

Машиностроение и машиноведение

УДК 539.43: 621.822.5

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-4-15

М.В. Зернин, Н.Н. Рыбкин, И.А. Емельянов, А.В. Матюхин

РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОСТАДИЙНОЙ МОДЕЛИ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БАББИТА И АНТИФРИКЦИОННЫХ СЛОЕВ ИЗ НЕГО

Разработана многостадийная модель накопления усталостных повреждений и разрушения антифрикционных материалов. Приведены результаты экспериментальных исследований циклической долговечности баббитовых образцов и идентификации на их основе параметров модели. Построен алгоритм и выполнена программная реализация многостадийной модели накопления усталостных

повреждений и разрушения баббитового антифрикционного слоя подшипников скольжения. Выполнено тестирование программы. Результаты расчетов и экспериментов согласуются.

Ключевые слова: нагружение, стадия, микроповреждения, трещины, макротрещины, баббит, идентификация, эксперименты, многогранник.

M. V. Zernin, N.N. Rybkin, I.A. Yemeliyanov, A.V. Matyukhin

REALIZATION OF MULTI-STAGE MODEL OF BABBIT FATIGUE DAMAGES AND BABBIT ANTI-FRICTION LAYERS

The research purpose is to realize a multi-stage model developed by the authors to show fatigue failures accumulation and failures of anti-friction materials and layers in slider bearings.

The model describes: a scattered accumulation of micro-cracks, formation and development of a micro-crack system up to a limiting state of an object. There are solved some problems. The problem of model parameter identification on the basis of the analysis of babbitt sample tests is solved with the use of the simplest optimization method – a method of a deformable polyhedron.

At that there are used principles of the least-squares method. A new result is four model parameters obtained finally. A computation problem of anti-friction babbitt layer life required the development of a new software product. Software testing is carried out as a comparison of bearing-sample tested for fatigue and calculated life of these samples. The calculated and experimental lives are consistent. It confirms model working capacity.

Key words: loading, stage, micro-failures, cracks, macro-cracks, babbitt, identification, experiments, polyhedron.

О многостадийной модели и алгоритме расчета усталостной долговечности антифрикционных материалов и слоев подшипника

Нами предложена [1] многостадийная модель накопления повреждений от усталости и изнашивания подшипникового антифрикционного слоя (АФС). Алгоритм расчета усталостных повреждений и разрушения антифрикционных материалов (АФМ), имеющих крупные элементы структуры, схематично представлен на рис. 1. В модели объем дискретизирован на участки, временная ось - на малые интервалы. Поэтому модель можно называть «дискретной» или «конечно-элементной». Принцип дискретизации объема состоит в обеспечении постоянного поля напряженно-деформированного состояния (НДС) на каждом участке. Дискретизация временной оси на малые интервалы позволяет оцени-

вать изменения состояния участков и всего объекта в целом. При переходе к следующему интервалу времени можно изменять параметры нагружения. Кратко опишем алгоритм вычислений по рис. 1.

Принимается, что рассеянную поврежденность можно описать скалярной функцией $P(t)$ – отношения числа M_i^* разрушенных структурных элементов (СЭ) к общему числу M обобщенных СЭ. Таким образом уровень повреждений i -ой точки (участка)

$$P_i = M_i^* / M_i \quad (1)$$

АФМ обычно содержит много различных элементов структуры и при разных уровнях воздействия могут повреждаться

различные элементы структуры. Поэтому используем понятие «обобщенный СЭ» и их количество в единице объема подлежит определению. Скорость накопления повреждений зависит от вектора внешних воздействий, уровня накопленных повреждений и свойств СЭ. На данном этапе исследований количество обобщенных структурных элементов в единице объема (M_i в одном кубическом мм) подбирается следующим образом. Известно, что размеры интерметаллидов $SbSn$ в баббите должны быть не более 0,1–0,2 мм. Можно принять, что в единице объема (кубический мм) содержится примерно 4000 СЭ. В дальнейшем этот параметр можно уточнить, добиваясь лучшего совпадения рас-

четных и экспериментальных долговечностей объекта.

