

УДК 539.3: 539.43: 621.822.5

DOI: 10.12737/article\_5ac49dc737fd38.18995765

М.В.Зернин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БАББИТОВЫХ СЛОЕВ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ

Описаны методики и приведены результаты экспериментальных исследований баббитовых слоев подшипников-образцов при варьировании вида напряженного состояния. Выполнены упругопластические расчеты напряженного состояния по трехмерным расчетным схемам. Найдено объясне-

ние ориентации в поле напряжений усталостных трещин, появившихся при экспериментах.

**Ключевые слова:** антифрикционный баббитовый слой, испытания на усталость, метод конечных элементов, многоосное напряженное состояние, ориентация трещин усталости.

M.V. Zernin

## EXPERIMENTAL AND COMPUTATION INVESTIGATIONS OF STRESS STATE IMPACT UPON BABBIT LAYER FATIGUE LIFE OF SLIDER BEARING

The procedure and results of fatigue tests of bearing-samples with a babbitt layer at varying a stressed state kind on a large scale are presented. To explain some not so evident results (orientation in a layer of arising micro-cracks) there are formed 3D models and computations of stresses in the layer in elastoplastic setting are carried out. For this purpose there is described a simulation of babbitt elastoplastic properties taking into account a multi-axial stressed state. The application of the criteria of stressed states

equivalence is analyzed and a generalized diagram of babbitt elastoplastic deformation is shown. From the analysis of patterns of stresses in a babbitt layer the explanation of cracks locations from single positions of the theory of fatigue crack development is found. The work results will be used in the computations directed to the life increase of machine bearings.

**Key words:** antifricition babbitt layer, fatigue tests, finite element method, multi-axial stressed state, fatigue crack orientation.

### Постановка задачи

На кафедре «Механика, динамика и прочность машин» БГТУ в течение многих лет выполняются исследования различных механических свойств антифрикционных материалов для подшипников скольжения (ПС). В частности, исследованы свойства баббита Б83, содержащего кроме Sn 10...12% Sb и 5,5...6,5% Cu. Систематизация свойств этого баббита приведена в нашей монографии [1; 2]. Ниже приводятся также некоторые результаты исследований [3] баббита Tegotenax-S, который производит фирма «Goldschmidt-AG». Этот баббит содержит кроме Sn: 7,5...8% Sb; 3,5...4% Cu; 1% Cd.

В реальных ПС напряженно-деформированное состояние (НДС) антифрикционного слоя (АФС) всегда многоосное, называемое часто также сложным напряженным состоянием (СНС). Поэтому для выполнения расчетов НДС в упруго-

пластической постановке необходимо знать влияние вида НДС на упругопластические свойства материала. При циклическом нагружении также сказывается влияние СНС на долговечность. Это влияние можно выявить, испытывая образцы из самого баббита. Но для расчетной оценки долговечности АФС необходимо учитывать особенности деформирования и разрушения баббитового слоя ПС. На накопление усталостных повреждений и зарождение трещин влияют поверхностные явления, не учитываемые общей теорией деформирования и прочности сплошной среды. Напряженное состояние при контактировании характеризуется высокими градиентами. Деформации слоя во многом определяются деформациями более жесткой основы подшипника, на которую нанесен слой. Из-за проявлений процессов релаксации компоненты тензора напряжений

могут иметь различные коэффициенты асимметрии цикла. На процессы зарожде-

ния и развития трещин существенно влияет режим смазывания.

### 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 БИТМ - БГТУ были разработаны [4] и активно использовались [4-6] методика и стенд для испытаний подшипников-образцов (П-О). Нами выполнены усталостные испытания полукольцевых П-О (рис. 1), прижимаемых циклически изменяемой (пульсирующей) нагрузкой к вращающемуся валу. Образец 1, вал 2 и его опоры 4 погружены в масляную ванну 3 с регулируемой темпе-

ратурой масла. Были проведены испытания [4-6] нескольких типоразмеров П-О для исследования влияния различных факторов на долговечность АФС: применения различных баббитов и технологий их нанесения на стальную основу, толщины баббитового слоя, изгибной жесткости корпуса и схемы приложения внешней нагрузки, температуры масла и др. Здесь проанализируем только те серии испытаний, в которых проявилось влияние вида напряженного состояния при минимальном влиянии других факторов.

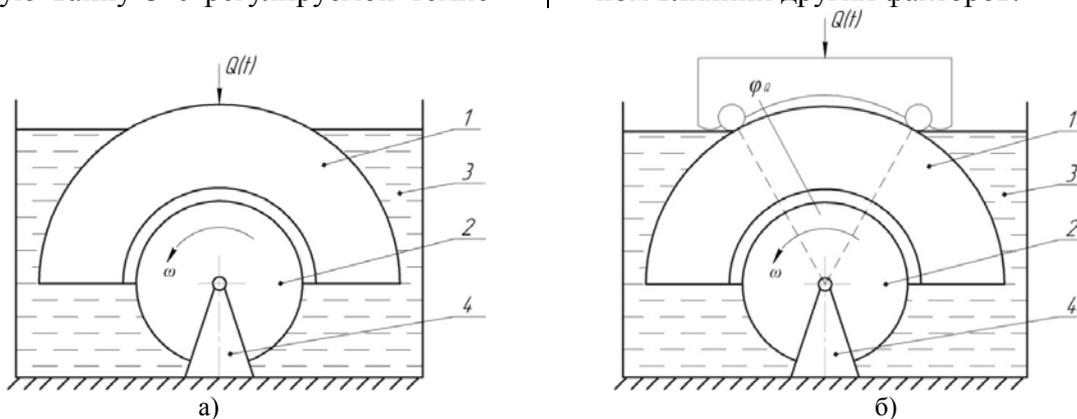


Рис. 1. Схемы проведения испытаний подшипников-образцов

Эпюра давлений ( $\sigma_r$  на рис. 2а), приложенная к полукольцу, создает момент, стремящийся раскрыть это полукольцо. Если внешний радиус полукольца изменять, то существенно варьируются окружающие напряжения  $\sigma_\phi$ . В нескольких сериях испытаний НДС изменялось за счет изменения радиуса  $R_4$ , а для одной серии – еще и ширины образца  $B$  (рис. 2б). Две серии испытаний проводились по схеме, в которой нагрузка прикладывалась не по вертикали, а под углами  $27^\circ$  или  $36^\circ$ , т.е. одна сила была разделена на две (рис. 1б). Эти две силы создавали момент, стремящийся приблизить полукольцо к валу (закрыть его). В этих двух сериях испытаний существенно изменялось соотношение величин

напряжений  $\sigma_\phi$  и  $\sigma_r$ . Также испытаны образцы с локальным уменьшением жесткости за счет фрезеровки отверстия (рис. 2в) или выполнения проточки (рис. 2г).

