

УДК 621.822.1:669.017.3

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОРМИРОВАНИЯ
АНТИФРИКЦИОННЫХ БАББИТОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА
ПОВЕРХНОСТНУЮ ЭНЕРГИЮ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ**

**Тарельник В.Б., профессор, Дзюба А.В., аспирант,
Бакай Г.А., старший преподаватель**
(Сумской национальной аграрный университет)

Представлены результаты анализу влияния температуры формирования антифрикционных баббитовых покрытий на поверхностную энергию стальной подложки. Установлено наличие большей энергии связи атомов в гранецентрированной кристаллической решетке по сравнению с объемно центрированной кристаллической решеткой. Предложено использовать для формирования антифрикционного баббитового слоя метод электроэрозионного легирования.

Введение. Повышение надежности и долговечности работы машин и механизмов за счет уменьшения интенсивности их изнашивания связано с проблемами повышения износостойкости и надежности узлов трения. Для повышения работоспособности поверхностей трения деталей машин, наряду с традиционными методами, такими как поверхностное пластическое деформирование, термическая, химико-термическая и химическая обработка, применяются также и композиционные материалы типа основа покрытие, сочетающие в себе защитные свойства покрытий с механической прочностью основы. Применение покрытий обуславливается еще и тем, что разрушение детали начинается, как правило, с поверхности. Таким образом исследования процессов формирования покрытий, направленных на повышение их качества, своевременны и актуальны, а создание поверхностных слоев с особыми свойствами для узлов трения скольжения, в данном случае подшипников скольжения (ПС), является актуальной задачей.

Анализ основных достижений и публикаций. При изготовлении вкладышей ПС наиболее широко применяют антифрикционные сплавы на оловянной и свинцовой основе (баббиты). Основные требования, предъявляемые к антифрикционным сплавам, определяются условиями работы вкладышей подшипников (ВП). Эти сплавы должны иметь достаточную твердость, но не очень высокую, чтобы не вызвать сильного износа вала; сравнительно легко деформироваться под влиянием местных напряжений; удерживать смазочный материал на поверхности; иметь малый коэффициент трения между валом и подшипником. Кроме того, в значительной степени на работоспособность ПС влияет качество сцепления антифрикционного баббитового слоя с подложкой [1].

В [2] качество покрытия характеризуется следующими свойствами: прочностью сцепления покрытия с основой, когезионной прочностью напыленного слоя, пористостью, равномерной толщиной покрытия, уровнем остаточных напряжений, однородностью структуры и свойств покрытия.

В [3] утверждается, что прочность сцепления железных покрытий с материалом детали зависит от многих факторов и условий выполнения технологического процесса. Определяющее влияние на сцепление оказывают химический состав материала детали, его термическая обработка, механические условия электрохимических операций, начальные и последующие режимы электроосаждения.

В [4] описаны способы нанесения баббита на основу вкладышей ПС, это: ручная заливка, центробежная заливка, под давлением, газотермическое напыление. Как правило, во всех случаях основой для напыления является Ст.20 (ГОСТ 1050-88). Хотя могут использоваться и другие материалы, имеющие хорошую адгезию с оловом, такие, как Ст.10, Ст.15, бронза, латунь. При заливке вкладышей с основой из чугуна поверхности, на который наносится баббитовый слой, никелируются [5].

В последние годы для изготовления и ремонта ПС нашли применение несколько новых методов: гальваническое наращивание и штамповка в температурном интервале [6, 7]. Кроме того, для нанесения антифрикционных покрытий все шире используется метод электроэрозионного легирования [8].

Следует отметить, что температура стальной подложки при различных способах нанесения антифрикционного баббитового слоя может значительно отличаться. Так, например, гальваническое наращивание протекает при комнатной температуре. Согласно [4], при газотермическом напылении, подложку подогревают до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, при ручной и центробежной заливке температура лужения составляет $300 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, а заливки баббита $420 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. При электроэрозионном легировании температура разряда, возникающая между двумя электродами, в зависимости от емкости конденсатора, составляет $7200 - 10200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9].