Также не определена начальная поврежденность P_0 АФМ, известен лишь верхний предел пористости исходной структуры при конкретном виде изготовления АФС. Для разных технологий изготовления АФМ начальный уровень поврежденности может варьироваться в пределах от 0 до 10%. Истинная начальная поврежденность подбирается расчетным путем в ходе идентификации. Можно задать сначала $P_0=0$, потом изменять и выявить, при каком значении P_0 расчетная долговечность лучше совпадет с экспериментальной.

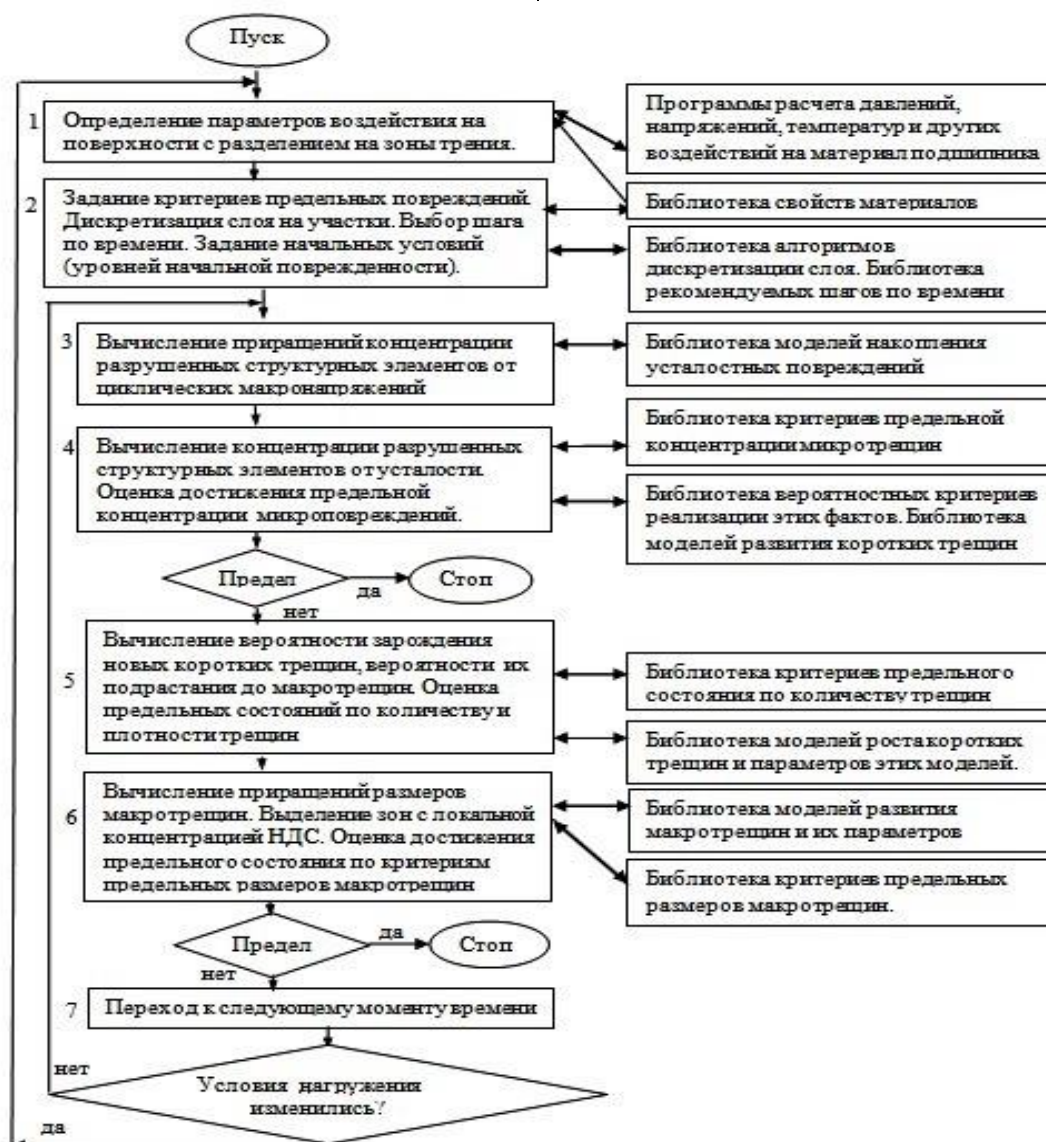


Рис. 1. Схема расчетного моделирования усталостных повреждений в антифрикционном слое подшипника