На рис. 3 и 4 приведены результаты усталостных испытаний П-О, выполненных для выявления влияния НДС: серии испытаний П-О с различной изгибной жесткостью (рис. 3) и серии испытаний при удалении точек приложения двух сил от вертикали (рис. 4). Результаты испытаний нескольких образцов с отверстием (рис. 2в) и проточкой (рис. 2г) также дали полезную информацию о влиянии вида НДС. Но по малому количеству таких испытанных образцов кривые усталости не получены.

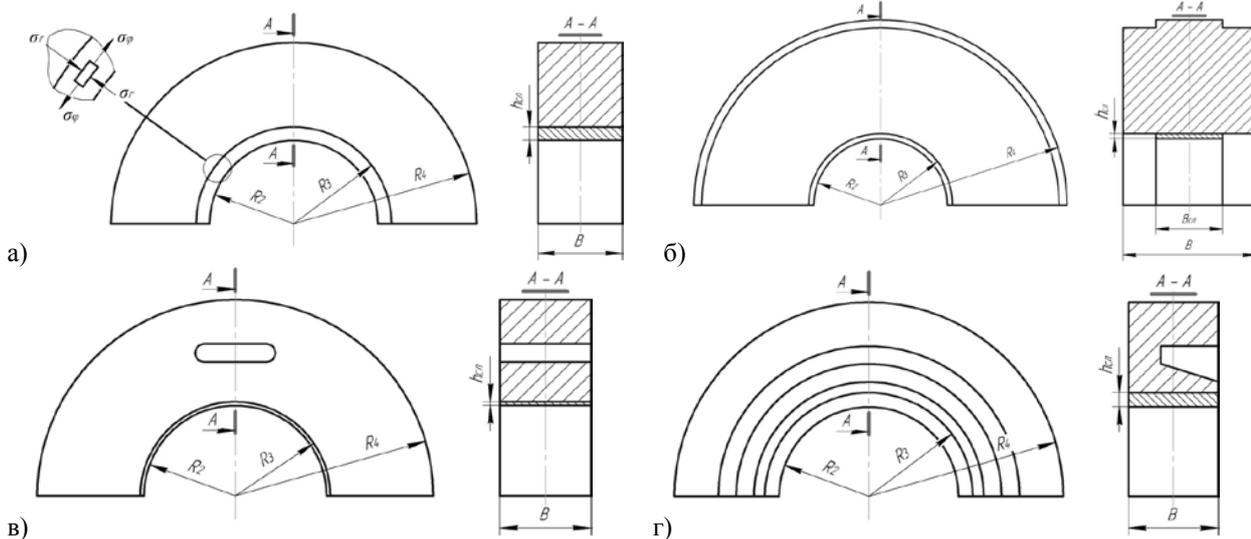


Рис. 2. Схемы подшипников-образцов с одинаковой шириной баббита и стали (а), повышенной изгибной жесткости за счет более широкого стального слоя (б), с отверстием (в) и проточкой (г) в стальном слое

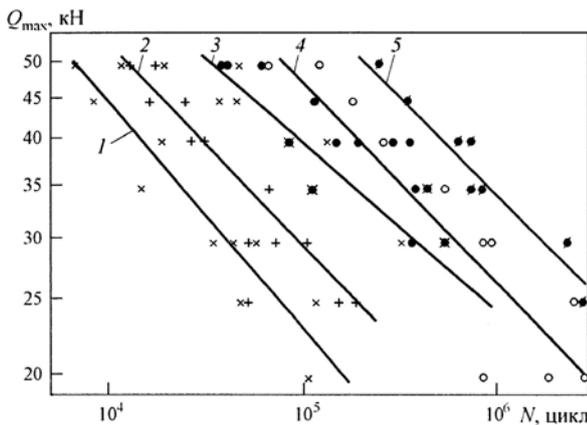


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний подшипников-образцов ( $R_2=25$  мм) различной изгибной жесткости с толщиной слоя  $h_{стл}=2$  мм из баббита Б83: 1 -  $R_4=40$  мм,  $B=25$  мм; 2 -  $R_4=45$  мм,  $B=25$  мм; 3 -  $R_4=50$  мм,  $B=25$  мм; 4 -  $R_4=54,25$  мм,  $B=25$  мм; 5 -  $R_4=70$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

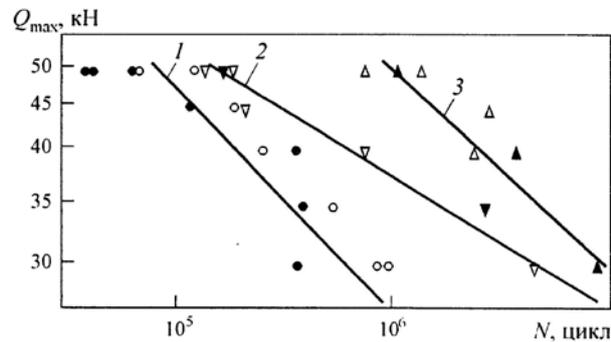


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний подшипников-образцов размерами  $R_4=54,25$  мм,  $R_2=25$  мм,  $B=25$  мм с толщиной слоя  $h_{стл}=2$  мм из баббита Б83 при удалении точек приложения сил  $Q_{max}/2$  на угол  $\varphi_Q$  от вертикали: 1 -  $\varphi_Q=0^\circ$ ; 2 -  $\varphi_Q=27^\circ$ ;  $\varphi_Q=36^\circ$

### Влияние вида напряженного состояния на упругопластические свойства баббита

Ранее результаты усталостных испытаний П-О анализировались с использованием упругих расчетов НДС баббитовых слоев по двумерным расчетным схемам [4-6]. Однако в некоторых случаях при испытаниях были замечены признаки упругопластического деформирования баббитового слоя и проявление краевого эффекта – выдавливание края баббитового слоя в направлении оси вала. Эти эффекты потребовали выполнения расчетов НДС по трехмерным расчетным схемам в упругопластической постановке для более точного анализа результатов усталостных испытаний. Кроме того, было непонятно в не-

которых случаях, почему трещины усталости в слое ориентированы определенным образом.

