

УДК 549.43: 621.822

DOI: 10.12737/23166

А.В. Яковлев, М.В. Зернин

## ВЛИЯНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БАББИТА НА НАПРЯЖЕНИЯ В АНТИФРИКЦИОННОМ СЛОЕ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Показано существенное влияние скорости деформации баббитовых образцов на их прочностные характеристики. Предложена схема испытаний на контактную ползучесть сталеваббитовых кольцевых образцов-подшипников. Показано, что прочность связи баббитового слоя со стальной основой существенно влияет на контактную ползучесть.

Продемонстрировано, что наличие циклического деформирования антифрикционного слоя приводит к полной релаксации суммы всех постоянных составляющих остаточных напряжений.

**Ключевые слова:** подшипник, баббит, образец, ползучесть, прочность, испытания.

A.V. Yakovlev, M.V. Zernin

## INFLUENCE OF BABBIT RHEOLOGICAL PROPERTY UPON STRESSES IN ANTIFRICTION LAYER OF SLIDER BEARING

The procedure for tests of contact creep in ring bearing-samples is developed and also a generalized diagram of residual stresses formation after babbiting and machining a babbit layer in bearings is obtained. It is shown that the existence of a cyclic deformation of an antifriction layer results in a complete relaxation of the sum of all constant constituents of residual stresses.

It is concluded that the main reason of the dissipation of strength characteristics in babbit samples consists in rheological properties of this material.

**Key words:** bearing, babbit, sample, creep, strength, tests.

Баббиты на основе олова проявляют отличные антифрикционные свойства, но имеют невысокие характеристики усталостной долговечности. Вот почему многие отечественные и зарубежные ученые исследуют механические свойства баббитов и их напряженно-деформированное состояние (НДС) в составе антифрикционного слоя подшипников. При проектировании подшипников с баббитовым слоем иногда используются неверные (по нашему мнению) представления о его свойствах, основанные на оценке влияния отдельных факторов, приведенных в некоторых публикациях. Такие ошибки возникают в значительной мере из-за отсутствия целостной картины влияния всего комплекса факторов, хотя бы на приближенном (качественном) уровне. Наверное, первый вариант такого систематического описания свойств баббитов содержится в нашей монографии [1]. В настоящей статье более подробно описывается влияние реологических свойств баббитов, проявляющихся уже при комнатных температурах, на НДС антифрикционного слоя подшипников.

В нашей стране наиболее распространен баббит марки Б83. Этот баббит содержит кроме Sn 10...12% Sb и 5,5...6,5% Cu и представляет собой твердый раствор Sb и Cu в олове ( $\alpha$ -фаза), в котором находятся интерметаллиды  $Cu_3Sn$  и  $Cu_6Sn_5$  в виде дендритных образований ( $\gamma$ -фаза) и кубовидные кристаллы интерметаллидов  $SbSn$  ( $\beta$ -фаза). Ниже приводятся также некоторые результаты исследований [2] баббита Tegotenax-S, который производит фирма «Goldschmidt-AG». Этот баббит содержит кроме Sn: 7,5...8% Sb; 3,5...4% Cu; 1% Cd. Структура его отличается от структуры баббита Б83 количеством  $\beta$ - и  $\gamma$ -фазы, потому что в олове растворяется до 7% сурьмы и небольшое количество меди, образуя  $\alpha$ -твердый раствор, а избыток этих металлов вступает в соединение с оловом, образуя более твердые и хрупкие интерметаллиды. Другие характерные материалы этого класса (типа баббита Б88) содержат сурьмы менее 7%, интерметаллиды  $SbSn$  не образуются, структура двухфазная.

В большом числе публикаций содержатся характеристики статической прочности баббитов, полученные в условиях одноосного нагружения образцов при комнатной температуре. Для баббита Б83 приведены значения: предел текучести при растяжении  $\sigma_{\text{Тр}} = 55,5 \dots 65,7$  МПа, при сжатии –  $\sigma_{\text{Тс}} = 71,8 \dots 94,2$  МПа; предел прочности при  $\sigma_{\text{Вр}} = 63,8 \dots 88,3$  МПа, при сжатии –  $\sigma_{\text{Вс}} = 101 \dots 126,5$  МПа; модуль упругости  $E = 47100 \dots 63700$  МПа. Приведенные в разных работах значения характеристик существенно различаются. По нашему мнению, основной причиной рассеивания свойств баббита является различие скорости деформации и проявление реологиче-

ских эффектов в образцах при испытаниях. Полученные нами значения предела прочности баббита Б83 при растяжении образцов диаметром 12 мм и длиной 60 мм в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$  (рис. 1а) подтверждают влияние этого фактора. В работе [2] приведены результаты испытаний образцов из баббита Tegotenax-S в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon} = 2,5 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . На рис. 1б видно существенное влияние скорости деформации  $\dot{\epsilon}$  на условный предел  $\sigma_{0,2}$  при комнатных и повышенных температурах.