В модели [1] возможен учет различия скоростей накопления микроповреждений в приповерхностных слоях материала и в его глубинных слоях. Но на данном этапе исследований этот фактор не учтен. Полагаем, что для описания скорости накопления микроповреждений подходит степенная функция

$$\dot{I} = A\sigma_a^n \quad (2)$$

Параметры A и n этой функции подлежат определению в процессе идентификации. Итак, необходимо решить задачу идентификации четырех параметров модели по результатам экспериментальных исследований усталостной долговечности образцов из баббита. Идентификация выполняется с применением простейшего метода оптимизации – метода деформируемого многогранника.

Принято, что микроструктурно короткие трещины, размеры которых не превышают размера S_3 , можно рассматривать как микротрещины [2]. Увеличение их количества отнесено к стадии накопления

$$P_i^k(t) = 1 - \left[1 - M_i^*(t) / M_i \right]^{M_i^*(t)},$$

Когда вероятность образования ФКТ достигает заданного уровня (50%), то считается состоявшимся факт ее появления. Вторая стадия зарождения макротрещин моделирует подрастание ФКТ до размеров зародыша макротрещины и при этом при-

рассеянных повреждений. На каждом временном интервале скорость накопления повреждений считается постоянной. Приращение накопленных на этом интервале повреждений равно произведению скорости на величину временного интервала. А уровень повреждений в участке к окончанию интервала равен сумме предыдущего уровня и указанного приращения

$$\dot{I}_i(t_j) = \dot{I}_i(t_{j-1}) + \dot{I}_{j-1,j}(t_j - t_{j-1}).$$

Описание зарождения системы физически коротких трещин (ФКТ) и их развития до размеров зародыша макротрещины описано простейшими формулами теории вероятности. Предложено двухстадийное описание перехода от рассеянного накопления микротрещин к моменту зарождения ФКТ. На первой стадии вычисляются вероятности зарождения рядом с любой из имеющихся микротрещин еще одной микротрещины в i -ом участке и во всей совокупности участков, на которые дискретизирован объект.

$$P^k(t) = 1 - \prod_{i=1}^K [1 - P_i^k(t)].$$

меняются подходы упруго-пластической механики усталостного разрушения. Выбрана [2] обобщенная модель упруго-пластической механики развития ФКТ, принимающая для баббита вид

$$dl / dN = 10^{-6} \left[K_1 / \sqrt{1 - (\sigma / 45)^2 0,776} \right]^5, \quad (3)$$

где σ_T^c – предел текучести, а параметр K_1 – коэффициент интенсивности напряжений (КИН) характеризует локальное поле НДС у вершины трещины.

На стадии идентификации параметров модели на основе результатов усталостных испытаний образцов круглоцилиндрического сечения, в котором НДС однородное, используется ряд дополнительных упрощений. Можно не конкретизировать, в каком именно участке возникла ФКТ. Развитие трещин моделируется по детерминированной модели. Поэтому очевидно, что именно первая возникшая ФКТ

перерастет в макротрещину и разрушит образец.

Возникновение и развитие трещин будет влиять на стадию накопления микроповреждений потому, что появление трещины (короткой или макроскопической) означает, что в локальном объеме вокруг нее процессы накопления повреждений происходят более интенсивно. Этот объем должен быть исключен из схемы определения вероятности появления следующей трещины. После ее появления необходимо исключить из рассмотрения некоторое количество СЭ M (определяется

по размерам зоны возмущенного НДС у вершины трещины) и разрушенных СЭ M^* . Потом эти параметры снова монотонно возрастут до появления следующей короткой трещины. Начиная с момента появления первой ФКТ в предлагаемой модели (рис. 1) выполняется две ветви расчета. Одна ветвь – развитие ФКТ. В оставшемся объеме (без трещин) продолжается моделирование накопления рассеянных повреждений и появление новых ФКТ.