Согласно [10], атомы в кристаллическом твердом теле располагаются в пространстве закономерно, периодически повторяясь в трех измерениях через строго определенные расстояния, т.е. образуя кристаллическую решетку. Железо, в зависимости от температуры, может иметь две различные кристаллические решетки: объемно центрированную кубическую (ОЦК) и гранецентрированную кубическую (ГЦК) (рис. 1). Это явление называется полиморфизмом. Температура при которой осуществляется переход из одной модификации в другую, носит название температуры полиморфного (аллотропического) превращения. Так, железо имеет две температуры полиморфного превращения: 911 и $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Внутри твердого тела каждый атом кристалла окружен другими атомами и связан с ними прочно по всем направлениям, а у атомов, расположенных на поверхности, с внешней стороны нет «соседей» в виде таких же атомов. В связи

с этим в поверхностном слое у атомов твердого тела остаются свободные связи, наличие которых создает вблизи поверхности атомное (молекулярное) притяжение.

Поверхностные атомы вследствие свободных связей обладают большей энергией, нежели атомы внутри твердого тела. Избыток энергии, отнесенной к единице поверхности, называют удельной поверхностной энергией или просто поверхностной энергией [11].

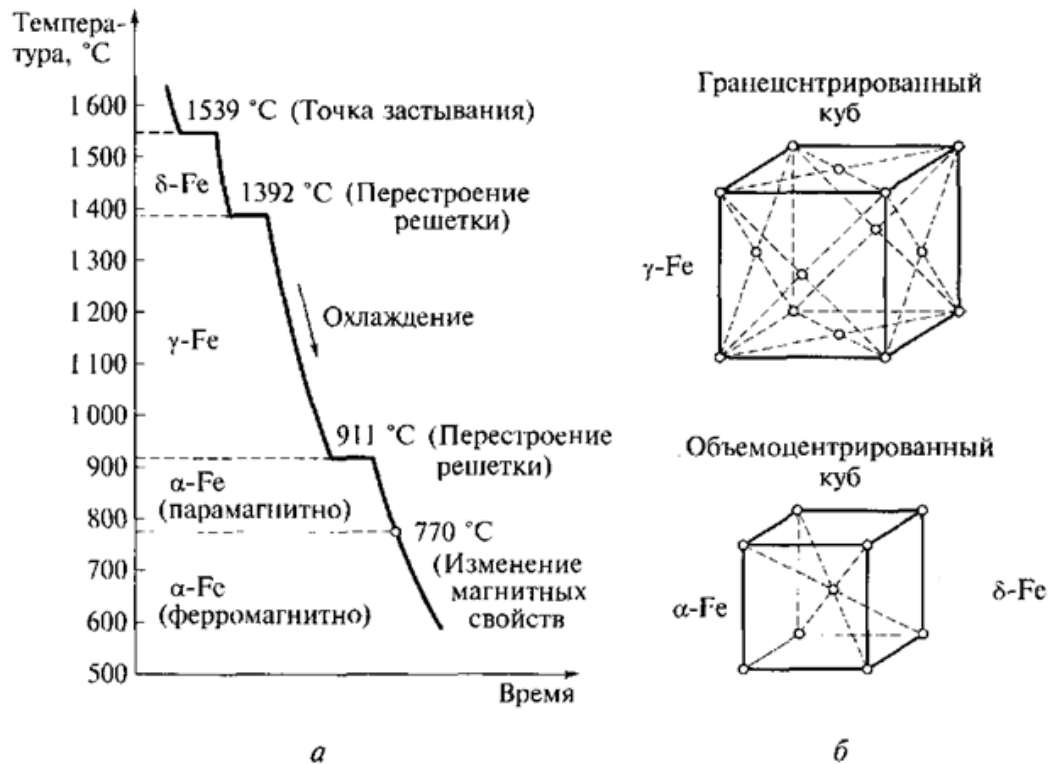


Рисунок 1 – Кривая охлаждения железа (а) и структура кристаллической решетки модификаций железа (б)

Учитывая большое количество методов формирования антифрикционного баббитового слоя на стальной подложке, протекающих при различных температурах, возникает научная и практическая необходимость определения энергии связи атомов в кристаллических решетках железа, соответствующих этим температурам.

