

УДК 539.4

DOI: 10.30987/article_5d9317b223f295.08713337

М.В. Зернин

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ КРИТЕРИЕВ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ БАББИТОВЫХ СЛОЕВ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Приведены критерии эквивалентности напряженных состояний, применяемые для моделирования процессов усталости. Описаны различные критерии, предложенные разными исследователями для подшипников скольжения. Предложена методика оценки применимости различных критериев на основе результатов экспериментальных исследований. Показано, что для слоев баббита на оловянистой основе можно использовать в качестве

критерия первое главное напряжение, но при этом необходимо учитывать расклинивающее действие смазывающего материала, попадающего в трещину под давлением (радиальными напряжениями).

Ключевые слова: баббит на основе олова, многоосное напряженное состояние, циклическое нагружение, критерии эквивалентности, усталостное разрушение, подшипники скольжения, расклинивающее действие масла.

M.V. Zernin

APPLICABILITY ANALYSIS OF STRESS STATE CRITERIA FOR DESCRIPTION OF BABBIT LAYER FATIGUE DESTRUCTION IN SLIDER BEARINGS

The criteria of stressed state equivalence used for fatigue process simulation are shown. Different criteria offered by various investigators for slider bearings are described. A procedure is offered for the estimate of different criteria applicability on the basis of experimental investigation results. It is shown that for tin-based babbitt layers it is possible to use the first

basic stress as a criterion, but at that it is necessary to take into account a propping action of lubricant coming in a crack under pressure (radial stresses).

Key words: tin-based babbitt, multiaxial stressed state, cycling loading, equivalence criteria, fatigue destruction, slider bearings, propping action of oil.

Постановка задачи

На кафедре «Механика и ДПМ» БГТУ в течение многих лет выполняются исследования различных механических свойств антифрикционных материалов для подшипников скольжения (ПС). В реальных конструкциях ПС антифрикционные слои (АФС) практически всегда находятся под воздействием многоосного напряженно-деформированного состояния (НДС),

часто называемого также сложным напряженным состоянием (СНС). Поэтому нами выполнены [1; 2] соответствующие экспериментальные и расчетные [3; 4] исследования влияния вида НДС. Результаты таких исследований и применимость их для слоев ПС обсуждаются в настоящей статье.

Обзор применяемых критериев эквивалентности напряженных состояний при оценке усталостной долговечности элементов машин

Остановимся кратко на вариантах учета влияния СНС на процессы повреждения материала. В депонированной монографии [5] автором выполнен анализ теорий усталости в условиях СНС. Рассмотрены статистические теории усталости при СНС, разработанные Н.Н.Афанасьевым, С.Д. Волковым, В.П.

Тамужем и В.С. Куксенко, Л.А. Сосновским и др. Показано, что в структурно-неоднородных многофазных материалах от усталости могут повреждаться те или иные элементы структуры: кристаллиты различных фаз, межзеренные и межфазные границы. Практически невозможно получить достаточно полное статистическое описа-

ние особенностей микроНДС и разрушения такой структурной композиции, так как в зависимости от вида макроНДС могут повреждаться те или иные элементы реальной структуры. Автор предложил [2; 5] преодолеть эти сложности, заменив всю совокупность реальных элементов структуры неким обобщенным структурным элементом. То есть принимается гипотеза, что критерии эквивалентности СНС в неявной форме содержат зависимости от НДС структурных параметров, определяющих разрушение.

В обзорной работе [5] рассмотрены зависимости, определяющие эквивалент-

ность различных СНС, и обоснован следующий вывод. Нет возможности описать единым критерием все многообразие материалов и процессов циклического нагружения. Большинство известных критериев эквивалентности получены применительно к частным, наиболее простым случаям нагружения и зачастую для ограниченного класса материалов. В таблице приведены некоторые из критериев без ссылок на первоисточники (ссылки и более подробный анализ критериев содержатся в работе [5]).

Таблица

Критерии эквивалентности НДС, применяемые в расчетах усталостной долговечности

Расчетные соотношения	Автор критерия
$\tau_{\max} = \left(1 - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T}\right) \tau_m + \frac{\sigma_{-1}}{2}$	К.Р. Зодерберг
$\tau_{\max}^{o\kappa m} = \left(1 - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T}\right) \tau_m^{o\kappa m} + \frac{\sqrt{2}\sigma_{-1}}{3}$	Дж. Марин
$(2 - m^2)(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - 2(1 - m^2)(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) = 6\tau_{-1}^2 - 2\sqrt{6}m\tau_{-1}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$ где $m = \sqrt{6} \frac{\tau_{-1}}{\sigma_{-1}} - \sqrt{2}$	С.В. Серенсен
$\sigma_{1\max}^{np} + A\sigma_{i2a} \lg N(1 + Bk) = C \text{ при } \sigma_1 > 0,$ $\sigma_{1\max}^{np} + A\sigma_{i2a} \lg N = B \text{ при } \sigma_1 \leq 0,$ где $\sigma_{1\max}^{np}$ - предельная величина максимального за цикл главного растягивающего напряжения; σ_{i2a} - интенсивность амплитудных напряжений; $k = \sigma_{i0} / \sigma_i$; A, B, C - константы материала	Л.П. Боровский
$\left[\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + k(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)\right]^n \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = (\sqrt{6}\tau_{-1})^{n+1},$ где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - амплитудные значения главных напряжений	Д.К. Гольцев
$\sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \frac{1}{12}\left(\frac{\sigma_{im}}{\sigma_\phi}\right)^2} = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_{im}}{\sigma_\phi}$	И.А. Биргер
$\sigma_s = \sigma_{ia}(1 - \chi') + \chi'\sigma_{ia}^*;$ $\chi' = \frac{1}{\sqrt{3}-1} \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} - 1\right);$ $\sigma_{ia}^* = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_\phi^2 - \xi\sigma_z\sigma_\phi}; \xi = f(\nu),$ где σ_z и σ_ϕ - осевое и тангенциальное напряжения в трубчатом образце; ν - коэффициент поперечной деформации в упругопластической области	А.А. Лебедев, И.Н. Шканов
$A^0 \frac{\eta_{\Sigma a}}{\sigma_\phi} + \left(\frac{\eta_{\Sigma m}}{\sigma_\phi}\right)^{A^0} = 1, \quad \text{где} \quad \eta_{\Sigma a} = \chi'\sigma_{ia} + (1 - \chi')\sigma_{ia}^*;$ $\eta_{\Sigma m} = \chi'\sigma_m + (1 - \chi)\sigma_{1m}^*;$ $\chi' = \frac{1}{\sqrt{3}-1} \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_{-1}} - 1\right); \chi = \frac{1}{\sqrt{3}-1} \left(\frac{\sigma_p}{\tau_k} - 1\right)$	А.А. Лебедев, И.Н. Шканов
$\tau_a + B_0\sigma_a \leq A_0,$ где τ_a, σ_a - амплитуды касательных и нормальных напряжений в плоскости максимального сдвига; B_0, A_0 - константы материала	Финдли