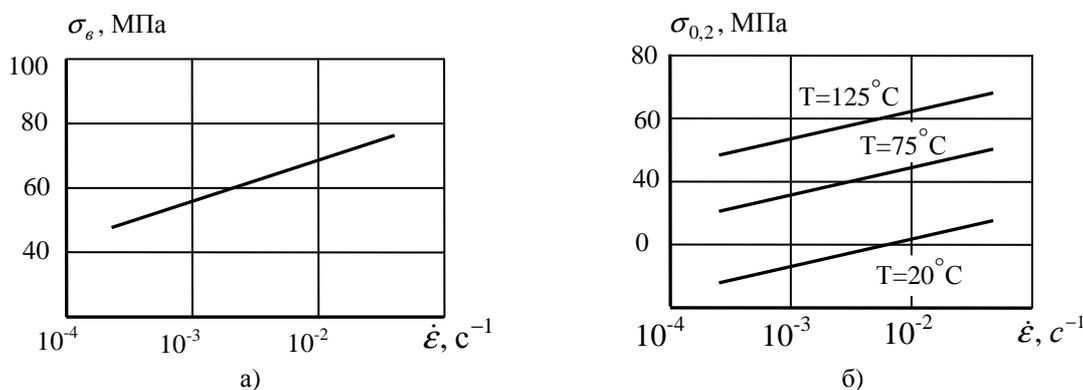


Рис. 1. Прочностные свойства баббитов: а – влияние скорости деформации на предел прочности баббита Б83; б – влияние скорости деформации на условный предел текучести баббита Tegotenax-S при разных температурах

Этот факт объясняет существенные погрешности определения предела пропорциональности предела текучести и модуля упругости по диаграмме статического разрушения. В частности, наиболее достоверные значения модуля упругости баббита Б83 при температурах от 20 до 150°С получены радиотехническим методом и приводятся в монографии [5]. Для баббита Б83 при комнатной температуре модуль упругости  $E = 60530$  МПа, модуль сдвига  $G = 22590$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,34$  (при повышенных температурах:  $T = 50^\circ\text{C} - E = 59940$  МПа;  $T = 100^\circ\text{C} - E = 56760$  МПа;  $T = 150^\circ\text{C} - E = 54960$  МПа). При расчетах НДС антифрикционного слоя следует принимать именно эти значения упругих констант баббита, а влияние ползучести оценивать дополнительно.

Испытания баббита Б83 на релаксацию нами были проведены на релаксационной машине REL-V15t при температуре  $T = 22^\circ\text{C}$ . Испытаны образцы диаметром 13 мм и длиной 100 мм. Результаты испытаний представлены на рис. 2.

Из серии кривых релаксации напряжений в образцах (линии 1-5 на рис. 2) получена серия кривых ползучести (линии 6-12). В качестве основной формы закономерности для аппроксимации кривых ползучести выбрана теория старения:

$$\epsilon^c(t) = \Omega(t) \sigma^n. \tag{1}$$

где  $\epsilon^c(t)$  – деформации;  $\sigma$  – напряжения;  $\Omega(t), n$  – параметры зависимости.

С учетом упругих деформаций физические закономерности имеют вид

$$\epsilon = \sigma / E + \Omega(t) \sigma^n.$$

Параметры закономерности (1) определены в диапазоне напряжений  $\sigma = 26...36$  МПа. Показатель степени  $n = 1$  во временном диапазоне  $t = 0...30$  мин и  $n = 2$  во временном диапазоне  $t = 30...140$  мин. Функция нестационарности  $\Omega(t)$  получена в виде таблицы значений для разных моментов времени.

Нами выполнялись также испытания на ползучесть при чистом изгибе баббитовых балок с прямоугольным поперечным сечением. Но полученные экспериментальные данные о прогибах балки вследствие ползучести сложно использовать для построения модели ползучести баббита, если неизвестны характеристики ползучести при однородных полях растягивающих и сжимающих напряжений. Как показано в работе [2], результаты испытаний на ползучесть образцов из баббита Tegotenax-S выявили, что при одинаковых уровнях напряжений ползучесть при растяжении протекает значительно быстрее, чем при сжатии. Этот факт подтверждает, что баббит относится к категории квазихрупких материалов и для него следует применять соответствующие критерии эквивалентности

НДС при сложном напряженном состоянии. В частности, для баббита Б83 получены [3] такие критерии для случая его пластического деформирования. Принятые практикой критерии эквивалентности НДС при пластичности можно применять и для случая ползучести материала.