Вычисляется вероятность подрастания каждой ФКТ и вероятность подрастания хотя бы одной из них до размеров зародыша макротрещины:

$$P^*(t) = 1 - \prod_{j=1}^{k^k} [1 - P_j^*(t)]$$

$$P_j^*(t) \approx F^{k-l_2}(t-t_j)$$

При достижении заданного уровня вероятности (50%) принимается, что одна из ФКТ достигла размера зародыша макротрещины. Для образцов с однородным НДС место его появления не конкретизируется. Количество ФКТ уменьшается на 1.

Начиная с этого момента времени моделируется (рис. 1) уже 4 процесса: накопление микротрещин, зарождение системы ФКТ, их подрастание до размеров зародыше макротрещины, рост макротрещин.

Описание развития макротрещин в баббите выполнено для образцов с однородным НДС по детерминированной модели – по закону Париса [3-4]. Для развития макротрещин в баббите можно использовать формулу в диапазоне ($1 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}} < \text{КИН} < 2,5 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$)

$$dl/dN \approx 2 \cdot 10^{-5} K_{\text{limax}}^5 \quad (4)$$

Для образца круглоцилиндрической формы зависимость для КИН определена по методу конечных элементов (МКЭ). Нами выполнены такие расчетные исследования с использованием более мелких сеток (рис. 2), чем ранее [4]. Трещина в образце имеет полукруглую форму. Поэтому моделировался бесконечно острый разрез, по форме близкий к полуокружности. Образец разбивался на тетраэдральные конечные элементы (КЭ) с размером стороны 0,1 – 0,2 мм в препроцессоре *FEMAP* [5].

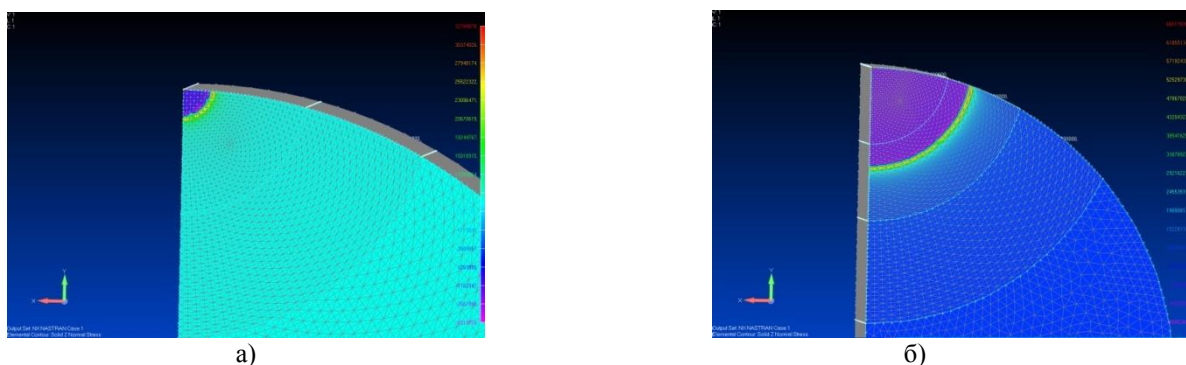


Рис. 2. Конечноэлементные сетки и картины напряжений для трещин 0,2 мм (а) и 2 мм (б) для цилиндрического образца с круглым поперечным сечением диаметром 12 мм

От вершины трещины в двух направлениях (x и z на рис. 3а) снимались значения напряжений (рис. 3б) и строились графики КИН (рис. 3в) с использованием формулы $K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r}$. Результаты расчетов КИН для различных размеров трещины приведены на рис. 3г. Здесь r -

характерный размер (радиус полукруглой трещины). Точки на диаграмме (рис. 3г) аппроксимированы полиномом посредством добавления линии тренда. Эти расчеты выполнены совместно с Казариновой В.К.

