

В.Б. ТАРЕЛЬНИК, Г.А. БАКАЙ, В.С. МАРЦИНКОВСКИЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СЛОЯ ИЗ МЕДИ НА ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ И ОЛОВА

In article the technique and results of theoretical researches of influence of a transitive layer from copper on durability of its connection with a steel substrate from tin is resulted.

Большинство ответственных деталей и узлов центробежных компрессоров, насосов, турбин и других машин работают при высоких скоростях, нагрузках и температурах, а также в условиях коррозионного, абразивного и других видов воздействия рабочих сред.

Решение проблемы, связанной с увеличением сроков 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), является актуальной задачей.

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.

Как правило, перед заливкой баббитов поверхность стального вкладыша подшипника (ВП) подвергается лужению. При этом на площадках фактического контакта поверхностей действуют силы молекулярного притяжения, которые проявляются на расстояниях в десятки раз превышающих межатомные в кристаллических решетках, и увеличиваются с повышением температуры. Переходной слой, обуславливающий прочную металлическую связь, при этом отсутствует, что отрицательно влияет на качество заливки баббита, теплопроводность и работоспособность подшипника в целом.

На основании анализа технологии изготовления ВП, изучения условий их работы и причин выхода из строя нами предлагается на стальную подложку перед лужением оловом наносить промежуточный слой из меди. Это обеспечит более прочное сцепление стальной подложки с баббитом, а также более интенсивный отвод тепла из зоны трения.

Существует большое количество различных методов нанесения покрытий из мягких металлов на стальные изделия (гальванический способ, металлизация напылением и др.). Сравнение их достоинств и недостатков позволило обоснованно выделить как наиболее перспективный метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ), обеспечивающий прочное сцепление нанесенного металла с подложкой, что является определяющим в выборе данной технологии. Кроме того, такой недостаток ЭЭЛ, как повышение шероховатости поверхности, применительно к данной технологии будет выступать как достоинство.

Энергия связи атомов металла обусловлена сдвигом энергетических уровней валентных электронов кристалла в сторону уменьшения энергии по сравнению с энергией валентных электронов свободных атомов [1].

Если принять энергию электрона на поверхности кристалла $E_s = 0$, то можно представить схему энергии связи в металле посредством указания энергетических уровней электронов (рис. 1), где E_s – нулевая энергия электрона; $E_{свб. атом.}$ – энергия основного состояния валентного электрона в свободном атоме (энергия ионизации атома); E_m – средняя трансляционная энергия электрона в металле; E_f – уровень Ферми; E_a – наименьшее состояние валентного электрона при $\vec{k} = 0$, где \vec{k} – волновой вектор, абсолютная

величина $k = \frac{2pp}{h}$, где p – импульс частицы, h – постоянная Планка.

Учитывая данные обозначения на рис. 1 можно записать выражение для энергии связи на один атом [2].

$$E_{\text{связи атом}} = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + E_m \quad (1)$$

Состояние электронов обозначается энергией E свб. атом., когда атомы находятся на больших расстояниях (парообразное состояние) и взаимодействие между электронами атомов металла равно нулю.

При образовании кристаллов металла атомы сближаются, и электроны вследствие взаимодействия образуют энергетические полосы шириной $E_f - E_a$. Образование энергетических полос обусловлено принципом Паули, который запрещает двум электронам (точнее частицам), подчиняющимся статистике Ферми-Дирака, находиться на одном энергетическом уровне.

Таким образом, энергия связи в кристаллическом металле есть энергия, которую нужно затратить, чтобы перевести все электроны с полосы энергии $E_f - E_a$ на энергетические уровни, которые они занимали до образования кристаллов металла, т. е. на $E_{свб. атом.}$.

Чтобы проанализировать энергию связи атомов в переходе металл-металл, возникающую в соединениях Fe - Sn и Fe - Cu - Sn, полученных

сплавлением, ЭЭЛ и другими способами, необходимо для удобства получить схемы энергетических уровней данных металлов.