Более сложное НДС, возникающее в антифрикционном слое подшипника скольжения, потребовало [4] разработки специальных методик испытаний на контактную ползучесть. Так, на рис. 3 изображена схема установки для испытаний на контактную ползучесть баббитового слоя двухслойных колец (кольцевых подшипников-образцов). Нагружение создавалось в пределах от 1 до 10 кН. Нагрев осуществлялся электрическим нагревателем с автоматическим регулированием температуры в пределах от 20 до 100° С. Перемещения вала относительно подшипника при больших нагрузках измерялись с помощью микронного индикатора или микрокатера. Перемещения от ползучести поверхности слоя определялись по профилограммам с применением метода искусственных баз.

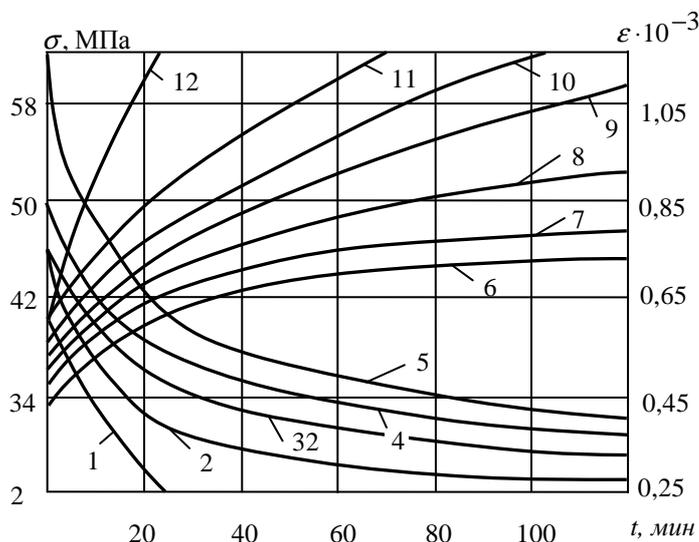


Рис. 2. Кривые релаксации напряжений (1-5) и ползучести (6-12) баббита Б83:

1 – $\varepsilon = 0,65 \cdot 10^{-3}$ ;	2 – $\varepsilon = 0,75 \cdot 10^{-3}$ ;	3 – $\varepsilon = 0,83 \cdot 10^{-3}$ ;
4 – $\varepsilon = 0,95 \cdot 10^{-3}$ ;	5 – $\varepsilon = 1,118 \cdot 10^{-3}$ ;	6 – $\sigma = 26$ МПа ;
7 – $\sigma = 28$ МПа ;	8 – $\sigma = 30$ МПа ;	9 – $\sigma = 32$ МПа ;
10 – $\sigma = 34$ МПа ;	11 – $\sigma = 36$ МПа ;	12 – $\sigma = 41$ МПа

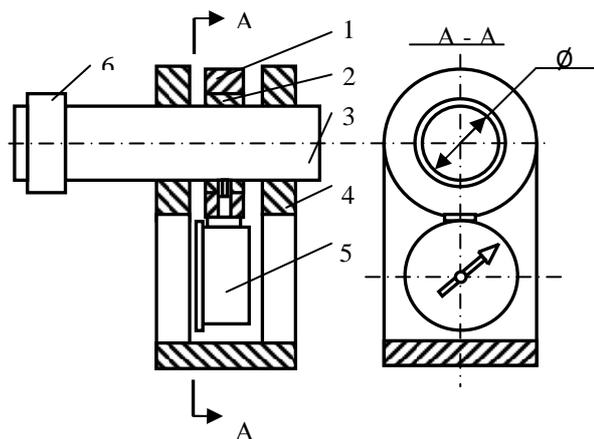


Рис. 3. Схема установки для испытаний биметаллических кольцевых подшипников-образцов на контактную ползучесть

Подшипник-образец с номинальным диаметром 50 мм и шириной 25 мм устанавливался на вал с радиальным зазором  $\Delta = 34$  мкм. На рис. 4а приведен график функции нестационарности слоя из баббита Б83 при температуре 70° С.