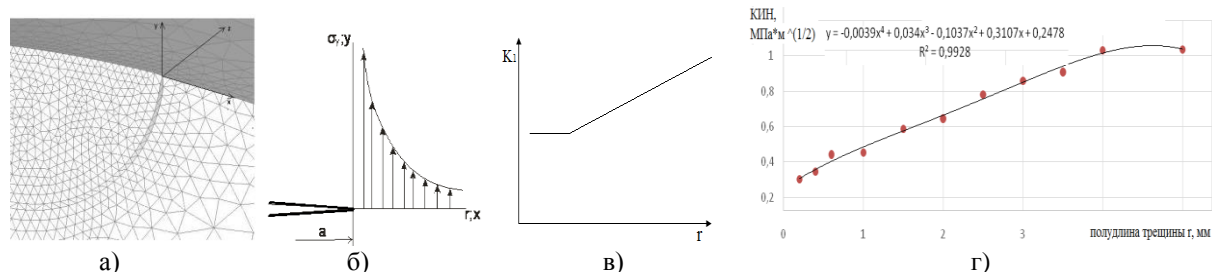


Рис. 3. Конечноэлементная сетка вблизи вершины трещины и дополнительные оси координат (а), график напряжений (б), график КИН (в) вблизи вершины, значения КИН для трещин разного радиуса (г)

В наших статьях [3-4] получены следующие значения параметров разрушения баббита. В статье [4] показано, что характеристики вязкости разрушения образцов из баббита Б83 (при статическом нагружении) $K_c \approx 3,0...3,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. При циклическом нагружении баббитовых образцов разрушение реализуется при $K_g = K_c \approx 3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, переход к стадии упругопластического развития трещины реализуется при $K_{ep} \approx 2,0...2,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. В статье [3] показано, что переход от ФКТ к макротрещине (появление зародыша макротрещины) осуществляется при КИН $K \approx 1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Для области стабильного развития макротрещин ($1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}} < \text{КИН} < 2,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$) принята аппроксимирующее уравнение (4).

Вокруг макротрещины тоже выделяется объем, который исключается из рассмотрения процессов накопления рассеянных повреждений. Наступлением долома образца считается момент достижения макротрещиной длины l_k при которой КИН у вершины трещины принимает критическое значение. Этот параметр назначаем как нижнюю границу перехода к упругопластическому механизму развития трещины $K_{ep} \approx 2,0 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ т. к в случае отсутствия стального слоя этап упругопластического развития трещины происходит очень быстро и его можно не учитывать.

Увеличение длины трещины вычисляется по формуле $l_j = l_{j-1} + \Delta N \times dl/dN$. Критерием остановки вычислительного процесса может быть назначено достижение трещиной некоторой длины (например, – 5 мм).

Описание результатов усталостных испытаний баббитовых образцов и идентификации на их основе параметров модели накопления рассеянных повреждений

В диссертации [6] и в монографии [7] описаны результаты различных экспериментов с образцами из баббита. Анализируем результаты испытаний круглоцилиндрических баббитовых образцов диаметром 12 мм и длиной 60 мм (рис. 4а). Цель этого этапа работы – определение четырех указанных выше параметров многостадийной модели. В диссертации [6] выделены зоны малоциклового (при напряжениях выше 44 МПа) и многоциклового (при напряжениях 22-44 МПа) усталости и получено для многоциклового области уравнение кривой (в логарифмических координатах это прямая 1 на рис. 4а)

$$N\sigma_a^{5,1} = 0,22 \cdot 10^{13} \quad (5)$$

В зоне многоциклового усталости было выделено 5 уровней напряжений (21,7 МПа; 26,1 МПа; 30,4 МПа; 34,5 МПа; 39,0 МПа), на каждом из которых было испытано не менее 10 образцов (рис. 4а). Именно для этих пяти уровней напряжений и выполнялись расчеты долговечности. На рис. 4б показаны полученные по формуле (5) экспериментальные долговечности ($N_1^{\text{exp}}, N_2^{\text{exp}}, N_3^{\text{exp}}, N_4^{\text{exp}}, N_5^{\text{exp}}$) и расчетные долговечности ($N_1^{\text{teor}}, N_2^{\text{teor}}, N_3^{\text{teor}}, N_4^{\text{teor}}, N_5^{\text{teor}}$), полученные по модели (рис. 1)