Расчетные соотношения	Окончание таблицы Автор критерия
$\tau_a + B_1 \sigma_{\max}^{okm} \leq A_1$	К. Данг-Ван
$\tau_a^{okm} + B_2 \sigma_{\max}^{okm} \leq A_2$	Г. Кроссланд
$\tau_a^{okm} + B_3 \sigma_m^{okm} \leq A_3$	Г. Саинес
$\tau_a^{okm} + B_4 \sigma_a^{okm} + C_4 \sigma_m^{okm} \leq A_4$, где τ_a^{okm} - амплитуда октаэдрических касательных напряжений; $\sigma_a^{okm}, \sigma_m^{okm}, \sigma_{\max}^{okm}$ - соответственно амплитудное, среднее и максимальные значения нормального октаэдрического напряжения	Ю. Кавада
$\left[\frac{\sigma_a^3}{\sigma_{-1N}(T)} \right]^n + \left[\frac{\sigma_m^3}{\sigma_e(T)} \right]^p = 1, \quad \text{где } \sigma_a^2 = \lambda_0 \sigma_1 + \lambda_1 \sigma_1 + \lambda_2 \sigma_2 + \lambda_3 \sigma_3;$ $n = \lambda^2 \{1 + \lambda(\lambda - 1) [\sigma_m / \sigma_e(T)]\};$ $\lambda = [\sigma_{-1N}(T) + \sigma_{0.2}(T)] / \sigma_e(T).$ Здесь $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - константы материала; T - температура; $p = f(n)$; $\sigma_{-1N}(T)$ - предел выносливости при заданном числе циклов N ; $\sigma_e(T)$ - предел прочности при растяжении	А.В. Вахромеев

Применяемые критерии для подшипников скольжения

Сложность условий работы и разрушения АФС является основной причиной того, что в настоящее время не завершено построение теории влияния вида НДС на долговечность ПС. В работах различных исследователей в качестве критерия используются различные компоненты поля НДС. Поле НДС в цилиндрических ПС удобнее описывать в цилиндрической системе координат (изображено на рис. 1 в левом верхнем углу). Во многих работах [6; 7] в качестве критерия прочности в первом приближении принято, что критерием эквивалентности можно считать радиальное напряжение $\sigma_r = \sigma_3$. Это мотивируется тем фактом, что в области максимальных давлений материал наиболее

нагружен. В других работах утверждается, что за процесс усталостного разрушения ответственны нормальные окружные напряжения σ_φ . Это мотивируется тем фактом, что трещины усталости направлены перпендикулярно растягивающим напряжениям, а именно эти компоненты НДС чаще всего близки к первым главным напряжениям. Причем растягивающие компоненты σ_1 в поле НДС (в ПС обычно доминирует сжимающее нагружение материала) могут проявляться вследствие различных причин: в зоне высоких градиентов давлений, от расклинивающего действия смазочного материала, попадающего в трещину под высоким давлением, и др.

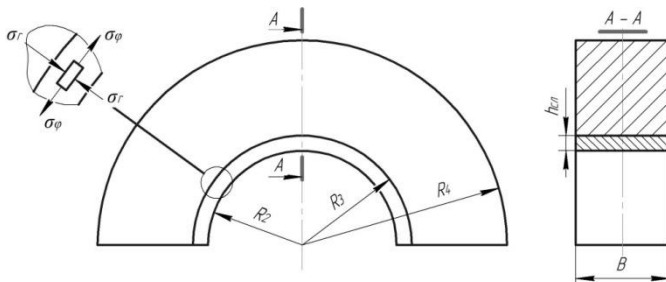


Рис. 1. Схема испытанных подшипников-образцов с изображением компонент напряжений

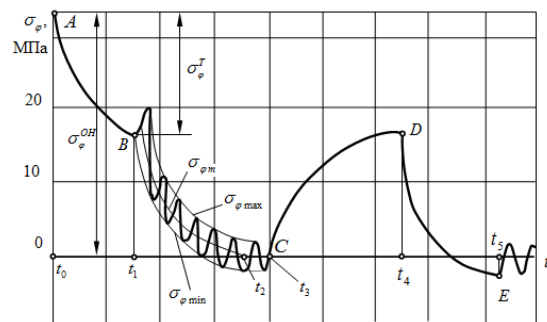


Рис. 2. Схема релаксации постоянных составляющих окружных напряжений

При этом следует учитывать доказанную в работах [6-9] релаксацию постоянных компонент окружных напряжений (рис. 2). Эпюра радиальных напряжений

σ_r в каждом цикле нагружения уравнивается приложенную к ПС силу. Поэтому процессы релаксации не проявляются.