Для выполнения более точных расчетов НДС необходимо получить критерий эквивалентности напряженных состояний (критерий прочности) и обобщенную диаграмму деформирования материала. Такие параметры определены нами в статье [7]. После проведения экспериментальных исследований тонкостенных трубчатых образцов (рис. 5а) при трех видах одноосного напряженного состояния (растяжение, сжатие и кручение) и обработки их результатов получен критерий эквивалентности

НДС, позволивший привести многоосное напряженное состояние к одной обобщен-

ной компоненте НДС.

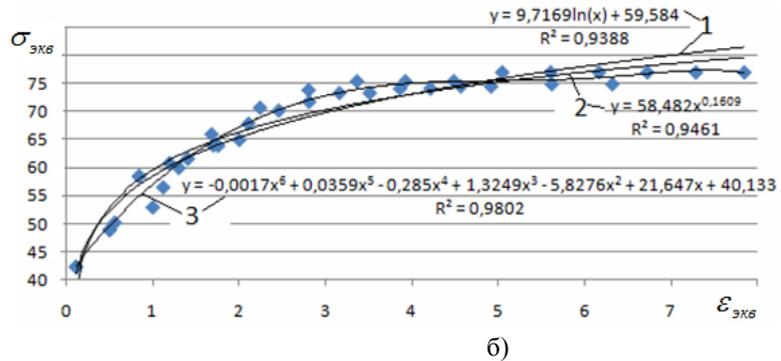
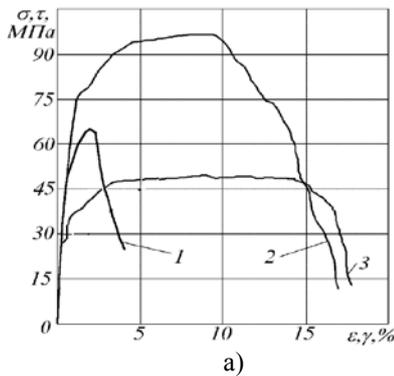


Рис. 5. Диаграммы деформирования (а) тонкостенных трубчатых образцов из баббита Б83 (1 – при растяжении; 2 – при сжатии; 3 – при кручении), а также нелинейный участок обобщенной диаграммы деформирования (б) и его аппроксимация логарифмической (1) и степенной (2) функциями, полиномом 6-й степени (3)

Использована объединенная теория прочности Г.С.Писаренко и А.А.Лебедева [8], которые предложили и продемонстрировали высокую точность критерия эквивалентности

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 \leq \sigma_p, \tag{1}$$

где

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} -$$

интенсивность напряжений,  $\sigma_1$  - первое главное напряжение, а параметр  $\chi$  можно определить как характеристику степени участия в макроразрушении сдвиговой деформации, разрыхляющей материал и приводящей к появлению трещин [8; 9]. Значение этого параметра можно вычислить на основе результатов экспериментов при двух различных видах одноосного НДС. Например, если получены предельные напряжения при растяжении, сжатии и кручении  $\sigma_p, \sigma_c$  и  $\tau_k$ , то  $\chi = \sigma_p / \sigma_c$  или  $\chi = (\sigma_p - \tau_k) / (\sqrt{3} - 1)\tau_k$ .

Если материал является пластичным, то  $\sigma_p = \sigma_c$  и  $\chi = 1$ , а критериальное выражение (1) 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  $\sigma_c$  стремится к бесконечности, а параметр

$\chi$  устремляется к нулю. Критерий (1) вырождается в критерий для идеально хрупких материалов, который в этом случае 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 по двум формулам для нескольких сочетаний пар испытанных образцов параметр  $\chi$  после осреднения взят равным 0,78. Таким образом, критерий (1) для баббита Б83 принимает вид  $0,78\sigma_i + 0,22\sigma_1 \leq \sigma_p$ . Это означает, что эквивалентные напряжения  $\sigma_{экв}$  и эквивалентные деформации  $\varepsilon_{экв}$  в трубчатых баббитовых образцах определяются формулами

$$\sigma_{экв} = 0,78\sigma_i + 0,22\sigma_1, \tag{2}$$

$$\varepsilon_{экв} = 0,78\varepsilon_i + 0,22\varepsilon_1. \tag{3}$$

С использованием этих формул построена обобщенная диаграмма деформирования баббита [7]. Все три диаграммы, представленные на рис. 5а, преобразованы

к координатам «эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентные деформации  $\varepsilon_{\text{экв}}$ » с применением программы Excel. Далее построено несколько диаграмм, на каждой из которых нанесены точки на плоскости координат «эквивалентные напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентные деформации  $\varepsilon_{\text{экв}}$ » для трех видов НДС. Все точки группируются достаточно близко к некой единой кривой линии (рис. 5б), т.е. подтверждается существование для баббита единой (обобщенной) кривой деформирования.

Если отбросить линейный участок и оставить только нелинейный (рис. 5б), то появляется возможность аппроксимировать эту систему точек логарифмической и степенной функциями. Однако аппроксимация полиномом 6-й степени – наилучшая среди рассмотренных. Для баббита целесообразно применять формулу из двух частей: на первом участке (участке упругого деформирования) использовать формулу

$\sigma_{\text{экв}} = E \varepsilon_{\text{экв}}$ , где  $E$  – модуль упругости, а на нелинейном участке – полиномиальную формулу, отмеченную на рис. 5б цифрой 3.