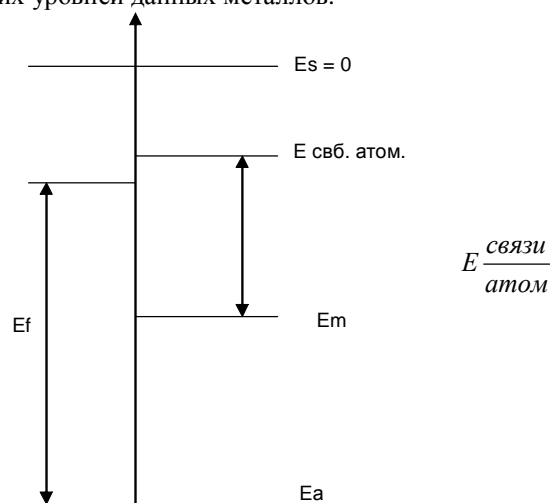


Рис. 1 – Расположение энергетических уровней электронов в металле

Энергия атома металла в свободном состоянии определяется энергией ионизации атома [3], т. е. $E_{свб. атом.} = E_i$.

Ионизационные потенциалы определены для всех химических элементов и приводятся в электрон-вольтах (эВ). Так для Fe, Cu и Sn находим из [4]:

$$E_i(\text{Fe}) = 7,83 \text{ эВ};$$

$$E_i(\text{Cu}) = 7,72 \text{ эВ};$$

$$E_i(\text{Sn}) = 7,30 \text{ эВ}.$$

Чтобы проанализировать изменение энергии связи между атомами в переходах металл-металл, образованных металлами Fe - Sn и Fe - Cu - Sn, располагая энергией ионизации атомов, необходимо также вычислить среднюю трансляционную энергию E_m , которую можно определить вычислив энергию Ферми E_f .

Для химических элементов энергию Ферми вычисляем из соотношения [3]:

$$E_f = \frac{\hbar^2}{2m_e} \sqrt[3]{(3\hbar^2)^2} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{N}{V}\right)^2}, \quad (2)$$

где \hbar - постоянная Планка, m_e - масса покоя электрона, $\frac{N}{V}$ - концентрация свободных электронов в кристаллическом металле.

Концентрация электронов $\frac{N}{V}$ определяется произведением валентности металла на число атомов в 1 см^3 [3,5].

Концентрация электронов для Fe, Cu, Sn приведена в [3] и равна:

$$\frac{N}{V}(\text{Fe}) = 17,0 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3;$$

$$\frac{N}{V}(\text{Cu}) = 8,45 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3;$$

$$\frac{N}{V}(\text{Sn}) = 14,48 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3.$$

Энергия Ферми для химических элементов Fe, Cu, Sn приведена в [3, 5] и равна:

$$E_f(\text{Fe}) = 11,16733 \text{ эВ};$$

$$E_f(\text{Cu}) = 7,00 \text{ эВ};$$

$$E_f(\text{Sn}) = 10,03 \text{ эВ}.$$

В изолированном состоянии (при отсутствии контакта металлов) электронный газ металлов характеризуется работой выхода W , которая для Fe, Cu, Sn, соответственно равна [5]:

$$W(\text{Fe}) = 4,31 \text{ эВ};$$

$$W(\text{Cu}) = 4,4 \text{ эВ};$$

$$W(\text{Sn}) = 4,38 \text{ эВ}.$$

Работа выхода - это энергия, необходимая для удаления электрона с уровня Ферми, расположенного в потенциальной яме металла в точку, расположенную снаружи металла вблизи его поверхности, т. е.

$$W = -E_f. \quad (3)$$

При соединении металлов: Fe с работой выхода $W(\text{Fe})$ и Sn с работой выхода $W(\text{Sn})$ таким образом, что электроны могут переходить от одного из них к другому, после установления равновесия электронный газ должен иметь общий химический потенциал. В металлах зависимость между энергией Ферми и химическим потенциалом выражается соотношением [5]:

$$\mu = \left[1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\pi K_B T}{2E_f} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где μ - химический потенциал; T - абсолютная температура; K_B - постоянная Больцмана. При комнатных температурах можно принимать $\mu = E_f$.

Выравнивание энергетических уровней Ферми происходит следующим образом. Электрон, находясь на более высоком энергетическом уровне Fe,

переходя на более низкий уровень Sn, переносит отрицательный заряд. Следовательно, Sn приобретает электрон, заряжается отрицательно, а Fe, теряя электрон, заряжается положительно. При переходе следующего электрона с Fe на Sn на электрон действует отталкивающая сила, так как металл Sn заряжен отрицательно. Преодолевая отталкивающую силу, электрон переходит из металла Fe на свободный уровень в металле Sn, увеличивая потенциальную энергию в Sn на eV эВ, где e – заряд электрона; V – разность потенциалов на расстоянии d , где образовалось электрическое поле \vec{E} , вызванное нескомпенсированным зарядом.