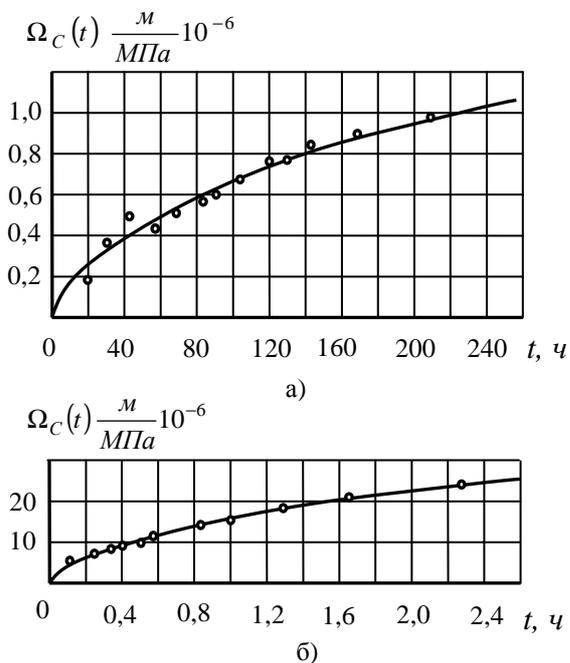


Рис. 4. Функция нестационарности при ползучести слоя из баббита при контактом нагружении при температуре 70°С: а – баббит Б83; б – баббит БКА

Таким же образом выполнялись испытания на контактную ползучесть кольцевых подшипников-образцов со слоем

баббита БКА (рис. 4б). Эффект ползучести для этого баббитового слоя на порядок более значим, чем для баббита Б83. Объяснить этот факт можно тем, что баббит БКА не прилуживается к стальной основе и антифрикционный слой имеет возможность более интенсивно деформироваться как в направлении оси подшипника, так и в радиальном направлении. Баббиты на основе олова прочно держатся на стальной основе, поэтому деформации ползучести для них менее значимы. Тем не менее весьма значим другой аспект реологических процессов в баббитовом слое: релаксация напряжений существенно влияет на общую картину распределения напряжений.

В баббитовом слое подшипника могут быть остаточные напряжения после заливки баббита вследствие существенного различия коэффициентов линейного расширения стали и баббита. Эксплуатация подшипников характеризуется нагревом (при пуске) и остыванием (при останове), внешние нагрузки создают достаточно сложное распределение НДС, имеющее статические и циклически изменяемые составляющие. Среди возможных причин усталостного разрушения баббитового слоя подшипников скольжения называют высокие остаточные напряжения после заливки, а также влияние асимметрии цикла напряжений от внешних силовых

факторов. Поэтому нами выполнено несколько серий экспериментов для оценки значимости этих факторов.

Остаточные напряжения в баббитовом слое определялись методом полного снятия напряжений. В качестве подшипников-образцов использовались полукольца шириной 25 мм с внешним диаметром

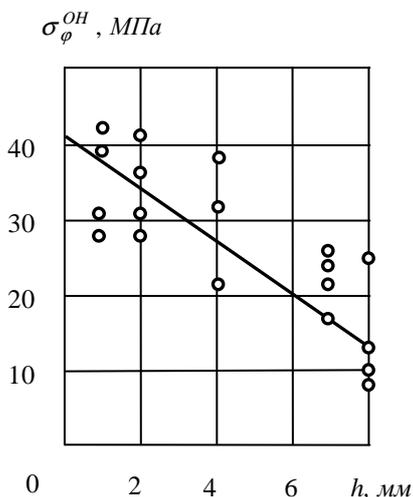


Рис. 5. Зависимость остаточных начальных тангенциальных напряжений от толщины слоя

108 мм, внутренним – 50 мм с толщиной баббитового слоя от 0,5 до 8 мм. На внутреннюю поверхность в тангенциальном и осевом направлениях наклеивались фольговые тензодатчики ФК-РА-1-2 с базой 1 мм. Затем участок слоя в зоне датчика вырезался и отделялся от остальной части. Деформация  $\epsilon$ , возникшая после отделения, определялась на основе изменения сопротивления тензодатчика  $\Delta R$  по формуле  $\epsilon = \Delta R / (kR)$ , где  $k = 2,05$  – коэффициент тензочувствительности датчика.

тальные напряжения определялись по формулам закона Гука.

Начальные остаточные напряжения  $\sigma_{\phi}^{OH}$  в баббитовом слое образцов определены через месяц после заливки. Результаты определения остаточных напряжений  $\sigma_{\phi}^{OH}$  для подшипников с разной толщиной баббитового слоя представлены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что начальные остаточные напряжения в баббитовом слое достаточно велики.