Окружные напряжения σ_ϕ от действующей силы суммируются с остаточными и температурными, и при циклическом нагружении ПС суммарные напряжения релаксируют таким образом, что можно полагать [6-9], что приложен симметричный цикл с амплитудой $\sigma_\phi/2$. То же самое можно говорить и об осевых напряжениях σ_z .

На усталостные процессы влияют и касательные составляющие НДС (точнее - интенсивность напряжений σ_i), разрыхляющие материал микропластической деформацией и приводящие к зарождению трещин усталости. Не менее важны растягивающие компоненты поля НДС (первое главное напряжение σ_1), из-за действия которых трещины развиваются. Предпочтительны обобщенные критерии эквивалентности, учитывающие влияние и интенсивности напряжений σ_i , и первого главного напряжения σ_1 .

Известны попытки использовать комплексные критерии, учитывающие несколько компонент НДС. Например, в работах А.Г. Кузьменко и А.В. Яковлева [6; 7] экспериментально показано, что для одного класса подшипников, если величина σ_ϕ/σ_r находится на одном уровне, крите-

рий $\sigma_r = \sigma_\phi$ дает удовлетворительные результаты. Но в этом случае фактически используются одновременно и критерий $\sigma_r = \sigma_\phi$, и критерий σ_ϕ , так как их соотношение постоянно. В других работах для баббитов рекомендовано применять теорию наибольших касательных напряжений.

А.Г. Кузьменко предложил [7] использовать достаточно общий и обоснованный подход, развиваемый в работах [10; 11]. Далее А.Г. Кузьменко с применением достаточно спорных гипотез получил [7] для тяжелонагруженных ПС такой критерий:

$$\sigma_\phi - \chi\sigma_r = \sigma_\phi \quad (1)$$

Автором настоящей статьи использован [2] критерий $\sigma_1 = \sigma_\phi$, но с учетом расклинивающего действия масла, попадающего в трещину под давлением (рис. 3а). В итоге в качестве критерия развития трещины в ПС автор использовал критерий

$$\sigma_\phi = \sigma_\phi/2 + \sigma_r \quad (2)$$

Предположено, что изначально короткие трещины зарождаются в зоне растягивающих напряжений $\sigma_1 = \sigma_\phi$. Далее в полость такого дефекта попадает масло под давлением σ_r и трещина развивается от напряжений $\sigma_\phi = \sigma_\phi/2 + \sigma_r$.

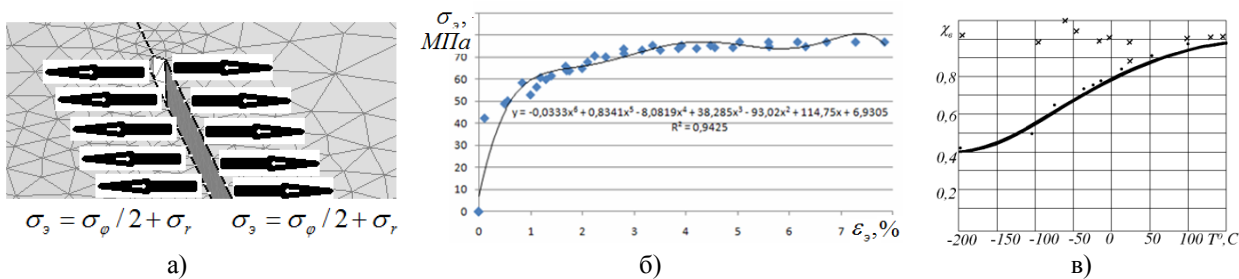


Рис. 3. Схема формирования напряжений, действующих на берега трещины (а), обобщенная диаграмма деформирования баббита (б), а также зависимость параметров χ_γ (крестики) и χ_β (точки) от температуры (в)

Экспериментальные исследования влияния вида напряженного состояния на упруго-пластические и усталостные свойства баббита

Для баббита нами получен [1] критерий эквивалентности напряженных состояний и построена [3] обобщенная диаграмма деформирования (рис. 3б). После проведения экспериментальных исследований тонкостенных трубчатых образцов при трех видах одноосного напряженного

состояния (растяжение, сжатие и кручение) и обработки их результатов получен [3] критерий эквивалентности НДС, основанный на объединенной теории прочности Г.С. Писаренко и А.А. Лебедева [10; 11], которые предложили и продемонстри-

ровали высокую точность критерия эквивалентности

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 \leq \sigma_p, \quad (3)$$

где параметр χ можно получить на основе результатов экспериментов при двух различных видах одноосного НДС. Например, если получены предельные напряжения при растяжении, сжатии и кручении σ_p , σ_c и τ_k , то $\chi = \sigma_p / \sigma_c$ или

$$\chi = \frac{\sigma_p - \tau_k}{(\sqrt{3}-1)\tau_k}.$$

Причем если материал является пластичным, то $\sigma_p = \sigma_c$ и $\chi = 1$, а критериальное выражение (3) вырождается в критерий Мизеса $\sigma_i \leq \sigma_p$, обычно применяемый для идеально пластичных материалов. Если же свойства материала приближаются к идеально хрупким, его прочность при сжатии σ_c стремится к бесконечности, а параметр χ устремляется к нулю. Критерий (3) в этом случае вырождается в критерий для идеально хрупких материалов, который имеет вид $\sigma_1 \leq \sigma_p$.