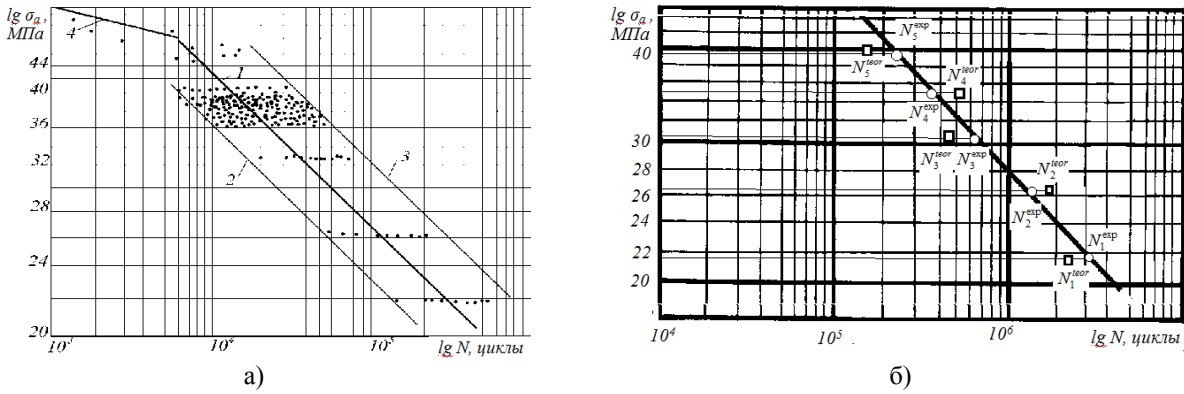


Рис. 4. Результаты усталостных испытаний цилиндрических образцов из баббита (а), схема к формулированию оптимизационной задачи (б)

Для определения расчетных долговечностей по модели (рис. 1) задаются начальные приближения параметров модели: начальная поврежденность, количество структурных элементов в единице объема и параметры степенной зависимости (2). В ходе идентификации должны быть подобраны такие значения искомых параметров, при которых расчетные долговечности наилучшим образом соответствуют экспериментальным. Причем лучшее соответствие должно быть на всех пяти уровнях напряжений. Поэтому применяется принцип метода наименьших квадратов. Рассчитываются отклонения расчетных долговечностей от экспериментальных на каждом уровне напряжений $\Delta_i = N_i^{teor} - N_i^{exp}$.

Эти отклонения нормируются (делятся на экспериментальные значения) $\Delta_i^{norm} = (N_i^{teor} - N_i^{exp}) / N_i^{exp}$, возводятся во вторую степень и суммируются $\Delta_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^5 (\Delta_i^{norm})^2$. Оптимизационная задача отыскания параметров формулируется таким образом – подобрать такие значения искомых параметров, чтобы сумма квадратов отклонений была минимальна

$$\Delta_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^5 (\Delta_i^{norm})^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

Определение констант проведено простейшим методом отыскания экстремума – методом деформированного многогранника. Сущность метода состоит в том, что в пространстве допустимых значений параметров выбирается начальный многогранник. И начинается процесс изменения координат его узлов. Вместо одного узла с самым далеким от оптимума значением функции цели вводится новый узел. В итоге координаты оптимума локализуется до достижения заданной точности. Этот метод был программно реализован и найдено оптимальное решение. Получено, что при $A = 2,33 \cdot 10^{-12}$ и $n = 5.2$, начальной поврежденности, приблизительно равной нулю и количестве СЭ в единице объема, равном 4768, сумма квадратов отклонения от экспериментальных значений по формуле (6) дает приемлимую погрешность. Ход поиска этого оптимума (для двух параметров A и n) продемонстрирован на рис. 5. Т. о. для литого баббита Б83 определена функция скорости накопления микроповреждений