Если обозначить расстояние d , на котором падает напряжение V , то при прохождении этого расстояния электроном, приобретенная кинетическая энергия, превращаясь в потенциальную энергию, увеличивает потенциальную энергию в металле Sn на eV , что можно увидеть из приведенного вычисления:

$$A = e \int_0^d \vec{E} d\vec{r} = e \int_0^d \frac{V}{d} dr = \frac{eV}{d} r \Big|_0^d = \frac{eV}{d} d = eV, \quad (5)$$

где A – работа по перемещению электрона.

Таким образом, все энергетические уровни металла Sn поднимаются на eV эВ. Аналогично, электроны, проходя расстояние d , где действует положительный заряд, в металле Fe ускоряются, уменьшая потенциальную энергию.

Когда уровни Ферми железа, опускаясь вниз, а уровни Ферми олова, поднимаясь вверх, оказываются на одном энергетическом уровне, то в переходе металл Fe – Sn устанавливается равновесие.

При этом контактная разность потенциалов равна [2]:

$$V_K = \frac{1}{e} [W(Sn) - W(Fe)] = V_1 - V_2, \quad (6)$$

где V_K – разность потенциалов; V_1 и V_2 – потенциалы, соответственно Sn и Fe.

Выравнивание энергетических уровней Ферми выражается соотношением:

$$E_f(Fe) = E_f(Sn), \quad (7)$$

а, из соотношения (2) следует, что энергия Ферми зависит от плотности электронов в металлах. Поэтому плотность электронов в железе уменьшается после перехода их в олово, а в олове их плотность увеличивается.

Величина уменьшения энергии Ферми в железе, как и величина увеличения энергии Ферми в олове определяется соотношением:

$$\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = \frac{eV_K}{2}. \quad (8)$$

Следовательно, уменьшенная энергия Ферми после установления термодинамического равновесия для железа определяется соотношением:

$$E_f'(Fe) = E_f(Fe) - \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2}. \quad (9)$$

Увеличенная энергия Ферми для олова имеет вид:

$$E_f'(Sn) = E_f(Sn) + \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2}. \quad (10)$$

Так как энергия Ферми зависит от плотности электронов (2), то вычислив по формуле (9) $E_f'(Fe)$, находим плотность электронов, переписав соотношение (2) в следующем виде:

$$\left(\frac{N}{V}\right) = 4,542291 \cdot 10^{21} \cdot \sqrt{[E_f'(Fe)]^2}, \quad (11)$$

где $\left(\frac{N}{V}\right)$ – плотность электронов в Fe после соединения.

Подставляя численное значение $E_f'(Fe)$ в (11) получим плотность электронов в железе после соединения:

$$\left(\frac{N}{V}\right)(Fe) = 1,687151 \cdot 10^{23} \text{ 1/см}^3.$$

Количество электронов, перешедшее из Fe в Sn, найдем, вычисляя разность между значениями плотности в Fe до соединения и значением плотности в Fe после соединения с Sn:

$$\Delta n = \frac{N}{V}(Fe) - \left(\frac{N}{V}\right)'(Fe) = 1,7 \times 10^{23} - 1,687151 \times 10^{23} = 7,996 \times 10^{20} / \text{см}^3.$$

Уменьшение плотности электронов в Fe после соединения с Sn составляет около 0,5%.

Увеличение плотности в Sn после соединения с Fe равно

$$\left(\frac{N}{V}\right)'(Sn) = 14,48 \times 10^{22} + 7,996 \times 10^{20} = 1,455996 \times 10^{23} \text{ 1/см}^3.$$

Энергия Ферми, вычисленная по формулам (9) и (10) после установления термодинамического равновесия равна для металлов Fe и Sn соответственно:

$$E_f'(Fe) = E_f(Fe) - \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 11,16733 - \frac{4,38 - 4,31}{2} = 11,13233 \text{ эВ};$$

$$E_f'(Sn) = E_f(Sn) + \frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 10,03 + \frac{4,38 - 4,31}{2} = 10,065 \text{ эВ}.$$