При каждом из трех видов НДС испытано несколько образцов и получены следующие осредненные значения предельных напряжений: предел текучести при растяжении $\sigma_{Tp} = 49$ МПа, предел текучести при сжатии $\sigma_{Tc} = 75$ МПа, предел текучести при кручении $\tau_{Tk} = 27$ МПа; предел прочности при растяжении $\sigma_{Bp} = 65$ МПа, предел прочности при сжатии $\sigma_{Bc} = 96$ МПа, предел прочности при кручении $\tau_{Bk} = 49$ МПа. Вычисленный параметр χ после осреднения взят равным 0,78. Таким образом, критерий (3) для баббита Б83

принимает вид $0,78\sigma_i + 0,22\sigma_1 \leq \sigma_p$. Это означает, что эквивалентные напряжения σ_3 и эквивалентные деформации ε_3 определяются формулами

$$\sigma_3 = 0,78\sigma_i + 0,22\sigma_1,$$

$$\varepsilon_3 = 0,78\varepsilon_i + 0,22\varepsilon_1.$$

С использованием этих формул построена [3] обобщенная диаграмма деформирования баббита (рис. 3б). Если отбросить линейный участок и оставить только нелинейный, то можно аппроксимировать эту систему точек многими функциями. В итоге выбрана аппроксимация полиномом 6-й степени, для которого величина R^2 , характеризующая достоверность, равна 0,9802. Такое значение получаем, если эту аппроксимацию выполнять для нелинейной области, а для упругого участка использовать формулу $\sigma_3 = E\varepsilon_3$, где E - модуль упругости.

На рис. 3в по результатам работы [12] для близкого по химсоставу импортного баббита Tegotenax-S показано, как влияет температура на значения параметров χ_t (крестики) и χ_v (точки). Видно, что при повышении температуры свойства баббита Tegotenax-S все более приближаются к свойствам идеально пластичного материала. Обобщая результаты работы [12], можно заключить, что пределы текучести баббита при сжатии и растяжении можно считать одинаковыми. Для оценки уровня напряжений, соответствующего началу пластических деформаций, можно использовать критерий Мизеса. Для реальных температур эксплуатации баббитов (более 50°C) за пределами упругости тоже можно использовать критерий Мизеса. И только для пониженных температур следует использовать обобщенный критерий (3).

Влияние вида напряженного состояния на усталостные свойства баббита

Для выяснения влияния СНС на усталостные свойства баббита испытаны [1; 2] тонкостенные трубчатые образцы при двух видах одноосного напряженного состояния: при симметричном цикле осевой нагрузки и при симметричном цикле крутящего момента (рис. 4). Результаты этих двух серий испытаний неплохо укла-

дываются в единую кривую усталости. Можно принять, что в диапазоне долговечностей от 104 до 107 циклов пределы выносливости $\sigma_{-1} \approx \tau_{-1}$. А это значит, что в области многоциклового усталости можно применять критерий эквивалентности σ_1 . В области долговечностей $N < 104$ циклов

(область малоциклового усталости) результаты экспериментов отклоняются от прямой на рис. 4. Сказывается влияние пла-

стических деформаций на процессы накопления повреждений и разрушение баббита.

Экспериментальное выявление влияния вида напряженного состояния на усталостную долговечность баббитовых слоев подшипника

Для определения влияния на долговечность баббитовых слоев, нанесенных на стальную основу, контактных условий нагружения при наличии смазки в БГТУ были разработаны [6] и активно использовались [2; 6; 7; 13; 14] методика и стенд для испытаний подшипников-образцов (П-О). Нами выполнены усталостные испытания полукольцевого П-О (рис. 5, поз. 1), прижимаемого циклически изменяемой

(пульсирующей) нагрузкой к вращающемуся валу 2. Образец 1, вал 2 и его опоры 4 погружены в масляную ванну 3 с регулируемой температурой масла. Некоторые образцы испытывались по расчетной схеме, где нагрузка прикладывалась не по вертикальной оси, а была разделена на две, действующие под углами 27° и 36° (рис. 5б).

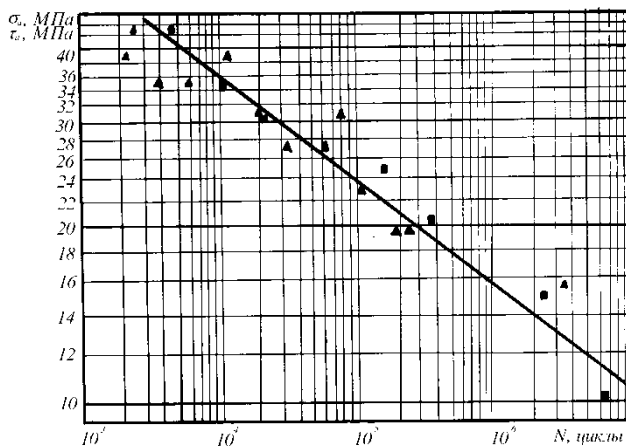


Рис. 4. Результаты испытаний тонкостенных трубчатых образцов из баббита Б83 при симметричных циклах нагружения: ▲ - осевой нагрузки; ■ - крутящего момента

Были проведены испытания [2; 13; 14] нескольких типоразмеров П-О для исследования влияния различных факторов на долговечность АФС. Здесь рассмотрим только те варианты испытаний, в которых проявилось влияние вида напряженного состояния при минимальном влиянии других факторов. А именно проанализируем испытания образцов с постоянной толщиной баббитового слоя $h_{сл} = 2$ мм. В одной серии НДС изменялось за счет изменения изгибной жесткости корпуса (изменялся радиус R_4 (рис. 1), а для одной серии - ширина образца B по рис. 6а). Также испытаны образцы с локальными уменьшениями жесткости - за счет фрезеровки отверстия

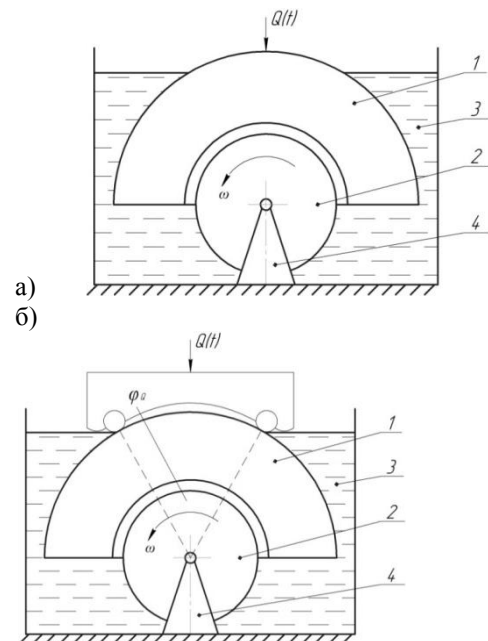


Рис. 5. Схемы проведения испытаний подшипников-образцов: а - одной силой; б - двумя силами

(рис. 6б) или выполнения проточки (рис. 6в). Существенно изменялись распределения напряжений при приложении нагрузки по схеме 5б.