Процесс релаксации напряжений более интенсивно происходит при циклическом характере напряжений от внешних воздействий на подшипник. Экспериментально исследовано изменение остаточных напряжений в баббитовом слое при испытании полукольцевых подшипников-образцов на установке, подробно описанной в наших статьях [6; 7]. Полукольцо прижималось циклической нагрузкой к вращающемуся валу, погруженному в масляную ванну.

Образцы снимались с испытаний после достижения некоторого числа циклов нагружения, и в их баббитовом слое измерялись остаточные напряжения по описанной выше методике полного снятия напряжений. На рис. 6 приведены распределения остаточных напряжений по углу контакта образцов с двумя различными толщинами баббитового слоя и при двух значениях числа циклов нагружения. Видно, что при увеличении количества циклов нагружения образца тангенциальные напряжения в слое существенно уменьшаются.

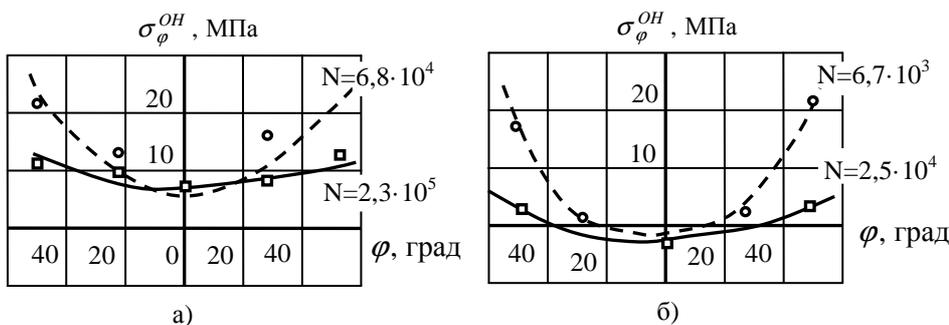


Рис. 6. Распределение остаточных тангенциальных напряжений в баббитовом слое толщиной  $h$  подшипника-образца после испытаний на усталость в течение  $N$  циклов: а –  $h = 1$  мм; б –  $h = 4$  мм

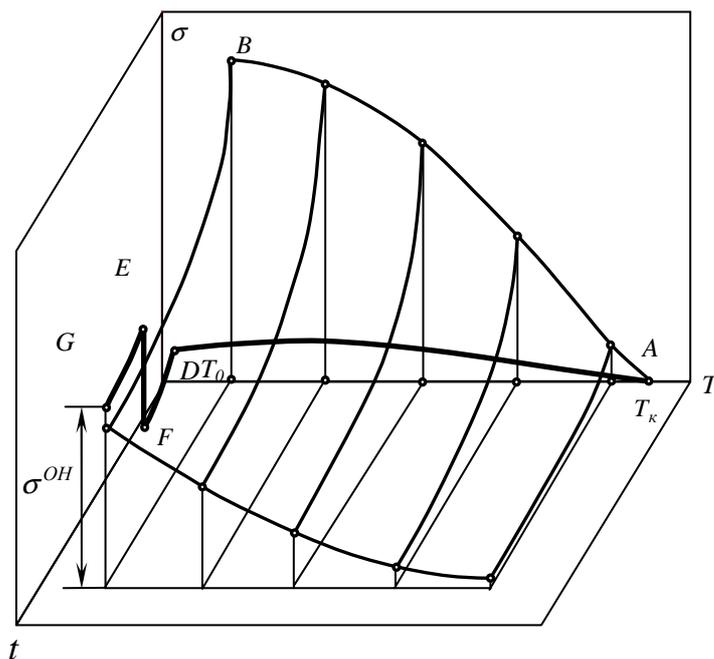


Рис. 7. Обобщенная диаграмма формирования остаточных напряжений после заливки и механической обработки баббитового слоя

Полученные результаты позволяют качественно и количественно описать процесс формирования и изменения остаточных и полных напряжений в период эксплуатации баббитового слоя подшипника. Процесс формирования начальных остаточных напряжений иллюстрируется пространственной диаграммой (рис. 7) в координатах  $\sigma$ ,  $T$ ,  $t$ . В соответствии с этой диаграммой процесс формирования остаточных напряжений идет следующим образом. В момент затвердевания баббита при температуре кристаллизации начальные напряжения равны нулю (точка А). При отсутствии релаксации по мере охлаждения остаточные начальные напряжения изменялись бы по кривой АВ. В действительности вследствие релаксации изменение остаточных напряжений идет по линии AD и зависит от времени выдержки образца при разных температурах. После охлаждения до комнатной температуры  $T_0$  происходит релаксация напряжений в слое по линии DF. При выполнении механической обработки (уменьшении толщины слоя) происходит резкое увеличение остаточных напряжений (линия FE). Рост на-

пряжений может быть значительным при большом припуске на механическую обработку, после которой напряжения продолжают релаксировать (линия EG). В итоге подшипники начинают эксплуатировать с некоторым (может быть высоким) уровнем начальных остаточных напряжений  $\sigma^{OH}$ .

