно, $H_{\mu} = 850-900$ МПа и $H_{\mu} = 1050-1150$ МПа. По мере углубления она плавно увеличивается до микротвердости ЗТВ (2500-3000 МПа) и затем переходит в микротвердость основного металла $H_{\mu} = 1750-1800$ 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 ЭАЛ струей подаваемого газа.

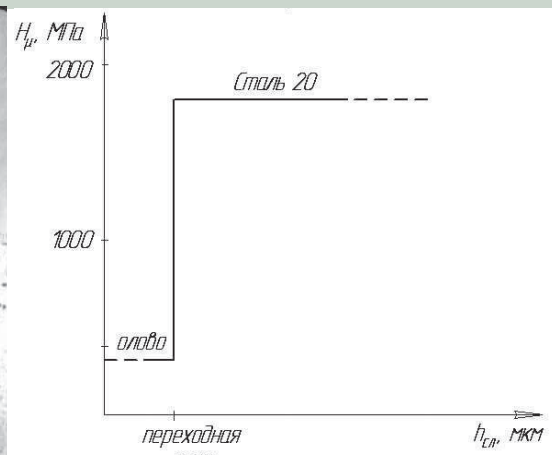
На рис. 6 показаны микрошлиф (а) и распределение микротвердости в граничной зоне (б) между сталью 20 и оловом, нанесенным с использованием традиционной технологии - лужением.

Как видно из рисунка, переходный 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, в данном случае, удерживается на стальной подложке только за счет адгезии (прилипания) – возникновения молекулярной связи между поверхностными слоями соприкасающихся разнородных твердых тел.

Иная структура и распределение микротвердости в граничной зоне при ЭАЛ стали 20 медью или оловянной бронзой. В этом случае между оловом и медью или оловом и компо-



а) $\times 400$



б)

Рис. 6. Микрошлиф (а) и распределение микротвердости (б) в поверхностном слое стали 20 с лужением оловом.

нентами оловянной бронзы образуются твердые растворы замещения, обеспечивающие более прочную связь. В свою очередь, прочная связь между стальной подложкой и медью или оловянной бронзой обеспечивается ЭАЛ, что подтверждается наличием в сформированных слоях диффузионной зоны (рис. 5). Микротвердость в переходной зоне первоначально плавно повышается от 210-230 МПа (олово) до 2700-2800 МПа (ЗТВ), а затем плавно снижается до микротвердости металла основы (рис. 7).

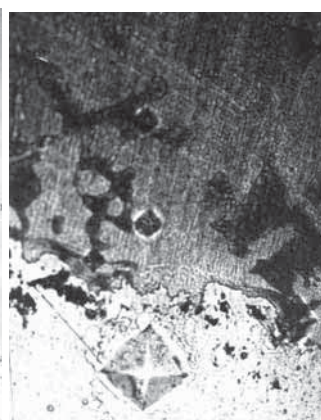
На рис. 7 представлены изображения одного и того же участка шлифа стали 20 с покрытием из меди, сформированным ЭАЛ на 9-м режиме. На рис. 7, а показан нетравленный шлиф для лучшего изображения отпечатков алмазной пирамиды, полученных при измерении микротвердости, а на рис. 7, б изображен участок после травления с целью выявления качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя.

Таким образом, металлографическими исследованиями подтверждено, что лучшее качество поверхностного слоя (сплошность до 100%, равномерность и др.) при ЭАЛ стали 20 медью и оловянной бронзой достигается при использовании защитной среды – аргона. Наиболее рациональным является 9-й режим легирования ($U_{x.x} = 87$ В; $I_p = 1,1-1,3$ А; $C = 150$ мкФ), что соответствует энергии разряда 0,34 Дж.

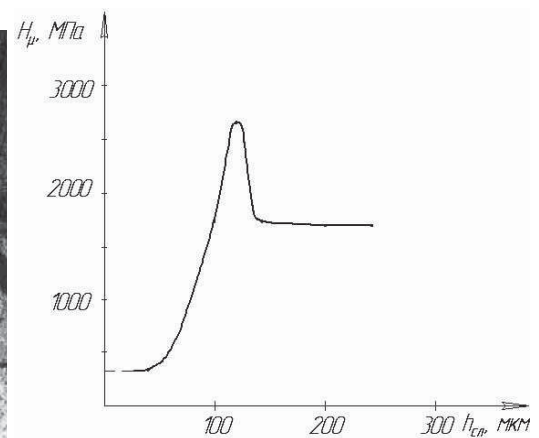
ЭАЛ стали 20 медью или оловянной бронзой обеспечивает прочное соединение нанесенного металла с основой, о чем свидетельствует наличие на микрофотографиях диффузионной зоны – зоны взаимного перераспределения элементов покрытия и переходного слоя. Использование в качестве подложки стали 20 в состоя-



а) $\times 200$



б) $\times 400$



в)

Рис. 7. Микрошлифы (а, б) и распределение микротвердости (в) в переходном слое при ЭАЛ стали 20 медью с последующим лужением оловом.