На рис. 7 и 8 приведены результаты усталостных испытаний П-О, выполненных для выявления влияния СНС: серии испытаний П-О с различной изгибной жесткостью (рис. 7) и серии испытаний при удалении точек приложения двух сил от вертикали (рис. 8). Результаты испытаний нескольких образцов с отверстием (рис. 6б) и с проточкой (рис. 6в) также выявили полезную информацию о влиянии вида НДС. Но по малому их количеству кривые усталости не получены.

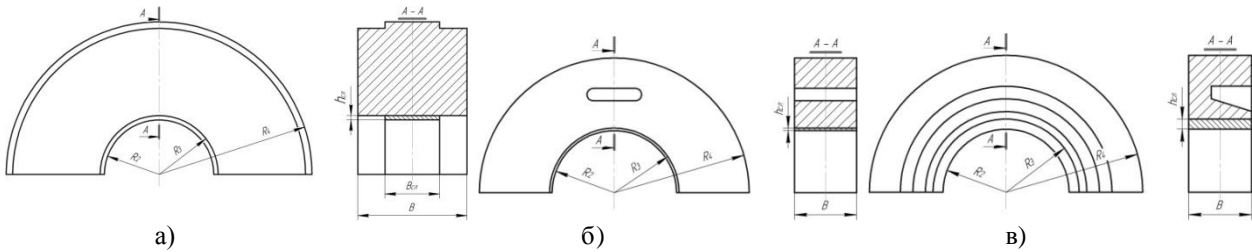


Рис. 6. Схемы подшипников-образцов повышенной изгибной жесткости за счет более широкого стального слоя (а), с отверстием (б), с проточкой (в) в стальном слое

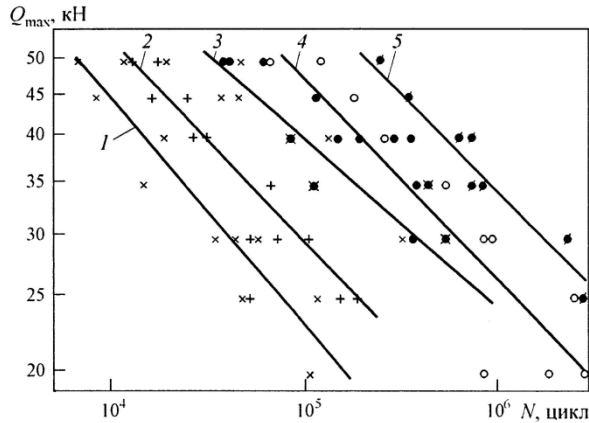


Рис. 7. Результаты усталостных испытаний подшипников-образцов ($R_2=25$ мм) различной изгибной жесткости с толщиной слоя $h_{сл}=2$ мм из баббита Б83: 1 - $R_4=40$ мм, $B=25$ мм; 2 - $R_4=45$ мм, $B=25$ мм; 3 - $R_4=50$ мм, $B=25$ мм; 4 - $R_4=54,25$ мм, $B=25$ мм; 5 - $R_4=70$ мм, $B=50$ мм

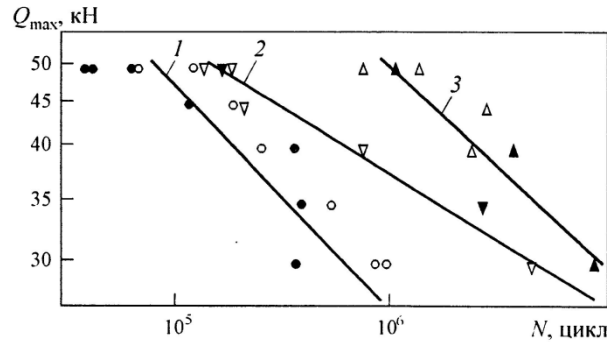


Рис. 8. Результаты усталостных испытаний подшипников-образцов размерами $R_4=54,25$ мм, $R_2=25$ мм, $B=25$ мм с толщиной слоя $h_{сл}=2$ мм из баббита Б83 при удалении точек приложения сил $Q_{max}/2$ на угол φ_Q от оси симметрии: 1 - $\varphi_Q=0$; 2 - $\varphi_Q=27^\circ$; 3 - $\varphi_Q=36^\circ$

Для всех испытанных образцов были построены трехмерные расчетные схемы и выполнены расчеты НДС [4]. Моделирование задачи выполнялось в программном комплексе Femap Nastran, а непосредственно расчеты НДС - в комплексе ANSYS. Рассчитывалась модель подшипника-образца 1 с валом 2, опирающимся на два опорных подшипника 3 и 4 (рис. 9а). Вследствие симметричности модели по двум плоскостям рассчитывалась четвертая часть от полной модели (рис. 9б) после приложения соответствующей системы связей. Нагрузка приложена к небольшой площадке сверху образца (так же, как это реализовано в экспериментах). Образец с проточкой не симметричен относительно плоскости, проходящей по центру его ширины. Поэтому для такого образца применялась расчетная схема с одной плоскостью симметрии (рис. 9г).

Использованы трехмерные гексагональные конечные элементы (КЭ). Конечноеlementная сетка показана на рис. 9д. Для сгущения сетки в нужных местах применена процедура редуцирования (стыков-

ки сеток с различными размерами КЭ). Наиболее мелкая разбивка использована непосредственно для баббитового слоя. Моделировались две зоны контактирования: контакт вала и подшипника-образца (зона K1) и контакт вала и опорного подшипника (зона K2).