Располагая данными $E_f'(Fe)$ и $E_f'(Sn)$, вычислим среднее значение кинетической трансляционной энергии для железа и олова, которое согласно [2] определяется по соотношению:

$$E_{f,m} = \frac{3}{5} E_f \quad (12)$$

Тогда:

$$E_{f,m}(Fe) = \frac{3}{5} E_f(Fe) = 6,679398 \text{ эВ};$$

$$E_{f,m}(Sn) = \frac{3}{5} E_f(Sn) = 6,039 \text{ эВ}.$$

Используя соотношение (12), вычисляем трансляционную кинетическую энергию электронов в Fe и Sn до соединения, которая соответственно равна:

$$E_{f,m}(Fe) = 0,6 \times 11,16733 = 6,700398 \text{ эВ}.$$

$$E_{f,m}(Sn) = 0,6 \times 10,03 = 6,018 \text{ эВ}.$$

Чтобы проанализировать уменьшение энергии связи Sn при соединении с Fe, необходимо подставить в уравнение (1) значения $E_{f,m}(Sn)$ и $E_{\text{связи}}^{\text{атом}}$, после чего получим уравнение для энергии связи в Sn до соединения с Fe.

Значения энергии связи для химических элементов Fe, Cu, Sn, согласно [3], соответственно равны:

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}}(Fe) = 4,29 \text{ эВ};$$

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}}(Cu) = 3,50 \text{ эВ};$$

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}}(Sn) = 3,12 \text{ эВ}.$$

Уравнение связи (1) для Sn до соединения имеет вид:

$$3,12 = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 6,018. \quad (13)$$

Подставляя данные в уравнение (1) после соединения Sn с Fe, необходимо учесть, что после перетока электронов с Fe в Sn в олове появляется нескомпенсированный заряд (отрицательный), который равномерно поднимает все энергетические уровни вместе с уровнем Ферми на величину $\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 0,35 \text{ эВ}$.

Кроме того, вследствие увеличения плотности электронов увеличивается средняя кинетическая трансляционная энергия на величину

$$E_{f,m}(Sn) - E_{f,m}(Sn) = 6,039 - 6,018 = 0,021 \text{ эВ}.$$

Поэтому уравнение (1) после соединения Fe и Sn принимает вид:

$$E_{\text{связи}}^{\text{атом}} = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 0,021 + 6,018 + 0,035. \quad (14)$$

Переписывая уравнение (14) получим:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,12 - 0,056 = E_{\text{свб. атом.}} - E_a + 6,018. \quad (15)$$

Таким образом, энергия связи уменьшится и равна $E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,064 \text{ эВ}$.

Аналогично анализируем увеличение энергии связи для Fe после соединения с Sn, учитывая, что все энергетические уровни электронов, в том числе и уровень Ферми E_f , за счет уменьшения потенциальной энергии на $\frac{W(Sn) - W(Fe)}{2} = 0,35 \text{ эВ}$ и уменьшения кинетической трансляционной энергии на $6,700398 - 6,679398 = 0,021 \text{ эВ}$.

Анализируя, подобно анализу уравнений (14) и (15) заключаем, что энергия связи в переходе металл-металл в Fe увеличивается на 0,056 эВ и станет равной:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 4,29 + 0,056 = 4,346 \text{ эВ}.$$

Таким образом, энергия связи в слое Sn равна:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,12 + 0,016 = 3,136 \text{ эВ}.$$

Энергия связи в переходном слое Cu уменьшается на 0,016 эВ и равна:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}} = 3,50 - 0,016 = 3,484 \text{ эВ}.$$

При соединении Fe – Cu за счет перетока электронов из Fe в Cu энергетический уровень Ферми поднимется за счет увеличения потенциальной энергии и равен, согласно (10):

$$E_f(Cu) = E_f(Fe) + \frac{W(Cu) - W(Fe)}{2} = 7,00 + \frac{4,4 - 4,31}{2} = 7,045 \text{ эВ}.$$

Средняя кинетическая трансляционная энергия в переходном слое Cu до и после соединения, согласно (12), равна:

$$E_{f,m}(Cu) = 0,6 \times 7,00 = 4,200 \text{ эВ};$$

$$E_{f,m}(Cu) = 0,6 \times 7,045 = 4,227 \text{ эВ}.$$

Следовательно, за счет увеличения кинетической трансляционной энергии происходит уменьшение энергии связи в Cu на $4,227 - 4,200 = 0,027 \text{ эВ}$.

Таким образом, энергия связи в Cu уменьшается на $0,027 + 0,045 = 0,072 \text{ эВ}$ и оказывается равной:

$$E_{\text{атом}}^{\text{связи}}(Cu) = 3,50 - 0,072 = 3,428 \text{ эВ},$$

а энергия связи в переходном слое железа увеличится на 0,072 эВ.

