УДК 669.14

ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ АНТИФРИКЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ БАББИТА ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ РОТОРОВ ТУРБИНЫ

© Юрий Константинович Леванов, Ольга Борисовна Бердник,
Ирина Николаевна Царева, Людмила Александровна Кривина

*Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН), Нижний Новгород, Россия*
npktribonika.vi@yandex.ru

Аннотация. Нанесение антифрикционного покрытия на основе баббита на рабочую поверхность подшипников является актуальным как при их изготовлении, так и при восстановительном ремонте. Показано, что газодинамический метод нанесения покрытия из порошковой смеси является предпочтительным при продлении ресурса и восстановлении работоспособности подшипников за счет низкой пористости, высокой адгезионной прочности и пониженного коэффициента трения формируемых покрытий.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, газодинамический метод нанесения, баббит, подшипник, ротор, турбина.

GAS-DYNAMICS ANTI-FRICTION COATING OF BABBIT FOR SLIDING BEARING OF TURBINE ROTORS

© Yu.K. Levanov, O.B. Berdnik, I.N. Tsareva, L.A. Krivina

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Nizhny Novgorod, Russia
npktribonika.vi@yandex.ru

Abstract. The application of an antifriction coating based on babbitt on the working surface of bearings is relevant both in their manufacture and in restoration. The gas-dynamics method of coating from a powder mixture is preferred when extending the life and restoring the bearings due to low porosity, high adhesive strength and reduced friction coefficient of the formed coatings.

Keywords: anti-friction coating, gas-dynamic method of application, babbitt, bearing, rotor, turbine.

Введение. Упорный подшипник при работе паровой турбины воспринимает осевое усилие, испытываемое ротором во время ее работы, а также фиксирует осевое положение вращающегося ротора по отношению к неподвижным деталям. В современных турбинах применяют исключительно сегментные упорные гидродинамические подшипники скольжения. Упорные сегменты являются основными деталями упорного подшипника, определяющими надежность и ресурс его работы. Размеры упорных сегментов определяются

средним допустимым давлением (при нагрузках на сегмент 1,5-2 МПа). Несущая способность упорного подшипника зависит не только от удельного давления, но и от формы сегментов, способа их опирания, их общего числа и других факторов. При производстве или ремонте поверхность сегмента покрывают слоем баббита (толщиной ~ 1,5 мм) методами заливки или напыления покрытия. При уменьшении толщины рабочего слоя до 0,8-0,9 мм на сегменты наносят новый слой баббита. В опорных вкладышах баббит выполняет роль антифрикционного материала, необходимого при работе в режиме полусухого трения. Срок службы подшипников, во многом определяется толщиной баббитового слоя на стальном вкладыше. В данной работе в качестве метода нанесения антифрикционного покрытия баббита предложен метод газодинамического высокоскоростного напыления [1] из порошковой смеси.

Объекты исследования и методика эксперимента. Объектами исследования являлись образцы из стали 20Х13 с нанесенным на них газодинамическим методом (на установке «ДИМЕТ-403») покрытием баббита из порошковой смеси марки Б-83-100-40 (Б-83) с элементным составом по ГОСТ 1320-74: олово (Sn) – 83 %, сурьма (Sb) – 11 %, медь (Cu) – 6 %.

Баббит является сплавом на основе олова с температурой плавления 300 – 440 °С. Характерной особенностью баббитовых сплавов является то, что они представляют собой пластичную массу с равномерно вкрапленными твердыми частицами, которые служат опорными точками для шеек валов и при неравномерной нагрузке вдавливаются вглубь мягкой основы. Давление вала на вкладыш в этом случае равномерно распределяется по всей поверхности скольжения, что позволяет подшипнику выдерживать большую нагрузку. Твердость основы баббитов всегда меньше твердости материала шейки вала, поэтому поверхность баббитового подшипника подвергается более интенсивному износу. Износ баббитового покрытия вызывает при работе увеличение радиального зазора в подшипниках и появление при работе двигателя глухих металлических стуков. Чтобы устранить этот дефект, производят нанесение баббита или замену вкладышей.

Нанесение баббита на подшипники (рисунок 1) не является простым делом. Строгое соблюдение всех технологических требований дает возможность получить подшипники более высокого качества. Такое качественное нанесение можно получить на установке газодинамического напыления.