Параметры  $\chi$  для момента начала текучести ( $\chi_T$ ) и момента разрушения образца ( $\chi_B$ ) могут различаться. Проанализируем результаты экспериментов [3] для баббита Tegotenax-S, выполненных в широком диапазоне температур (рис. 6). Испытание на сжатие проводилось до остаточной деформации 10%. В статье [3] приведены для всех опытов (рис. 6а и 6б) значения условных пределов текучести  $\sigma_{0.2}$  и прочности  $\sigma_{10c}$  (напряжения, соответствующие деформации 10%). Сопоставляя рис. 6а и 6б, можно заключить, что при температурах выше 50<sup>0</sup>С свойства сплава Tegotenax-S приближаются к идеально пластическим. Напряжения на горизонтальных участках кривых примерно одинаковы. Значения параметра  $\chi_T$  показаны на рис. 6в крестиками, которые группируются вблизи линии  $\chi_T=1$ . При температурах ниже комнатной увеличивается разница между напряжениями при растяжении и сжатии. Параметр  $\chi_B$  для этих данных корректно определить нельзя. На рис. 6в нанесены точки, полученные как отношение  $\chi_B = \sigma_{Br} / \sigma_{10c}$ , и аппроксимированы линией.

Значения пределов текучести и прочности для близкого по химсоставу баббита Б83 приблизительно соответствуют результатам для Tegotenax-S. Обобщая их, можно заключить, что пределы текучести этих баббитов при сжатии и растяжении одинаковы. Для оценки уровня напряжений, соответствующего началу пластических деформаций, можно использовать критерий Мизеса. Для реальных температур эксплуатации баббитов (более 50<sup>0</sup>С) за пределами упругости тоже можно использовать критерий Мизеса. И только для пониженных температур следует использовать обобщенный критерий (1).

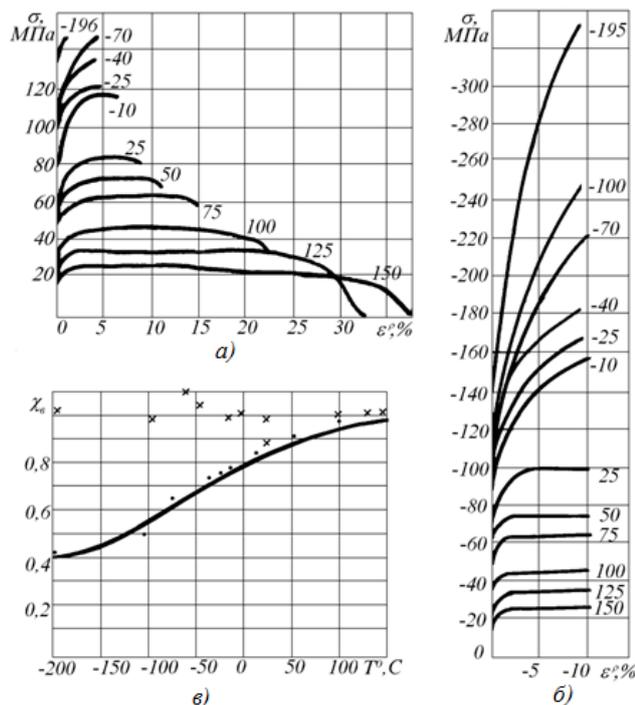


Рис. 6. Результаты экспериментов [3] для баббита Tegotenax-S, выполненных в широком диапазоне температур (значения температур указаны рядом с кривыми) при растяжении (а) и сжатии (б), а также значения параметров  $\chi_T$  и  $\chi_B$ , рассчитанные по этим результатам (в)

## Методика и некоторые результаты расчетов напряженного состояния образцов в трехмерной упругопластической постановке

Эта серия расчетов выполнена совместно с инженерами И.Е.Коричевой и А.В.Чубруковой. Моделирование задачи выполнялось в программном комплексе Femap Nastran. Рассчитывалась модель подшипника-образца 1 с валом 2, опирающимся на два опорных подшипника 3 и 4 (рис. 7а). В большинстве случаев вследствие симметричности модели по двум плоскостям рассчитывалась четвертая часть от

полной модели (рис. 7б и 7в) после приложения соответствующей системы связей. Нагрузка приложена к небольшой площадке сверху образца так же, как 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. 7г).

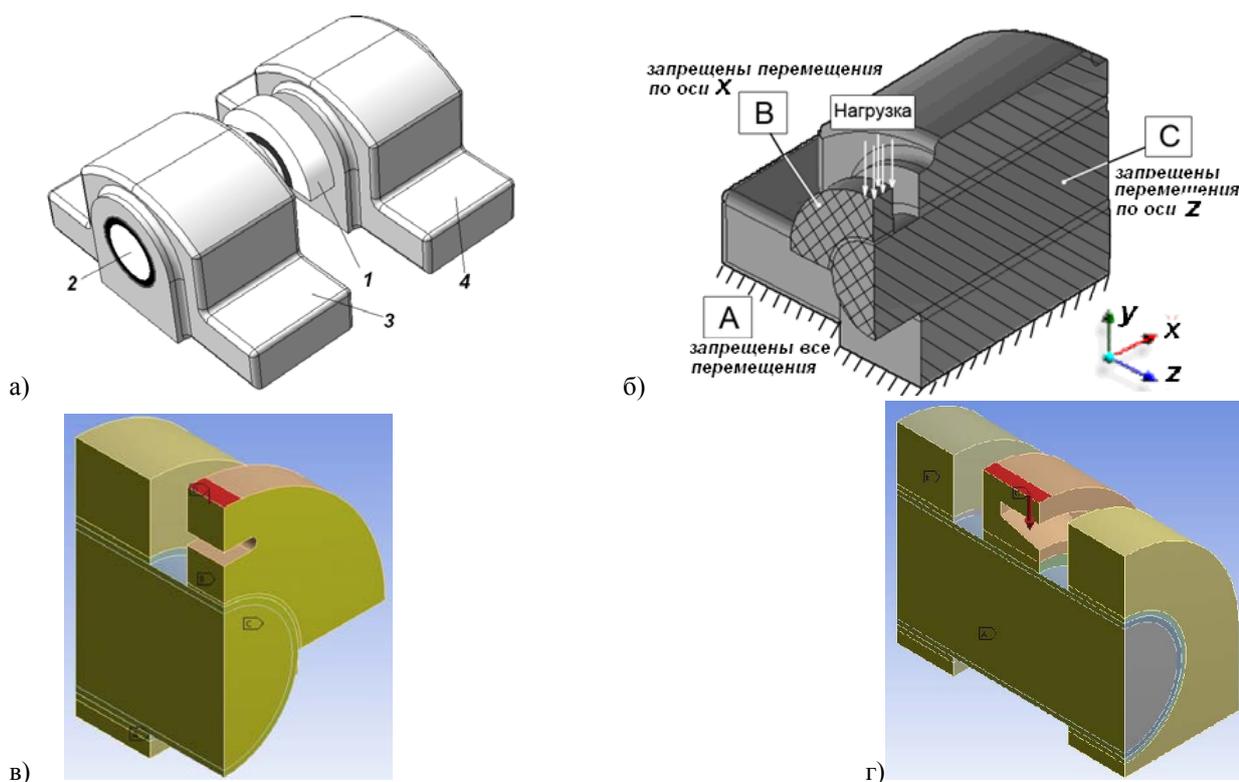
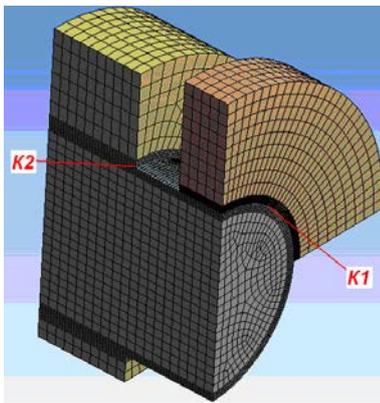