Рассмотрим, как при последующей эксплуатации подшипника-образца изменятся тангенциальные напряжения в баббитовом слое. На подшипник обычно действует внешняя нагрузка, имеющая статическую и динамическую составляющие. Постоянная составляющая (среднее напряжение цикла) полных тангенциальных напряжений в период эксплуатации подшипникового слоя складывается из остаточных ( $\sigma_\varphi^{OH}$ ), температурных ( $\sigma_\varphi^T$ ) и силовых ( $\sigma_\varphi^Q$ ) напряжений. Кроме того, при сборке подшипникового узла машин возможно формирование поля монтажных напряжений.

В процессе эксплуатации (в частности при пусках и остановках машин) температура баббитового слоя существенно меняется. Это приводит к появлению температурных напряжений с последующей их

релаксацией. Рассмотрим один конкретный пример, иллюстрирующий сказанное (рис. 8). Допустим, что в момент времени  $t_0$  на испытания поступил новый образец, в антифрикционном слое которого имеются начальные остаточные напряжения  $\sigma_{\varphi}^{OH}$ . После установки и прогрева подшипника на стенде до температуры  $55^{\circ}\text{C}$  остаточные напряжения начинают уменьшаться (линия АВ) вследствие появления температурных напряжений  $\sigma_{\varphi}^T$ . После приложения внешней циклической нагрузки к образцу (точка В, момент  $t_1$ ) напряжения будут релаксировать достаточно быстро. Поэтому первоначально асимметричный цикл изменения этих напряжений в момент времени  $t_2$  станет симметрич-

ным (средние напряжения становятся равными нулю). Допустим, что в какой-то момент времени испытания прекращены и происходит охлаждение образца. Это приведет к появлению растягивающихся напряжений, максимальная величина которых будет достигнута в точке  $t_4$  (линия CD). Если в это время подогрев масла на стенде начать вновь, то по мере разогрева произойдет уменьшение тангенциальных напряжений (линия DE). В зависимости от длительности паузы цикл изменения тангенциальных напряжений или сразу будет близок к симметричному (как это показано на рис. 8), или быстро станет таким вследствие релаксации средних компонент напряжений.

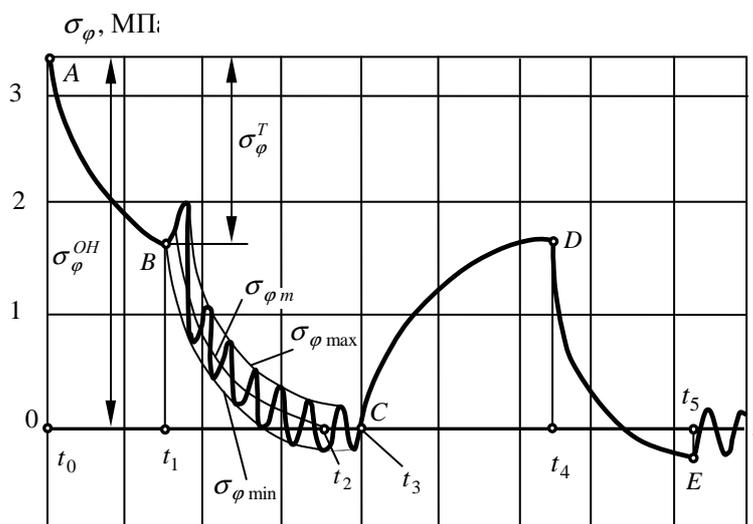


Рис. 8. Изменение тангенциальных напряжений в баббитовом слое при эксплуатации подшипника

Аналогичным образом происходит формирование и изменение тангенциальных напряжений и в антифрикционном слое подшипников машин. В этом случае могут еще появляться монтажные тангенциальные напряжения (от установки вкладышей с натягом). Но, как и все постоянные компоненты напряжений, монтажные тоже быстро релаксируют. Расчетные формулы для различных составляющих тангенциальных напряжений приведены в наших статьях [7; 8; 9].