Перед нанесением покрытия проводится предварительная подготовка поверхности образцов, заключающаяся в обработке до однородной шероховатости абразивным материалом (корундом марки К-00-04-16) с помощью сопла СК20. На подготовленные цилиндрические образцы напыляется многослойное покрытие. Скорость подачи порошковых материалов в процессе напыления составляет 0,5–0,6 г/с. Сначала в качестве подслоя наносится медное покрытие (толщиной до 50 мкм) из порошковой смеси марки С-01-01 (при дистанции от среза сопла до поверхности 10 - 20 мм). Затем на его поверхность наносится тонкое (толщиной 20-40 мкм) покрытие из порошковой смеси олова Т2-00-05. Толщина самого рабочего покрытия баббита составляет 1 мм (рисунок 4). После нанесения покрытия образец проходит механическую доводку для сглаживания шероховатости поверхности.

Металлографические исследования микроструктуры покрытия баббита выполняли на поперечном шлифе на оптическом микроскопе «Axio Observer» и электронном микроскопе «VEGA TESCAN II».

Рис. 1. Внешний вид опорно-упорного подшипника с покрытием баббита

Измерения микротвердости проводили на рабочей поверхности и поперечном сечении на микротвердометре ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 при нагрузке на индентор 0,5 Н. Адгезионную прочность покрытия оценивали методом индентирования (при нагрузке 2 Н) границы раздела с основой.

Исследование фрикционных свойств покрытия и основного материала проводили на лабораторной установке трения при сухом скольжении шарового индентора из закаленной стали ШХ15 (с нормальной нагрузкой 1 Н).

Результаты исследования. Порошок баббита марки Б-83 предназначен для нанесения антифрикционных покрытий на детали, в частности, тяжелонагруженные подшипники скольжения. По гранулярному составу порошок имеет большой разброс размера частиц от 5 до 50 мкм (рисунок 2 а). Встречаются отдельные мелкие частицы диаметром ~1 мкм и крупные конгломераты размером до 80 - 100 мкм. Частицы порошковой смеси имеют, преимущественно, вытянутую глобулярную форму, что обусловлено технологическими особенностями его изготовления (рисунок 2 б) [2]. Данная смесь изготовлена по современной технологии порошковой металлургии. Сначала осуществляют совместно или отдельно помол составляющих компонентов до порошка с последующим перемешиванием в необходимом соотношении (по масс.% сплава баббита марки Б-83). Затем проводят плавление полученной смеси в тигле с периодическим перемешиванием, получая сплав с температурой кристаллизации 70 °С и температурой плавления выше 300 °С.

Рис. 2. Гранулярный состав порошковой смеси баббита марки Б-83

По данным рентгеноструктурного анализа (рисунок 3) порошковая смесь имеет фазовый состав: $\text{Sn} + \beta\text{-SbSn} + \text{Cu}$ (~6 %). Основной является фаза Sn с тетрагональным типом кристаллической решетки. Интерметаллидная фаза $\beta\text{-SbSn}$ образуется при термической обработке в процессе изготовления порошковой смеси и соответствует области диаграммы фазовых состояний [3] для 11 %-ого (по массе) содержания сурьмы (рисунок 4).

Рис. 3. Дифрактограммы порошковой смеси баббита и покрытия, полученного из данной порошковой смеси

Рис. 4. Диаграмма фазовых состояний системы «олово-сурьма»

При нанесении из данной порошковой смеси формируется покрытие баббита с таким же фазовым составом (рис.3). Следует отметить, что при динамическом напылении температура частиц в высокоскоростном потоке не превышает 200°C , что объясняет сохранение фазового состава напыляемого материала. Зарегистрировано изменение интенсивности некоторых рефлексов олова, что может быть связано с пластифицированием частиц при осаждении на подложку и, как следствие, изменением формы зерен в покрытии.

Внешний вид модельного образца с нанесенным покрытием баббита и структура его поперечного сечения представлены на рисунках 5 - 7.

а

б

Рис.5. Внешний вид образца с покрытием баббита (а) и поперечный шлиф (б), $\times 200$

Анализ поперечного сечения покрытия показал наличие в нем трех слоев (рис.6). Микроструктура покрытия баббита состоит из твердого раствора (темная основа на рис.6-б), крупных кубических частиц (SbSn) и мелких кристаллов (Cu_6Sn_5 ; Cu_3Sn).