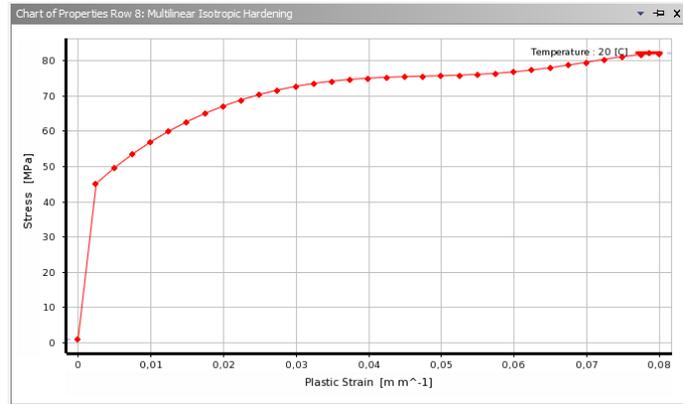
Рис. 7. Трехмерная модель подшипника-образца с валом и опорными подшипниками (а) и ее четвертая часть со связями, реализующими условия симметрии (б), схемы образцов с отверстием (в) и проточкой (г)

Использованы трехмерные гексагональные конечные элементы (КЭ). Пример конечноэлементной сетки показан на рис. 8а. Для сгущения сетки применена процедура редуцирования (стыковки сеток с различными размерами КЭ). Наиболее мелкая сетка КЭ использована непосредственно

для баббитового слоя. Моделировались две зоны контактирования: контакт вала и П-О (зона К1) и контакт вала и опорного подшипника (зона К2). Для расчетной схемы образца с проточкой (рис. 7г) зон К2 было две.



а)



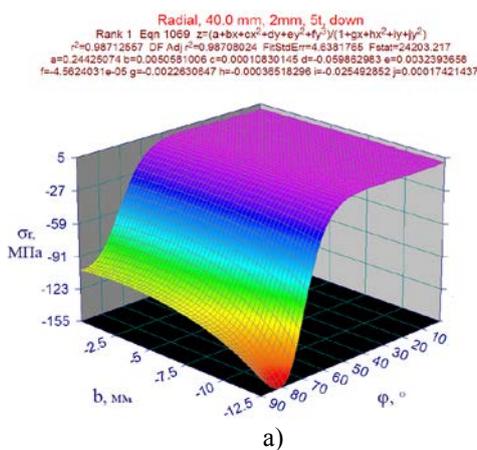
б)

Рис. 8. Конечноэлементная схема модели (а) и задание нелинейной диаграммы деформирования баббита (б)

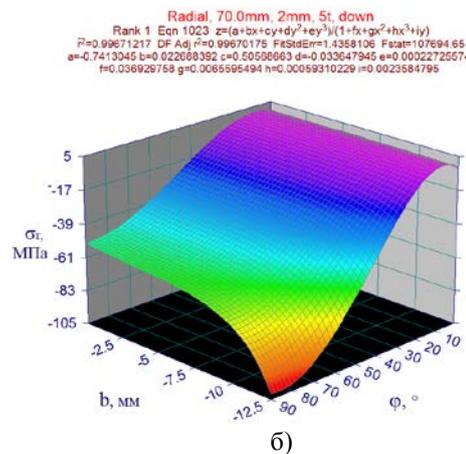
Выполнены трехмерные расчеты всех типов образцов при всех значениях максимальной силы. Так как решалась контактная задача с поиском площадки контакта, то напряжения нелинейно зависят от уровня максимальной силы. Кроме того, учитывалась физическая нелинейность задачи вследствие пластического деформирования баббитового слоя. Применялись критерий Мизеса и обобщенная диаграмма деформирования материала (рис. 8б). Получены уточненные значения напряжений в баббитовом слое для всех испытанных вариантов П-О. Результаты расчетов напряжений в баббитовом слое импортировались в Excel-файлы. По таким табличным данным в программном пакете TableCurve 3D получали полиномиальную аппроксимирующую зависимость и соответ-

ствующую диаграмму трехмерной поверхности.

Результаты трехмерных расчетов отличаются от результатов двухмерных расчетов, использованных в наших более ранних работах [4-6]. Для примера на рис. 9 приведены давления, воздействующие на рабочую поверхность баббитовых слоев. По ширине П-О давления не постоянны – вследствие изгиба вала проявляется краевой эффект. При толщине баббита 2 мм значения напряжений на краю приблизительно в два раза больше, чем в середине. Учет упругопластических свойств баббита несколько сглаживает этот эффект. Замечено еще несколько отличий, позволивших объяснить ориентацию трещин в баббитовом слое в некоторых сериях испытаний.