Тогда: $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Fe}) = 4,29 + 0,072 = 4,362 \text{ эВ}$.

Если сравнить энергии связи на атом в химических элементах Fe, Cu и Sn, которые согласно [3] равны:

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Fe}) = 4,29 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Cu}) = 3,50 \text{ эВ};$$

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Sn}) = 3,12 \text{ эВ},$$

то наименьшая энергия связи на атом приходится на химический элемент Sn.

При соединении элементов Fe и Sn энергия связи в слое Sn уменьшится на 0,056 эВ и становится равной $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Sn}) = 3,064 \text{ эВ}$.

При соединении элементов по схеме Fe - Cu - Sn энергия связи в элементе переходного слоя Sn увеличивается на 0,016 эВ и становится равной

$$E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Sn}) = 3,136 \text{ эВ}.$$

Следует отметить, что при этом уменьшится энергия связи в Cu на 0,016 эВ и станет равной $E \frac{\text{связи}}{\text{атом}}(\text{Cu}) = 3,484 \text{ эВ}$, но и после этого уменьшения энергия связи на атом в Cu заметно больше чем энергия связи в Sn.

Следовательно, если соединить элементы по схеме Fe - Cu - Sn, то энергия связи в Sn не уменьшается, а немного увеличивается, а если соединить по схеме Fe - Sn, то энергия связи в Sn уменьшается.

Таким образом, самое слабое звено системы соединения (Sn) при соединении металлов по схеме Fe - Sn приводит к снижению прочности Sn и упрочнению Fe, а при соединении по схеме Fe - Cu - Sn самое слабое звено Sn упрочняется.

Выводы

Теоретическими исследованиями установлено, что самое слабое звено системы соединения (Sn) при соединении металлов по схеме Fe - Sn приводит к снижению прочности Sn и упрочнению Fe, а при соединении по схеме Fe - Cu - Sn самое слабое звено Sn упрочняется.

Список литературы: 1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986.- 544с. 2. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. - М.: Мир, 1968.- 558 с. 3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.- М.: Наука, 1978.-790 с. 4. Борн М. Атомная физика. - М.: Мир, 1970.- 488 с. 5. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела.- М.: Мир, 1979.- 399 с.

Поступила в редколлегию 15.05.2008

УДК621.757.001.57

А.Г. ЯСЕВ, К.Г. МЕЖЕННАЯ

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ВАЛОВ ГИДРОМАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Two cases of grinding of billows of hydraulic machines are analyzed in the article; basic reliability indexes of this method are expected. The rational parameters of tuning of the technological system are certain.

В условиях реальных производственных процессов возникает необходимость рассмотреть в качестве объекта теории надежности метод механической обработки [1]. Повышение надежности процесса механической обработки с целью стабильного обеспечения заданной точности обрабатываемых деталей является актуальным вопросом, поскольку надежность определяет эффективность использования станков и автоматических линий и обуславливает показатели производительности и экономичности технологических процессов.

Целью данной статьи является применение аппарата показателей теории надежности при исследовании процесса шлифования валов гидромашин в условиях реальной технологической системы на предприятии-изготовителе, а также определение рациональных параметров настройки технологической системы для обеспечения заданного уровня точности обработки.

Исследование проведено для вала двигателя ДС0.02 (вал I) и вала насоса ДЦН80 (вал II).

Для вала I были собраны статистические данные операции шлифования поверхности $\varnothing 8f9 \left(\begin{smallmatrix} -0.013 \\ -0.049 \end{smallmatrix} \right)$, R_a 1,25 мкм, и установлено, что поле рассеивания выходит за пределы поля допуска (возможно возникновение брака на операции).

Таблица 1 – Параметры распределений полученных размеров при шлифовании валов

№ п/п	Закон распределения	Математическое ожидание a , мм	Среднеквадратическое отклонение σ , мкм	Ассиметрия α
Вал I	Нормальный	7,961	8,9698	-0,414
Вал II	t-распределение	17,90	1,9326	0,33

При исследовании шлифования поверхности $\varnothing 18g7 \left(\begin{smallmatrix} -0.006 \\ -0.018 \end{smallmatrix} \right)$, R_a 0,32 мкм вала II было установлено, что поле рассеивания находится в пределах поля допуска.