Из вышесказанного следует, что во время эксплуатации подшипника скольже-

ния в баббитовом слое происходят процессы, обусловленные реологическими свойствами материала слоя. Эти процессы приводят к тому, что средние составляющие всех напряжений релаксируют практически до нуля. То есть для тангенциальных напряжений важно определить амплитуду их динамической составляющей, и только ее можно учитывать при оценке долговечности подшипникового слоя. Радиальные напряжения существенно выше тангенциальных и не релаксируют, так как именно эта составляющая НДС уравнивает

действующую на подшипник внешнюю нагрузку.

В нашей статье [10] показано, что аналогичные процессы релаксации напряжений сказываются и при других схемах испытания баббитового слоя в составе сталлебаббитовой композиции. Нами разработана методика испытаний двухслойных цилиндрических образцов, нагружаемых по схеме чистого изгиба с вращением, на стенде МУИ-6000. Эта и другие применяемые нами методики испытаний биметаллических образцов при простых видах напряженного состояния кратко описаны в монографии [1]. Нами специально выбрана схема испытаний при одноосном напряженном состоянии с целью исключения возможного влияния специфики контактного нагружения баббита в подшипнике-образце, результаты исследований которого описаны выше.

### Выводы

1. Основной причиной рассеивания прочностных характеристик образцов из баббита является проявление его реологических свойств. Влияние скорости деформации баббитовых образцов необходимо учитывать при анализе результатов статических испытаний.

2. На скорость ползучести баббита существенное влияние оказывает вид НДС. С учетом сложного НДС антифрикционного слоя предложена схема испытаний на контактную ползучесть сталлебаббитовых кольцевых образцов.

3. Если прочность связи баббитового слоя и стальной основы невелика (как в случае неприлуживающегося баббита БКА), его контактная ползучесть существенна. Если баббит прочно связан со стальной основой, то для большинства реальных условий нагружения деформации контактной ползучести несущественны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. - 2-е изд. - М.: Либроком, 2010. - 544 с.
2. Lohr, R. Das Verformungsverhalten der Gleitlagerung SnSb8Cu4Cd unter Zug- und Druck Bean-

Для реализации асимметричных циклов нагружения образцов при отрицательных средних значениях напряжений на стенде МУИ-6000 разработано специальное приспособление [10], с помощью которого образец дополнительно нагружался осевой сжимающей силой. Результаты испытаний показали, что долговечности образцов практически одинаковы при симметричном и асимметричном циклах сжимающих напряжений. В условиях реализации многоциклового усталости можно признать факт релаксации всех постоянных компонент тензора напряжений при циклическом нагружении баббитового слоя образца на стенде МУИ-6000. Таким образом, для случая нагружения баббита при комнатных температурах и одноосном напряженном состоянии подтверждены основные положения описанных выше исследований подшипников-образцов.

4. Чем меньше толщина антифрикционного слоя, тем большие остаточные напряжения в нем возникают. Заливочные остаточные напряжения релаксируют особенно быстро при охлаждении и в первые часы после охлаждения, но потом состояние стабилизируется, и в последующее время остаточные напряжения остаются значительными.

5. Циклическое деформирование антифрикционного слоя приводит к полной релаксации суммы всех постоянных составляющих остаточных напряжений (заливочных, температурных, монтажных, средних значений силовых напряжений). Чем больше уровень циклических воздействий, выше температура и больше толщина слоя, тем быстрее релаксирует сумма этих напряжений. Последнее положение справедливо для всех компонент тензора напряжений, кроме давлений на поверхность подшипника.

sprung sowie mittelspannungsfreier Schwingbeanspruchung im Temperaturbereich  $200\text{ C} < T < 1500\text{ C}$  / R. Lohr, E. Macherauch, P. Maur // Tribologie, Reibung, Verschleiß, Schmirung. - 1982. - № 3. - P. 241-262.