нии поставки (без термообработки) обуславливает наличие под диффузионной зоной ЗТВ с микротвердостью, выше микротвердости основы.

Следует отметить, что при энергии разряда $W_p > 0,4$ Дж качество легируемой поверхности снижается, как при легировании на воздухе, так и в защитной среде аргона. На поверхности появляются прижоги, электроды механически разрушаются и отдельные частицы размером до 0,2-0,5 мм «привариваются» к легируемой поверхности. Особенно это проявляется при легировании в воздушной среде. К практическому применению рекомендуются режимы, соответствующие энергии разряда $W_p = 0,2 - 0,4$ Дж, обеспечивающие 100% сплошность, шероховатость $Rz = 9$ мкм, толщину слоя $\Delta h = 0,02 - 0,03$ мм. Качественные параметры поверхностного слоя при ЭАЛ на установке «ЭИЛ-8А» образца из стали 20 медью представлены в табл. 1.

В настоящее время как на Украине, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья используется большое количество установок ЭАЛ, например, «ЭИЛ-6», «ЭИЛ-7», «ЭИЛ-8» (Украина), «Элитрон-14», «Элитрон-22», «Элит-

Таблица 1. Результаты качественных параметров формируемых поверхностных слоев при ЭАЛ стали 20 в среде аргона

Режим	Емкость конденсатора, С, мкФ	Энергия разряда, W_p , Дж	Производительность, Т, мин	Шероховатость, Rz, мкм	Прирост, Δh , мм
3	150 мкФ	0,04	2,50	7	0,01
5		0,1	0,90	8	0,02
7		0,2	0,65	9	0,02
9		0,34	0,55	10	0,03
3	300 мкФ	0,08	1,1	7	0,01
5		0,2	0,70	8	0,02
7		0,4	0,53	9	0,03
9		0,68	0,50	15	0,04

рон-52», «Элитрон-347» (Молдова), «Tucadur 2000» (Италия), «HSR-FS» (Швейцария), «F-5» (США) и др., отличающиеся как конструктивно, так и режимами легирования. В связи с этим возникает необходимость в разработке методики определения оптимальных режимов легирования на той или иной установке, в данном случае, режимов для формирования поверхностного слоя из меди на подложке из стали 20. Под режимами понимается энергия разряда W_p и производительность Т, определяемая, как мин/см².

Исходя из экспериментальных данных (табл. 1), можно построить зависимость времени легирования (производительности ЭАЛ), затраченного на получение 100% сплошности покрытия поверхности образца из стали 20 медью от энергии разряда (рис. 8).

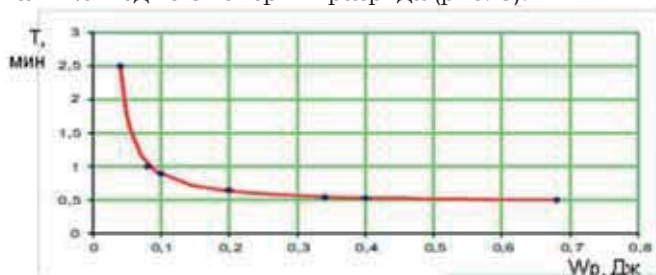


Рис. 8. Зависимость производительности процесса ЭАЛ от энергии разряда при легировании стали 20 медью.

Как видно из графика, зависимость производительности процесса ЭАЛ от энергии разряда при леги-

ровании стали 20 медью в первом приближении - экспоненциально убывающая, а от величины обратной энергии разряда - экспоненциально возрастающая (рис. 9).