Упругопластические свойства баббита, полученные в статье [3], задавались в виде нелинейной диаграммы деформирования. Результаты расчетов напряжений в баббитовом слое выводились в виде цветowych диаграмм (рис. 10а). Для более точного анализа соответствующие напряжения импортировались в EXCEL-файлы. По таким табличным данным в программном пакете TableCurve 3D получали полиномиальную аппроксимирующую зависимость и соответствующую диаграмму трехмерной поверхности (рис. 10б).

Результаты трехмерных расчетов отличаются от результатов двухмерных расчетов, используемых в наших более ранних работах [2; 6; 7; 13; 14]. По ширине П-О давления не постоянны - вследствие изгиба вала проявляется краевой эффект.

Учет упругопластических свойств баббита несколько сглаживает этот эффект. Кроме того, можно разделить П-О, в которых напряжения не превышают предела текучести, и П-О с пластически деформируе-

мым баббитовым слоем. Замечено еще несколько отличий, позволивших объяснить характер разрушения баббитового слоя в некоторых сериях испытаний.

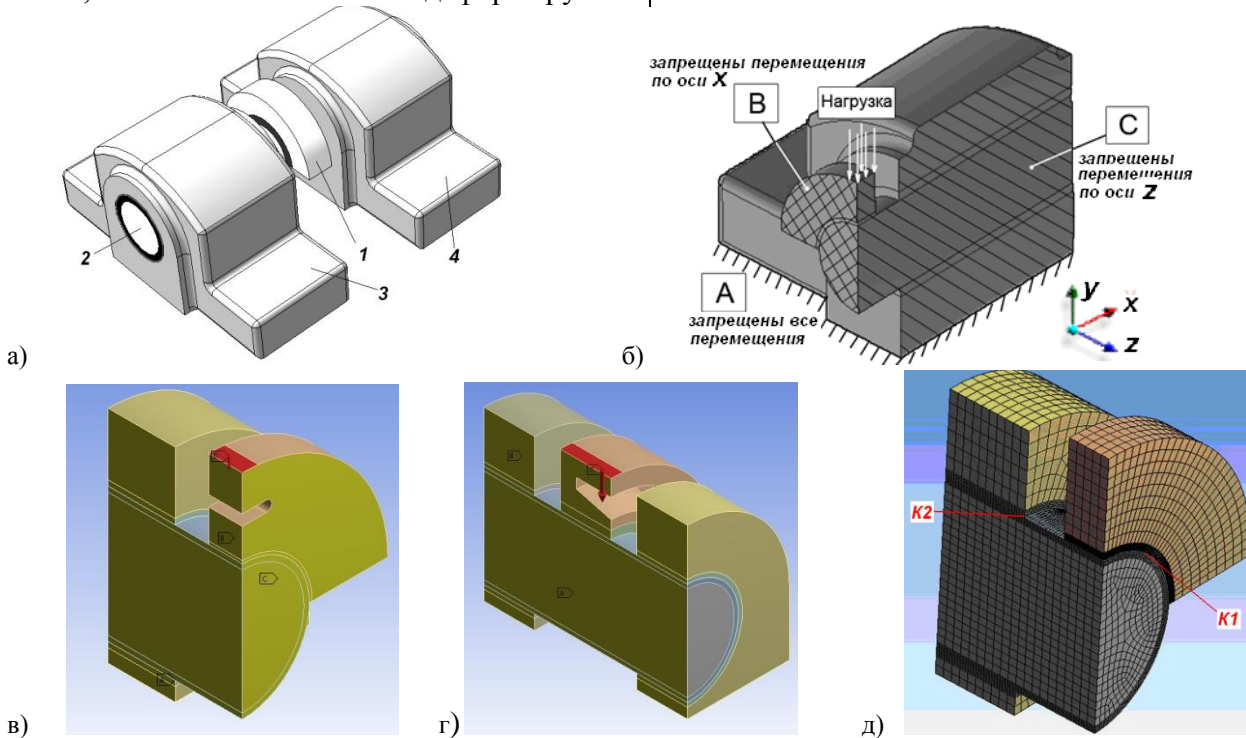


Рис. 9. Трехмерная модель подшипника-образца с валом и опорными подшипниками (а) и ее четвертая часть со связями, реализующими условия симметрии (б), схемы образцов с отверстием (в) и с проточкой (г), а также пример конечноэлементной схемы для подшипника-образца (д)

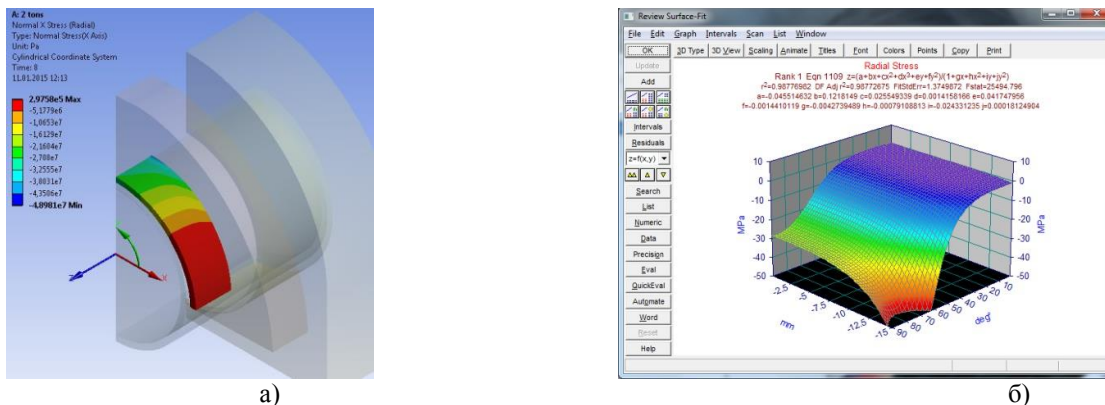


Рис. 10. Картина радиальных напряжений в баббитовом слое (а) и аппроксимирующая диаграмма давлений, действующих на рабочую поверхность баббитового слоя (б)