а)



б)

Рис. 9. Радиальные напряжения в баббитовом слое толщиной 2 мм при  $R_4 = 40$  мм (а) и  $R_4 = 70$  мм (б)

**Влияние изгибной жесткости стального слоя.** С увеличением толщины стального слоя увеличивается угол контак-

та (от  $90^\circ$  при  $R_4 = 40$  мм до  $150^\circ$  при  $R_4 = 70$  мм) (рис. 9). С уменьшением изгибной жесткости увеличиваются растягивающие

окружные напряжения (от 2,5 МПа при  $R_4 = 70$  мм (на уровне погрешности расчета) до 32,5 МПа при  $R_4 = 40$  мм) (рис. 10). Максимальные растягивающие осевые на-

пряжения для образцов разной изгибной жесткости практически совпадают (рис. 11), их уровень достигает 10 МПа.

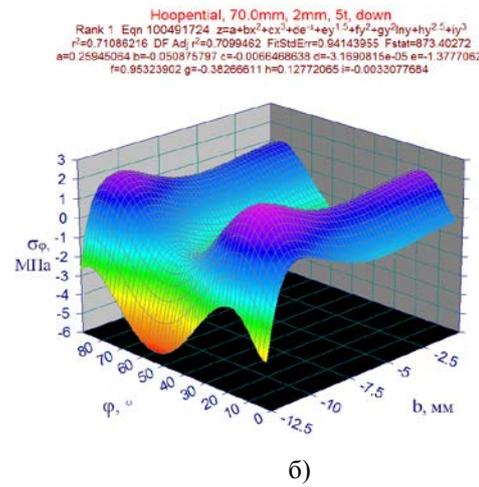
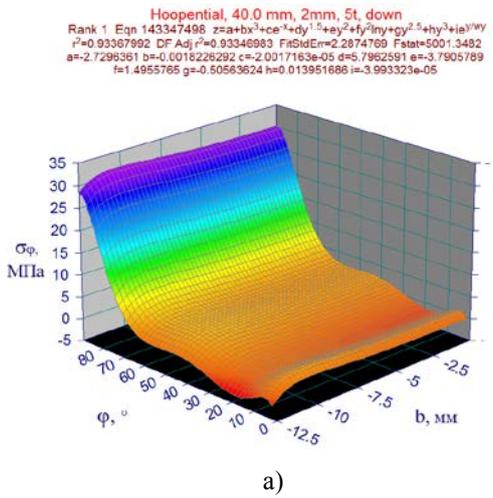


Рис. 10. Окружные напряжения в баббитовом слое толщиной 2 мм при  $R_4 = 40$  мм (а) и  $R_4 = 70$  мм (б)

**Картины напряжений при приложении двух сил.** Нагрузка была приложена в двух точках с применением дополнительного нагружающего приспособления (рис. 16). Появилась двухмодальная эпюра давлений. Под точками приложения нагрузки наблюдается возрастание напряжений. Если при приложении одной нагрузки в этой зоне появлялись большие значения окружных напряжений (растягивающих), то при нагружении двумя силами были об-

наружены две области:  $\sigma_\phi < 0$  - в центре и  $\sigma_\phi > 0$  - под местом приложения нагрузки. В ходе испытаний было замечено, что при таком виде нагружения трещины чаще появлялись в зоне, где напряжения положительные, т.е. в местах приложения сил. Изменения окружных напряжений для этого случая показаны на рис. 12а. Наблюдается появление положительных осевых напряжений на краю подшипника (рис. 12б).

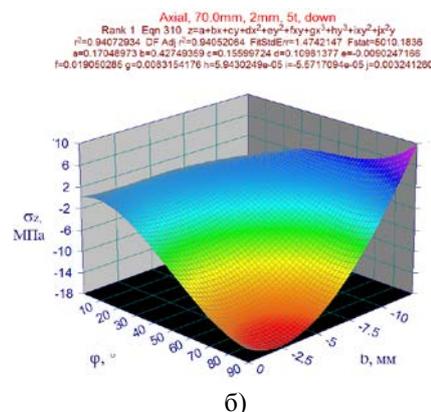
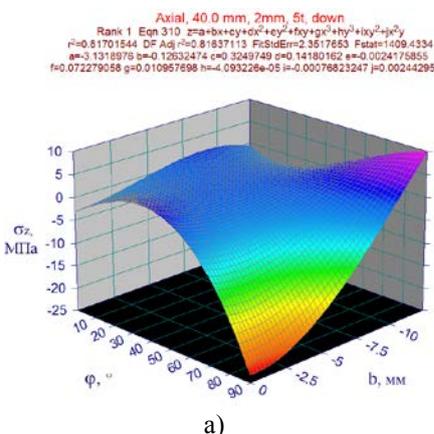


Рис. 11. Осевые напряжения в баббитовом слое толщиной 2 мм при  $R_4 = 40$  мм (а) и  $R_4 = 70$  мм (б)