3. Зернин, М.В. Критерии эквивалентности напряженных состояний и обобщенная диаграмма деформирования баббита на основе олова /М.В.Зернин// Вестник Брянского государственного технического университета. - 2014. - №3. - С. 26-34.
  4. Зернин, М.В. Контактная ползучесть баббитового слоя подшипников скольжения/ М.В.Зернин, А.Г. Кузьменко, А.В.Яковлев // Заводская лаборатория. - 2008. - Т. 74. - № 5. - С. 58-62.
  5. Хрущов, М.М. Усталость баббитов/ М.М.Хрущов. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1943. - 140 с.
  6. Кузьменко, А.Г. Методика оценки сопротивления усталости антифрикционных материалов для подшипников скольжения/ А.Г. Кузьменко, А.В.Яковлев, М.В.Зернин // Заводская лаборатория. - 1984. - № 8. - С. 77-79.
  7. Зернин, М.В. К исследованию усталостной долговечности баббитового слоя тяжело нагруженных подшипников скольжения / М.В.Зернин, А.В. Яковлев // Заводская лаборатория. - 1997. - № 11. - С. 39-47.
  8. Яковлев, А.В. Остаточные напряжения в антифрикционном слое баббитового подшипника / А.В.Яковлев//Вопросы исследования прочности и динамики элементов машин и подвижного состава железных дорог: сб. науч. тр. - Тула: Тул. политехн. ин-т, 1978. - С.119-123.
  9. Кузьменко, А.Г. Релаксация напряжений в баббитовом слое подшипников скольжения/ А.Г.Кузьменко, А.В.Яковлев //Проблемы прочности. - 1985. - № 9. - С. 11-17.
  10. Зернин, М.В. Экспериментальная оценка влияния асимметрии цикла нагружения на усталостную долговечность баббитовых слоев/ М.В.Зернин // Заводская лаборатория. - 1998. - Т.64. - № 4. - С. 48-52.
1. Morozov, E.M. *Contact Tasks of Fracture Mechanics* / E.M. Morozov, M.V. Zernin. - 2-d Ed. - M.: Librokom, 2010. - pp. 544.
  2. Lohr, R. Das Verformungsverhalten der Gleitlagerung SnSb8Cu4Cd unter Zug- und Druck Beanspruchung sowie mitteldruckspannungsfreier Schwingbeanspruchung im Temperaturbereich 200 C < T < 1500 C/ R. Lohr, E Macherauch, P.Maur// Tribologie, Reibung, Verschleiß, Schmirung. - 1982. - № 3. - P. 241-262.
  3. Zernin, M.V. Criteria of stressed states equivalence and generalized diagram of babbitt deformation based on tin /M.V.Zernin// Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2014. - №3. - pp. 26-34.
  4. Zernin, M.V. Contact creep of babbitt layer in slider bearings/ M.V.Zernin, A.G. Kuzmenko, A.V.Yakovlev // *Factory Laboratory*. - 2008. - Vol. 74. - № 5. - pp. 58-62.
  5. Khrushchov, M.M. *Babbitt Fatigue*/ M.M.Khrushchov. - M.-L.: Publishing House of AS of the USSR, 1943. - pp. 140.
  6. Kuzmenko, A.G. Procedure of fatigue resistance assessment in antifriction materials for slider bearings/ A.G. Kuzmenko, A.V.Yakovlev, M.V.Zernin // *Factory Laboratory*. - 1984. - № 8. - pp. 77-79.
  7. Zernin, M.V. To investigations of fatigue life in babbitt layer of heavy-loaded slider bearings / M.V.Zernin, A.V. Yakovlev // *Factory Laboratory*. - 1997. - № 11. - pp. 39-47.
  8. Yakovlev, A.V. Residual stresses in antifriction layer of babbitt bearing / A.V.Yakovlev//*Problems of Strength and Dynamics Investigations of Machines and Rolling-Stock Elements in Railways: Proceedings* - Tula: Tul. Polytech. Inst., 1978. - pp.119-123.
  9. Kuzmenko, A.G. Stresses relaxation in babbitt layer of slider bearings/ A.G.Kuzmenko, A.V.Yakovlev //*Strength Problems*. - 1985. - № 9. - pp. 11-17.
  10. Zernin, M.V. Experimental assessment of influence of load cycle asymmetry upon fatigue life of babbitt layers/ M.V.Zernin // *Factory Laboratory*. - 1998. - Vol.64. - № 4. - pp. 48-52.

Статья поступила в редколлегию 24.02.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Аверченков В.И.

#### Сведения об авторах:

**Яковлев Александр Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-08-10, e-mail: [jav.05@mail.ru](mailto:jav.05@mail.ru).

**Yakovlev Alexander Victorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Mechanics, Dynamics and Strength of Machines" Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-08-10, E-mail: [jav.05@mail.ru](mailto:jav.05@mail.ru).

**Зернин Михаил Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832) 56-09-84, e-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).

**Zernin Mikhail Victorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. "Informatics & Software" Bryansk State Technical University, Phone: (4832) 56-09-84, E-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).