Выполнены трехмерные расчеты всех типов образцов при всех значениях максимальной силы. Так как решалась контактная задача с поиском площадки контакта, то напряжения нелинейно зависят от уровня максимальной силы. Кроме того, учитывалась физическая нелинейность задачи вследствие пластического деформирования баббитового слоя: из решения упругой задачи определялись те варианты нагружения образцов, при которых происходило упругопластическое деформирование баб-

битового слоя. Для этих вариантов задача решена в упругопластической постановке. В экспериментах было замечено, что в таких наиболее тяжело нагруженных случаях наблюдались признаки пластической деформации слоя. Предполагалось, что при первом нагружении материал деформируется упругопластически, при последующих циклах - упруго до этого же рассчитанного напряженного состояния. Таким образом, получены уточненные значения напряже-

ний в баббитовом слое для всех испытанных вариантов.

Оценка применимости различных критериев эквивалентности напряженных состояний

В результате расчетов НДС всех образцов при всех уровнях внешнего воздействия получены напряжения. Задача нелинейно зависит от уровня воздействия: при повышении его увеличивается площадь контакта, поэтому напряжения возрастают непропорционально нагрузке. Кроме того, расчеты выявили, что при высоких уровнях нагрузки начинается пластическое деформирование баббитового слоя.

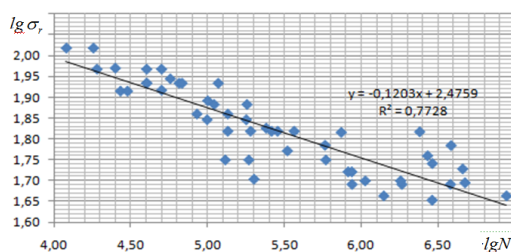
Качественный анализ влияния вида НДС на усталость баббитовых слоев выполнен в статье [4]. Показано, что во всех случаях трещины усталости возникают перпендикулярно первым главным напряжениям. В настоящей статье приведем результаты количественного анализа. Этот этап работы выполнен совместно с магистром Е.А. Егоровской. Данные о напряжениях в баббитовом слое собраны в EXCEL-файлы. Там приведены параметры σ_i , σ_1 , σ_φ , σ_r , которые, как указано выше, используют в качестве критериальных, а также обобщенные критерии по формулам (1), (2) и (3). Определены максимальные значения этих предполагаемых критериев эквивалентности НДС.

Не рассматривались критерии, использующие в качестве параметра максимальное касательное напряжение. Фактически использование его вместо интенсивности напряжений означает использование критерия Треска - Сен-Венана вместо кри-

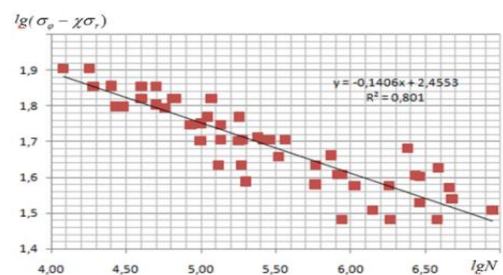
терия Мизеса. Как известно, различие от применения этих двух критериев составляет не менее 7 %, причем критерий Мизеса считается точнее.

В сводную таблицу включены максимальные значения этих параметров напряжений и соответствующие значения долговечностей образцов. Далее были построены в двойных логарифмических координатах диаграммы (кривые усталости) и аппроксимированы прямыми линиями. Для параметров σ_i (критерий Мизеса), σ_1 (максимальное главное напряжение), σ_φ (окружное напряжение) и критерия эквивалентности по формуле (3) результаты неудовлетворительные. Эти критериальные параметры отвергнуты. Для трех остальных возможных критериев эквивалентности НДС диаграммы приведены на рис. 11.

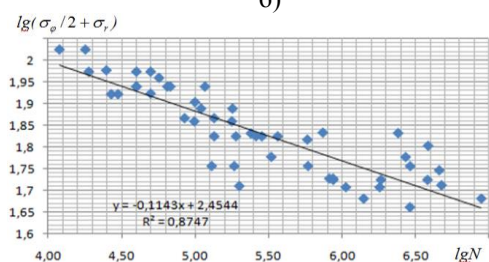
Из диаграмм видно, что эти три критерия обеспечивают практически одинаковую точность. Объяснение этого факта состоит в том, что во всех трех критериях имеется радиальное напряжение. Т.е. расклинивающее действие масла, попадающего в трещину под давлением, существенно увеличивает первое главное напряжение (рис. 3а). Этот расклинивающий эффект наиболее существенно влияет на процессы подрастания трещин до размеров зародышей макротрещин.



а)



б)



в)

Рис. 11. Диаграммы в координатах «логарифм долговечности lgN - логарифм радиального напряжения $lg \sigma_r$ » (а); « lgN - логарифм эквивалентного напряжения по А.Г. Кузьменко $lg(\sigma_\varphi - \chi\sigma_r)$ » (б) и « lgN - логарифм эквивалентного напряжения по М.В. Зернину $lg(\sigma_\varphi/2 + \sigma_r)$ » (в)

Выводы

1. Представлены методика и результаты усталостных испытаний подшипников-образцов со слоем баббита при варьировании вида напряженного состояния в широких пределах. Построены трехмерные модели и выполнены расчеты напряжений в упругопластической постановке.