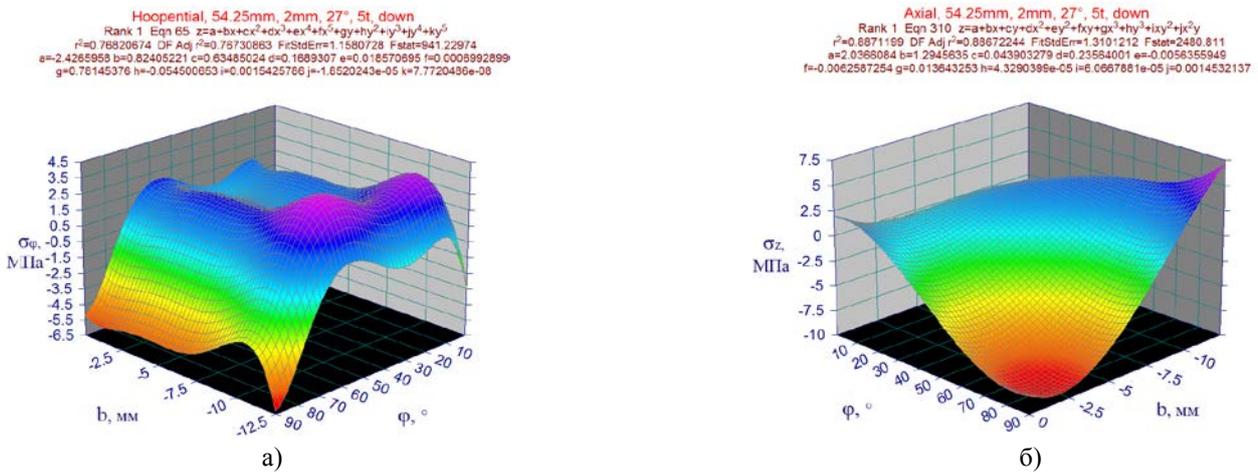


Рис. 12. Окружные (а) и осевые (б) напряжения при нагружении образца двумя силами, удаленными от вертикали на  $27^0$

**Напряжения в образце с отверстием.** Сквозное отверстие (рис. 2в) также влияет на изгибную жесткость П-О. Оно позволяет центральной его части прогибаться под действием давления, и соответствующая эпюра становится двухмодальной. Различие значений радиальных напряжений на краю и в середине подшипника может достигать 50%. В зоне закругления отверстия увеличиваются растягивающие окружные напряжения (рис. 13а), они могут превышать 10 МПа. На краю подшипника появляются положительные осевые напряжения, не превышающие 7 МПа (рис. 13б).

**Напряжения в образце с проточкой.** Образец с проточкой имеет только одну ось симметрии, поэтому рассчитана

половина модели (рис. 7г). Результаты расчетов приведены на рис. 14. В отличие от остальных образцов, сжимающие радиальные напряжения здесь увеличиваются к центру подшипника (почти в два раза больше, чем на краю). В центре подшипника появляются растягивающие окружные напряжения, которые достигают 35 МПа. Также в центре возникают растягивающие осевые напряжения до 11 МПа. При испытаниях было замечено, что трещины появлялись вдоль окружности подшипника под некоторым углом. Расчеты выявили, что такие трещины перпендикулярны первым главным напряжениям  $\sigma_1$ .

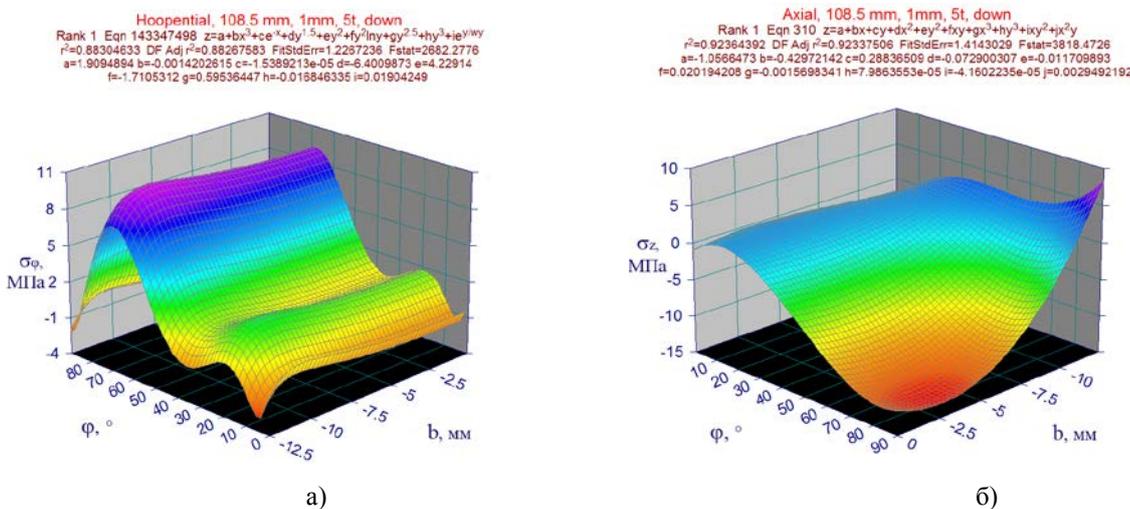


Рис. 13. Окружные (а) и осевые (б) напряжения в образце с отверстием

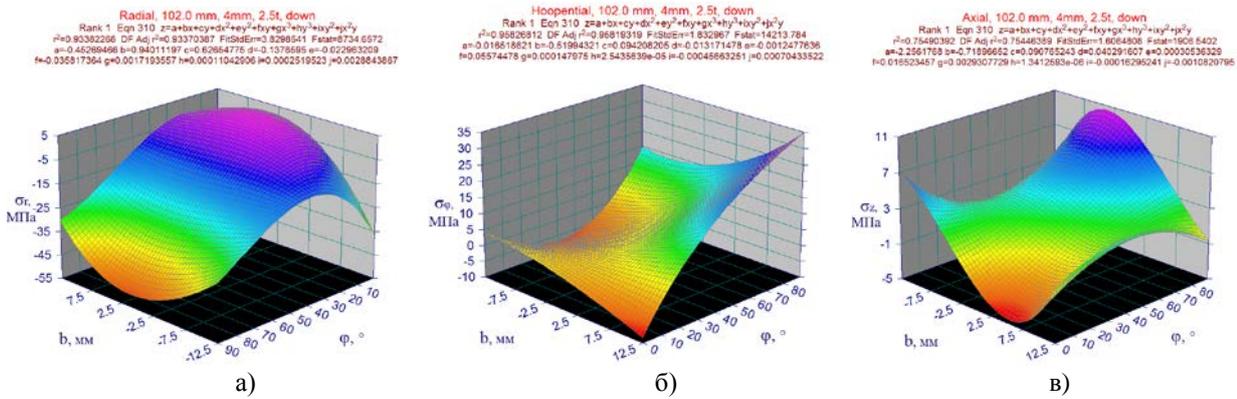


Рис. 14. Радиальные (а), окружные (б) и осевые (в) напряжения в образце с проточкой

**Анализ влияния вида напряженного состояния на усталость баббитовых слоев подшипников-образцов**

Ранее автором выполнена систематизация (рис. 15) усталостных повреждений антифрикционных слоев ПС. Показано, что первоначально происходит накопление рассеянных по объему повреждений. При отсутствии растягивающих компонент напряжений процесс завершается множественными микрповреждениями (рис. 15в). При наличии растягивающих компонент напряжений зарождаются макротрещины усталости (рис. 15г, д). Эти трещины развиваются (рис. 15е – з), что в итоге приводит к выкрашиванию участков АФС (рис. 15и). Важно, что траектория развития макротрещин перпендикулярна растягивающей компоненте НДС, т.е. первому главному напряжению.