Анализ поперечного сечения образца показал, что покрытие баббита имеет низкую пористость. Наличие открытой и поверхностной пористости в покрытии не выявлено. Среднее значение общей пористости $\Pi \sim 3\%$, в зонах с максимальным скоплением пор – $\Pi \sim 5\%$. Диаметр крупных пор составляет $\sim 27,5$ мкм, мелких – 7 мкм (рис.7).

По результатам измерений микротвердости: твердость покрытия баббита составляет $H_{50}=32$ кг/мм², медного подслоя – $H_{20}=138$ кг/мм², стальной детали $H_{50}=300$ кг/мм². Применение технологического приема в виде нанесения медного подслоя обеспечивает плавный переход твердости от подложки к покрытию, что положительно влияет на распределение напряжений в слоях.

Испытания адгезионной прочности покрытия методом микроиндентирования (при нагрузке 2Н) границ раздела «покрытие – подслоя» и «подслоя – подложка» показали высокую прочность сцепления, также не было обнаружено растрескивания, сколов и отслоений.

Рис. 6. Структура покрытия баббита: 1,2 – подслои, 3 – рабочий слой

Рис. 7. Зоны покрытия баббита с различной пористостью:
а – максимальное скопление пор; б – среднее скопление пор, x200

Фрикционные испытания показали, что коэффициент трения основного материала составляет $f=0,152$; а коэффициент трения баббитового покрытия $f=0,098$. Таким образом, нанесение покрытия баббита на стальную поверхность приводит к снижению коэффициента трения в $\sim 1,5$ раза.

Согласно молекулярно-деформационной модели трения [4] коэффициент трения – сумма молекулярной и деформационной составляющих:

$$f = f_m + f_d. \quad (1)$$

Он складывается из сопротивления, обусловленного деформированием тонкого поверхностного слоя внедрившимися микронеровностями и сопротивления, возникающего вследствие межмолекулярных взаимодействий в достаточно сближенных участках твердых тел. При проведении оценочных расчетов для случая скольжения единичного шарового индентора по плоскости (условиях ненасыщенного пластического контакта) можно воспользоваться формулой [4]:

$$f = \frac{\tau_c}{HB} + \frac{0,31}{R} \sqrt{\frac{N}{HB}} \quad (2)$$

где τ_c – среднее напряжение на срез поверхностного слоя, HB – твердость материала, N – нагрузка на индентор, R – радиус шарового индентора.

Рассчитав в соответствии с (2) деформационную составляющую коэффициента трения f_d и используя экспериментальное значение коэффициента трения f , можно определить молекулярную составляющую f_m , а из нее – среднее напряжение на срез поверхностного слоя.

Проведя расчеты, получаем, что для стальной поверхности напряжение на срез $\tau_c = 45,2$ кг/мм², а для поверхности баббита - $\tau_c = 3,1$ кг/мм². Таким образом, нанесение баббита на стальную деталь способствует облегчению сдвига поверхностного слоя при фрикционном пропахивании, а баббитовое покрытие выполняет роль антифрикционного покрытия.

Выводы. Напыление покрытия газодинамическим методом полностью исключает вероятность возникновения каверн или твердых включений, равномерно распределяя баббит по поверхности подшипника - это позволяет повысить качество баббитового слоя.

Высокая адгезионная прочность, достаточно низкая пористость, пониженный в 1,5 раза коэффициент трения (по сравнению со сталью), облегчение сдвига поверхностного слоя баббитового покрытия при соприкосновении с шейкой вала в процессе работы позволяет повысить надежность работы подшипника и снизить риск аварийного отказа.

Метод газодинамического напыления позволяет получать более качественные покрытия баббита, является экономически выгодным и менее трудоемким по сравнению с известным методом заливки.

Список литературы

1. Архипов В.Е., А.Ф. Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. - М.: Изд-во «Красанд», 2017. - 235 с.
2. <https://findpatent.ru/patent/234/2343216.html>
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем, Под ред. Лякишева Н.П.. - М.: Машиностроение, 2000.
4. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. Справочник. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.

Дата поступления: 13 мая 2020 г.