2. Получены количественные оценки применимости различных критериев эквивалентности напряжений. Показано наиболее существенное влияние радиальных напряжений (давлений), оказывающих расклинивающее действие на берега трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зернин, М.В. Исследование свойств антифрикционных материалов для опор скольжения транспортных машин / М.В. Зернин, В.М. Кривецкий // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сб. науч. тр. - Брянск: БИТМ, 1986. - С. 79-80.
2. Зернин, М.В. Усталостная долговечность цилиндрических баббитовых подшипников скольжения: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / М.В. Зернин. - Брянск, 1989. - 249 с.
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. Экспериментальные и расчетные исследования влияния вида напряженно-деформированного состояния на усталостную долговечность баббитовых слоев подшипников скольжения / М.В. Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2018. - № 2 (63). - С. 71-81.
5. Зернин, М.В. К построению статистической методики расчета накопления микротрещин, а также зарождения и развития системы макротрещин в подшипниках скольжения / М.В. Зернин. - Брянск: БИТМ, 1988. - 201 с. - Деп. в ВИНТИ 30.05.88, № 6256-B88.
6. Яковлев, А.В. Исследование усталостной долговечности баббитовых подшипников малооборотного дизеля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / А.В. Яковлев. - Л., 1981. - 19 с.
7. Кузьменко, А.Г. Научные основы расчетно-экспериментальных методов оценки напряженного состояния и долговечности цилиндрических опор скольжения: автореф. дис. ... д-ра

техн. наук: 01.02.06 / А.Г. Кузьменко. - М., 1986. - 40 с.

8. Кузьменко, А.Г. Релаксация напряжений в баббитовом слое подшипников скольжения / А.Г. Кузьменко, А.В. Яковлев // Проблемы прочности. - 1985. - № 9. - С. 11-17.
9. 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.
10. Lohr, R. Das Verformungsverhalten der Gleitlagerung SnSb8Cu4Cd unter Zug- und Druck Beanspruchung 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.
11. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. - Киев: Наукова думка, 1976. - 416 с.
12. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: справочник / под ред. В.Т. Трощенко. - Киев: Наукова думка, 1983. - 368 с.
13. 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.
14. 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.

1. Zernin, M.V. Investigation of antifriction material properties for slider bearings of transport machines / M.V. Zernin, V.M. Krivetsky // *Dynamics, Strength and Reliability of Transport Machines: Proceedings*-Bryansk: BITM, 1986. - pp. 79-80.
2. Zernin, M.V. Fatigue life of cylindrical babbitt slider bearings: *Thesis of Can. Sc. Tech. Degree*: 01.02.06 / M.V. Zernin. - Bryansk, 1989. - pp. 249.
3. Zernin, M.V. Equivalence criteria of stress states and generalized diagram of tin-based babbitt defor-

mation / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2014. - No.3. - pp. 26-34.

4. Zernin, M.V. Experimental and computational investigations of stress-deformed state impact upon fatigue life of babbitt layers in slider bearings / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. - 2018. - No.2 (63). - pp. 71-81.
5. Zernin, M.V. *To Formation of Statistical Procedure for Micro-cracks Accumulation Computation, and Also to Origin and Development of Macro-cracks in Slider Bearings* / M.V. Zernin. - Bryansk:

- BITM, 1988. – pp. 201. – Dep. VINITI 30.05.88, No.6256-V88.
6. Yakovlev, A.V. Investigation of babbit bearing fatigue life of low-speed diesel engine: *Author's Abstract of the Thesis for Can. Sc. Tech. Degree: 05.04.02* / A.V. Yakovlev. – L., 1981. – pp. 19.
 7. Kuzmenko, A.G. Scientific fundamentals of computation-experimental methods for estimate of stressed state and life of cylindrical slider bearings: *Author's Abstract of Dc. Sc. Tech. Thesis: 01.02.06* / A.G. Kuzmenko. – M., 1986. – pp. 40.
 8. Kuzmenko, A.G. Stress relaxation in babbit layer of slider bearings / A.G. Kuzmenko, A.V. Yakovlev // *Strength Problems*. – 1985. – No.9. – pp. 11-17.
 9. Zernin, M.V. Babbit layer contact creep in slider bearings / M.V. Zernin, A.G. Kuzmenko, A.V. Yakovlev // *Factory Laboratory*. – 2008. – Vol.74. – No.5. – pp. 58-62.
 10. Lohr, R. Das Verformungsverhalten der Gleitlagerung SnSb8Cu4Cd unter Zug- und Druck Beanspruchung 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.
 11. Pisarenko, G.S. *Deformation and Strength of Materials at Complex Stressed State* / G.S. Pisarenko, A.A. Lebedev. – Kiev: Scientific Mind, 1976. – pp. 416.
 12. *Stress-Strain Properties of Structural Materials at Complex Stressed State: reference book* / under the editorship of V.T. Troshchenko. – Kiev: Scientific Idea, 1983. – pp. 368.
 13. Kuzmenko, A.G. Procedure for estimate of antifric-tion material fatigue resistance for slider bearings / A.G. Kuzmenko, A.V. Yakovlev, M.V. Zernin // *Factory Laboratory*. – 1984. – No.8. – pp. 77-79.
 14. Zernin, M.V. To investigation of babbit layer fatigue life in heavy duty slider bearings / M.V. Zernin, A.V. Yakovlev // *Factory Laboratory*. – 1997. – No.11. – pp. 39-47.

Ссылка для цитирования:

Зернин, М.В. Анализ применимости критериев эквивалентности напряженных состояний для описания усталостного разрушения баббитовых слоев подшипников скольжения / М.В. Зернин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 9. – С.4 – 14.
DOI:10.30987/article_5d9317b223f295.08713337.

Статья поступила в редакцию 11.07.19

Рецензент: д.т.н., профессор ООО «Научно-производственное предприятие ДИПРОМ»

Болдырев А.П.

Статья принята к публикации 29. 08. 19.

Сведения об авторах:

Зернин Михаил Викторович, к.т.н., доцент кафедры «Механика и ДПМ» Брянского государственного технического университета, e-mail: zerninmv@mail.ru.

Zernin Mikhail Victorovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof of the Dep. “Engineering and DPM”, Bryansk State Technical University, e-mail: zerninmv@mail.ru