Анализ температурных режимов формирования антифрикционного баббитового слоя показал, что при всех методах, кроме метода ЭЭЛ, в стальной подложке сохраняется решетка α -Fe, типа ОЦК.

При использовании метода ЭЭЛ высокая скорость теплоотвода приводит к тому, что в пределах толщины поверхностного слоя порядка нескольких микрометров температура быстро падает до температур плавления и соответствующих фазовых превращений. В связи с этим кристаллизация, фазовые превращения, диффузия и химическое взаимодействие, сопровождающие процесс ЭЭЛ, приводят к образованию крайне

неравновесных структур с очень мелким зерном, высокой гетерогенностью по составу, структуре и свойствам [12].

Рентгенографические исследования показали, что практически во всех случаях в сформированном слое фиксируется высокотемпературная модификация железа γ -Fe и материала анода, если он претерпевает при нагреве полиморфные превращения. При этом количество γ -Fe увеличивается с ростом времени обработки независимо от используемого материала анода. После ЭЭЛ параметр решетки α -Fe уменьшается, причем это наблюдается при анодах из Fe, Cr, Mo, W, Ti, Ag и Pb, что, очевидно, связано с закалкой вакансий [9].

Таким образом, **целью работы** является повышение качества сцепления стальной подложки с антифрикционным баббитовым слоем путем определение энергии связи атомов в ОЦК и ГЦК решетках железа.

Изложение основного материала исследований. На примере железа подсчитаем энергию связи атомов в 1 м^3 в зависимости от типа кристаллической решетки: ОЦК и ГЦК.

На одну элементарную ячейку ОЦК решетки в целом приходится два атома: один атом в центре куба и один атом суммарно вносят атомы, располагающиеся в вершинах куба (каждый атом в вершине куба одновременно принадлежит восьми сопряженным элементарным ячейкам и на данную ячейку приходился лишь $1/8$ этого атома, а на всю ячейку $1/8 \times 8 = 1$ атом). На элементарную ячейку ГЦК решетки приходится четыре атома: из них один атом (так же, как и для ОЦК решетки) вносят атомы в вершинах куба, а три суммарно ($(1/2) \times 6 = 3$) вносят атомы, находящиеся на пересечении диагоналей граней, так как каждый из таких атомов принадлежит двум решеткам [13].

Для определения количества атомов в 1 м^3 каждой решетки необходимо найти количество элементарных ячеек этих решеток.

Согласно [13], в элементарной кубической решетке расстояние между центрами атомов, находящимися в вершинах куба обычно называют параметром a , который для ОЦК определяем по формуле:

$$a_{\text{ОЦК}} = \frac{4R}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где $R = 0.126\text{ нм}$ – радиус атома Fe [14].

$$a_{\text{ОЦК}} = \frac{4 \cdot 126 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{3}} = 2,909847 \cdot 10^{-10}\text{ м}.$$

Для элементарной ячейки ГЦК решетки параметр a определяем по формуле:

$$a_{\text{ГЦК}} = \frac{4R}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

$$a_{\text{ГЦК}} = \frac{4 \cdot 126 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{2}} = 3,563818 \cdot 10^{-10}\text{ м}.$$

Далее находим количество элементарных ячеек n в 1 м^3 :

$$n = \left(\frac{1}{a}\right)^3, \quad (3)$$

для ОЦК решетки:

$$n_{\text{ОЦК}} = (3,436606 \cdot 10^9)^3 = 4,058721 \cdot 10^{28},$$

для ГЦК решетки:

$$n_{\text{ГЦК}} = (2,805979 \cdot 10^9)^3 = 2,209292 \cdot 10^{28}.$$

Зная количество атомов в элементарной ячейке каждой решетки, находим количество атомов в 1 м^3 для каждой из них:

для ОЦК решетки:

$$n_{\text{атомов ОЦК}} = 2n, \quad (4)$$

$$n_{\text{атомов ОЦК}} = 2 \cdot 4,058721 \cdot 10^{28} = 8,117442 \cdot 10^{28} (\text{атомов}),$$

для ГЦК решетки:

$$n_{\text{атомов ГЦК}} = 4n, \quad (5)$$

$$n_{\text{атомов ГЦК}} = 4 \cdot 2,209292 \cdot 10^{28} = 8,837168 \cdot 10^{28} (\text{атомов}).$$

Подсчитаем разницу количества атомов $\Delta n_{\text{атомов Fe}}$ в м^3 в зависимости от типа кристаллической решетки:

$$\Delta n_{\text{атомов}} = n_{\text{атомов ГЦК}} - n_{\text{атомов ОЦК}}, \quad (6)$$

$$\Delta n_{\text{атомов}} = 8,837168 \cdot 10^{28} - 8,117442 \cdot 10^{28} = 0,719726 \cdot 10^{28} (\text{атомов}),$$

что в процентах составит 8,14 %.

Получается, что в гранецентрированной кубической решетке на 8,14% атомов больше чем в объемно центрированной кубической решетке.

Определим энергию связи атомов железа через теплоту сублимации для железа, которая составляет, согласно [15] 416 кДж/г·атом.

Энергия связи атомов определяется количеством энергии, которую необходимо затратить для разрыва их связи [16].

В одном моле Fe находится один моль атомов, равный числу Авогадро $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. Следовательно на один атом Fe затрачивается энергия $E_{\text{атома}}$:

$$E_{\text{атома}} = \frac{416 \cdot 10^3}{6,022 \cdot 10^{23}} = 69,08 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}.$$

Определяем энергию связи атомов в каждой из решеток:

$$E_{\text{связи}} = E_{\text{атома}} \cdot n_{\text{атомов}}, \quad (7)$$

для ОЦК решетки:

$$E_{\text{связи}} = 69,08 \cdot 10^{-20} \cdot 8,117442 \cdot 10^{28} = 560,7528 \cdot 10^8 \text{ Дж},$$

для ГЦК решетки:

$$E_{\text{связи}} = 69,08 \cdot 10^{-20} \cdot 8,837168 \cdot 10^{28} = 610,4715 \cdot 10^8 \text{ Дж.}$$

Таким образом, разница энергии связи атомов в ОЦК и ГЦК решетке ($\Delta E_{\text{связи}}$) составляет:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{связи}} &= E_{\text{связиГЦК}} - E_{\text{связиОЦК}}, \\ \Delta E_{\text{связи}} &= 49,7187 \cdot 10^8 \text{ Дж.} \end{aligned} \quad (8)$$

Выводы:

1. Наличие в ГЦК решетке большей энергии связи атомов чем в ОЦК решетке позволяет ожидать в ней и большей поверхностной энергии. Это подтверждается наличием диффузионной зоны при ЭЭЛ стали 20, например, оловом и медью. При нанесении олова лужением диффузионная зона не наблюдается.

2. При формировании баббитового слоя подшипника скольжения предпочтение следует отдавать методу ЭЭЛ, обеспечивающему по сравнению с другими методами более прочную связь наносимого слоя с подложкой.