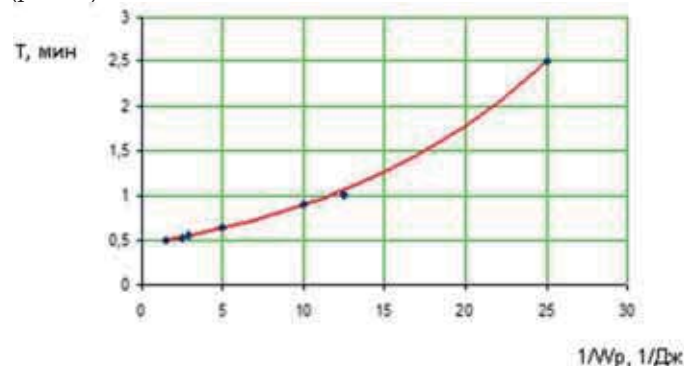


Рис. 9. Зависимость производительности процесса ЭАЛ от величины, обратной энергии разряда, при легировании стали 20 медью.

Исходя из зависимости $T = f(W_p^{-1})$, можно сказать, что $\ln T$ пропорционально величине, обратной энергии разряда (W_p^{-1}) и энергии активации процесса ЭАЛ медью 100% площади поверхности образца из стали 20 - E_A ,

$$\ln T \sim W_p^{-1}, E_A. \quad (1)$$

Переходя от приближенного равенства к точному, имеем

$$T = C \cdot e^{\frac{E_A}{W_p}}, \quad (2)$$

где $C = T_{\min}$ (T_{\min} - минимальное время покрытия медью 100% площади поверхности образца из стали 20).

Тогда

$$T = T_{\min} \cdot e^{\frac{E_A}{W_p}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) назовем уравнением прогнозирования производительности (Т) при ЭАЛ медью 100% площади поверхности образца из стали 20, которое имеет две константы: T_{\min} и E_A .

При $W_p \rightarrow \infty$ уравнение (3) примет вид:

$$T = T_{\min}. \quad (4)$$

Таким образом, предэкспоненциальный фактор уравнения (3) T_{\min} можно определить по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой зависимости $\ln T = f(W_p^{-1})$, продолженной (экстраполированной) до значения абсциссы $W_p^{-1} = 0$ (рис. 10). Зависимость $\ln T = f(W_p^{-1})$ строим по экспериментальным данным табл. 2.

Для определения E_A примем

Таблица 2. Зависимость $\ln T$ от величины, обратной энергии разряда

№ режима	W_p	W_p^{-1}	Т	$\ln T$
1	0,04	25	2,5	0,916
2	0,08	12,5	1,1	0,095
3	0,10	10	0,9	-0,105
4	0,2	5	0,65	-0,430
5	0,34	2,94	0,55	-0,597
6	0,40	2,5	0,51	-0,673
7	0,68	1,47	0,5	-0,693

$$E_A = W_p \cdot e \quad (5)$$

Тогда уравнение (3) примет вид

$$T = T_{\min} \cdot e \quad (6)$$

Отсюда E_A - это физическая величина, равная таковой энергии разряда, при которой T_{\min} меньше T в e раз. Назовем ее константой ЭАЛ медью поверхности стали 20. Размерность $[E_A]$ - Дж.

Энергию активации E_A можно определить, как

$$E_A = \text{tg} \alpha, \quad (7)$$

где α - угол наклона прямой зависимости $\ln T = f(W_p^{-1})$ (рис. 10).

Значения констант уравнения (3) - минимального времени ЭАЛ медью 100% площади поверхности образца из стали 20 (T_{\min}) и энергии активации этого процесса E_A , приведены в табл. 3.

Таблица 3. Вычисленные константы уравнения (4) T_{\min} и E_A

T_{\min} , МИН	E_A , Дж
0,452	0,0684

Таким образом, зная константы уравнения прогнозирования производительности (T) при ЭАЛ медью стали 20, можно определить оптимальную энергию разряда и оптимальную производительность процесса на любой установке ЭАЛ.

Оптимальная энергия разряда на конкретной установке обеспечивается режимом легирования, при котором энергия разряда максимально приближена, но меньше 0,4 Дж.

Зная энергию разряда W_p , по уравнению (3) определяем оптимальную производительность процесса ЭАЛ стали 20 медью.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- разработана методика определения оптимальных режимов формирования методом ЭАЛ переходного слоя из меди, повышающих прочность сцепления подложки из стали 20 и антифрикционного баббитового слоя;
- получено уравнение прогнозирования производительности процесса ЭАЛ стали 20 медью;
- определены константы уравнения прогнозирования производительности процесса ЭАЛ при легировании медью поверхности стали 20 (минимальное время легирования T и энергия активации процесса E_A).