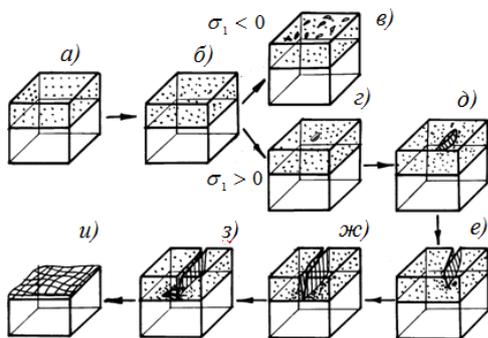


Рис. 15. Схематичное представление этапов повреждения и разрушения баббитового слоя подшипника

Испытания проводились до момента появления трещины размером 5 мм. Исключением были те серии испытаний, в которых исследовалось развитие макротрещин в баббитовом слое П-О. В боль-

шинстве испытанных образцов расположение и ориентация таких трещин были вполне очевидны: трещины располагались в зоне максимальных значений окружных напряжений  $\sigma_\phi$ , а именно эти компоненты близко соответствуют максимальным значениям первого главного напряжения  $\sigma_1$ . Это было выявлено по результатам двухмерных расчетов [4-6].

Но в некоторых образцах расположение и ориентация таких макротрещин были необычными. Трехмерные расчеты НДС позволили объяснить ориентацию появившихся трещин усталости. Так, в образцах с увеличенной толщиной стального полукольца (рис. 2б) некоторые макротрещины располагались на краю баббитового слоя и были ориентированы в окружном направлении. Расчеты в трехмерной постановке таких вариантов показали, что возникающие вследствие краевого эффекта осевые напряжения  $\sigma_z$  имеют значения, близкие к значениям  $\sigma_\phi$ .

Аналогичные результаты получены при испытаниях П-О с проточкой (рис. 2г). При отгибании (от вала) более тонкой части стальной основы в баббитовом слое, нанесенном на стальную основу, также возникают значительные растягивающие напряжения  $\sigma_z$ . Макротрещины ориентированы в окружном направлении, т.е. перпендикулярно напряжениям  $\sigma_z$ , которые в этом случае близки к первым главным напряжениям  $\sigma_1$ .

**Выводы**

1. Представлены методика и результаты усталостных испытаний подшипников-образцов со слоем баббита при варьировании вида напряженного состояния в широких пределах.

2. Для объяснения некоторых не вполне очевидных результатов (ориента-

ция в слое возникающих макротрещин) построены трехмерные модели и выполнены расчеты напряжений в упругопластической постановке.

3. В итоге найдено объяснение расположения трещин с единых позиций теории развития усталостных трещин.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.
2. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – 2-е изд. – М.: Libroком, 2010. – 544 с.
3. 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. Macherrauch, P. Maur // Tribologie, Reibung, Verschleiß, Schmirung. – 1982. – №3. – С. 241-262.
4. 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.
5. 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.

6. Зернин, М.В. Экспериментальная оценка долговечности напыленных и армированных сеткой баббитовых слоев подшипников скольжения / М.В. Зернин // Трение и износ. – 1997. – Т.18. – № 3. – С. 506-514.
7. 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.
8. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – Киев: Наукова думка, 1976. – 416 с.
9. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: справочник / под ред. В.Т. Трошенко. – Киев: Наукова думка, 1983. – 368 с.

1. Morozov, E.M. *Contact Problems of Fracture Mechanics* / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – M.: Mechanical Engineering. 1999. – pp. 544.
2. Morozov, E.M. *Contact Problems of Fracture Mechanics* / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – 2-d Ed. – M.: Librocom, 2010. – pp. 544.
3. 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. Macherrauch, P. Maur // Tribologie, Reibung, Verschleiß, Schmirung. – 1982. – № 3. – P. 241-262.
4. Kuzmenko, A.G. Estimate procedure of antifricition material fatigue resistance for slider bearings / A.G. Kuzmenko, A.V. Yakovlev, M.V. Zernin // *Factory Laboratory*. – 1984. – No.8. – pp. 77-79.
5. Zernin, M.V. To investigations of babbitt layer fatigue life in heavy duty slider bearings / M.V. Zernin,

A.V. Yakovlev // *Factory Laboratory*. – 1997. – No.11. – pp. 39-47.

6. Zernin, M.V. Experimental estimate of life in babbitt layers sputtered and net-reinforced of slider bearings / M.V. Zernin // *Friction and Wear*. – 1997. – Vol.18. – No.3. – pp. 506-514.
7. Zernin, M.V. Criteria of stressed state equivalence and generalized diagram of tin-based babbitt deformation / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2014. – No.3. – pp. 26-34.
8. Pisarenko, G.S. Deformation and Strength of Materials at Complex Stressed State / G.S. Pisarenko, A.A. Lebedev. – Kiev: Scientific Thought, 1976. – pp. 416.
9. *Stress-strain Properties of Structural Materials at Complex Stressed State: reference book* / under the editorship of V.T. Troshchenko. – Kiev: Scientific Thought, 1983. – pp. 368.

Статья поступила в редколлегию 12.02.18.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Кеглин Б.Г.

**Сведения об авторах:**

**Зернин Михаил Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Механика, динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета, e-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).

**Zernin Mikhail Victorovich**, Can. Eng., Assistant Prof. of the Dep. “Mechanics, Dynamics and Machine Strength”, Bryansk State Technical University, e-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).