Список литературы

1. *Тарельник В.Б.* Повышение качества подшипников скольжения [Текст] / *В.Б.Тарельник, В.С. Марцинковський, Б. Антошевский.* – Сумы : МакДен, 2006. – 160 с.
2. *Лузан С.О.* Предлагаемые общие принципы управления качеством газопламенных покрытий при восстановительном ремонте деталей [Текст] / *Лузан С.О.* – Механіка та машинобудування. – 2011, № 2. – С.211-219.
3. *Плешка Е.Д.* Сцепление железных покрытий со сталью и чугуном [Текст] / *Е.Д. Плешка* // Электронная обработка материалов. – 2008, № 2. – С. 17 – 24.
4. *Галиахметов И.Г.* Конструкционные материалы центробежных и винтовых компрессоров. Выбор и технология их применения [Текст] / *И.Г.Галиахметов.* – Казань: Изд-во «ФЭН», 2009. – 155 с.
5. *Сегаль А.В.* Технология производства центробежных и винтовых компрессоров и холодильных машин [Текст] / *А.В.Сегаль.* – Казань: Изд-во «ФЭН», 2009. – 212 с.
6. *Лебедева А.П.* Восстановление деталей машин [Текст] / *А.П. Лебедева, Т.Н. Погорелова.* – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
7. *Барыкин Н.П. Р.Ф. Фазлыахметов.* Изготовление подшипников скольжения с применением штамповки антифрикционного слоя в условиях кристаллизации и последующей пластической деформации [Текст] / *Н.П.Барыкин, Р.Ф.Фазлыахметов* // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2006. – №9. – С. 27 – 29.
8. *Тарельник В.Б.* Аналіз технологій нанесення антифрикційних покриттів підшипників ковзання [Текст] / *В.Б.Тарельник, О.В.Дзюба.* // Технічний сервіс машин для рослинництва: вісник ХНТУСГ. Вип. 134. – Харків: ХНТУСГ, 2013. – С. 244 – 251.

9. Электроискровое легирование металлических поверхностей [Текст] / А.Е. Гитлевич, В.В. Михайлов, Н.Я. Парканский, В.М. Ревутский. – Кишинев: Штиница, 1985. – 196 с.
10. Гуляев А.П. Металловедение [Текст] / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
11. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) [Текст]: учебник / Д.Г. Гаркунов – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МСХА, 2001. – 616 с.
12. Верхотуров А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей [Текст] / А.Д. Верхотуров, И.М. Муха. – К.: Техника, 1982. – 181 с.
13. Лахтин Ю.М. Материаловедение [Текст]: учебник для машиностроительных вузов – 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
14. Рейтер Л.Г. Теоретичні розділи загальної хімії [Текст]: навч. посібник / Л.Г. Рейтер, О.М. Степаненко, В.П. Басов. – К.: Каравела, 2003. – 344. с.
15. Лившиц Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений [Текст] / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
16. Хомченко Г.П. Химия для поступающих в вузы [Текст]: учеб. пособие. – М.: Висш. шк., 1985. – 367 с.

Анотація

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ФОРМУВАННЯ АНТИФРІКЦІЙНИХ БАБІТОВИХ ПОКРИТТІВ НА ПОВЕРХНЕВУ ЕНЕРГІЮ СТАЛЬНОЇ ОСНОВИ

Тарельник В.Б., Дзюба О.В., Бакай Г.А.

Представлені результати аналізу впливу температури формування антифрикційних бабітових покриттів на поверхневу енергію сталюї основи. Встановлено наявність більшої енергії зв'язку атомів в гранецентрованої кристалічній решітці в порівнянні з об'ємно центрованою кристалічною решіткою. Запропоновано використовувати для формування антифрикційного бабітового шару метод електроерозійного легування.

Abstract

INFLUENCE OF TEMPERATURE OF FORMING ANTIFRICTIONAL BABBITT COATINGS SURFACE ENERGY OF THE STEEL SUBSTRATE

V. Tarelnik, A. Dziuba, G. Bakaj

The results of the analysis of the influence of the temperature of formation of anti-friction coatings on Babbitt surface energy of the steel substrate. The presence of higher binding energy of atoms in the fcc lattice compared to a body-centered lattice. Proposed to use for the formation of anti-friction babbitt layer doping method EDM.