Литература:

1. Пат. 95009 Украина, МПК F16C 9/00, F16C 33/04, B23H 9/00. Спосіб складання підшипника ковзання / В. С. Марцинковський, В. Б. Тарельник, Н. В. Тарельник; заявл. 07.12.09, опубл. 25.06.11, Бюл. № 12. - 5 с.
2. Пат. 2422690 Российская федерация, МПК F16C17/02, F16C33/04. Спосіб сборки підшипників ковзання / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б., Та-

рельник Н. В.; заявитель и патентообладатель Марцинковський В. С.; заявл. 07.12.09, опубл. 25.06.11, Бюл. № 12. - 5 с.

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

4. Пат. 92814 Украина, МПК B23H1/00. Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б.; заявл. 29.01.2009, опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. - 2 с.

5. Пат. 2404378 Российская Федерация МПК B23H9/00. Спосіб обробки вкладишів підшипників / Марцинковський В. С., Тарельник В. Б.; заявитель и патентообладатель Марцинковський В. С.; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. - 2 с.

6. Пат. 105422 Украина, МПК (2014.01), B23H 1/00, B23H 5/00. Спосіб поліпшення припрацьовуваності пари тертя «вкладиш підшипника-шійка вала» / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, О. В. Дзюба; СНАУ. - № 105422; заявл. 05.10.2012; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

7. Лебедева А. П. Восстановление деталей машин / А. П. Лебедева, Т. Н. Погорелова. - М.: Машиностроение, 2003. - 672 с.

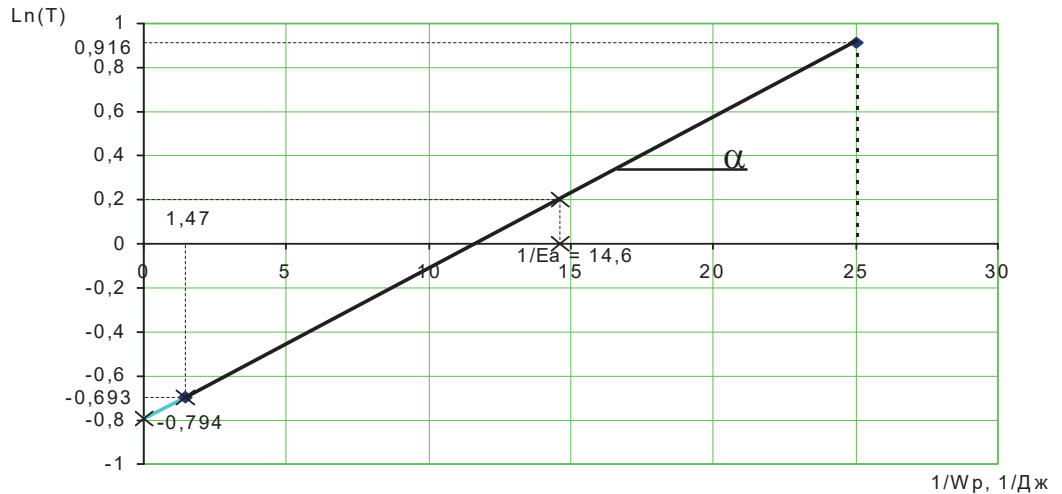


Рис. 10. Зависимость $\ln T = f(W_p^{-1})$.

8. Барыкин Н. П. Изготовление подшипников скольжения с применением штамповки антифрикционного слоя в условиях кристаллизации и последующей пластической деформации / Н. П. Барыкин, Р. Ф. Фазлыяхметов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2006. - №9. - С. 27-29.

9. Валева А. Х. Микроструктура и свойства электроосажденного сплава SnSbCu / А. Х. Валева, И. Ш. Валеев, Р. Ф. Фазлыяхметов // Письма о материалах. - 2014. - №4(3). - С. 134-136.

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. - 2013. - Вип. 134. - С. 244-251.

11. Tarelnyk V. New Method of Friction Assemblies Reliability and Endurance Improvement / V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, A. Dziuba // Applied Mechanics and Materials. - 2014. - Vol. 630. - P. 388-396.

12. Пат. 64663A Украина, МКВ B23H1/00. Спосіб обробки вкладишів підшипників ковзання / В. С. Марцинковський, В. Б. Тарельник; опубл. 16.02.2004, Бюл. №2.