$$\dot{II} = A \sigma_a^n = 2,33 \cdot 10^{-12} \sigma_a^{5,2} \quad (7).$$

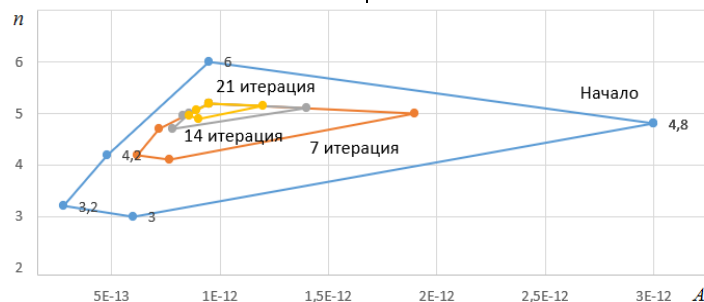


Рис. 5. График сходимости процесса идентификации для двух параметров A и n

Моделирование долговечности баббитового слоя подшипника скольжения

Сложность условий работы и разрушения АФС является основной причиной того, что в настоящее время не завершено построение теории влияния вида НДС на долговечность подшипников скольжения (ПС). В работах различных исследователей в качестве критерия используют различные компоненты поля НДС [10]. В наших статьях [8-10] подробно разбирается это влияние и показано, что на этапе развития трещин можно использовать критерий первого главного напряжения σ_1 . В том числе важно учитывать расклинивающее действие смазочного материала, попадающего в трещину под высоким давлением

σ_r . Кроме того, следует учитывать релаксацию постоянных компонент напряжений [11]. Так, нами использован [10] критерий $\sigma_1 = \sigma_\varphi$, но с учетом расклинивающего действия масла, попадающего в трещину под давлением (рис. 6а). В итоге в качестве эквивалентного напряжения на стадии развития трещины в ПС использован критерий $\sigma_s = \sigma_\varphi / 2 + |\sigma_r|$. Экспериментальная оценка применимости различных критериев эквивалентности напряженных [10] показала, что этот критерий дает меньшее рассеивание результатов экспериментов (рис. 6б).

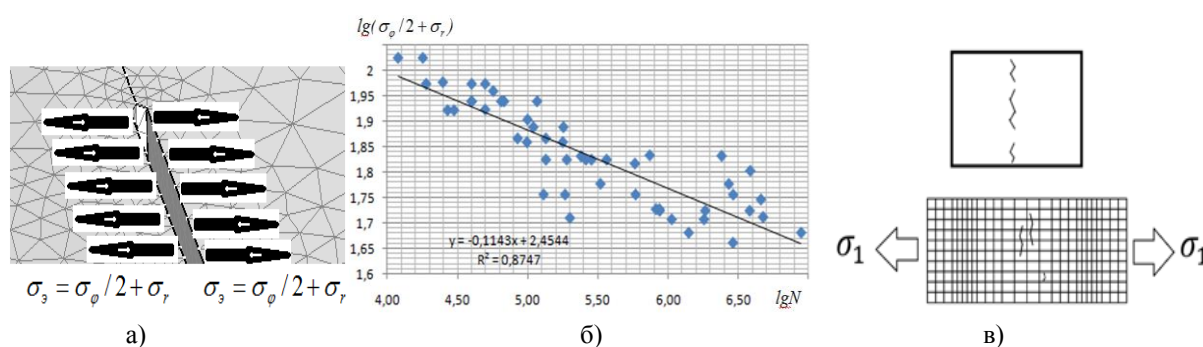


Рис. 6. Схема формирования напряжений, действующих на берега трещины (а), к оценке точности критерия эквивалентности $\sigma_s = \sigma_\varphi / 2 + |\sigma_r|$ (б), схема к моделированию слияния трещин (в)

Важное значение имеет моделирование слияния трещин (рис. 6в). Были приняты следующие допущения. Трещины, возникшие на одном участке, сливаются в единую трещину при достижении их общей длины равной размеру участка в направлении перпендикулярном первым главным напряжениям. Трещины, возникшие на разных участках, сливаются в том случае, если линии их развития лежат в

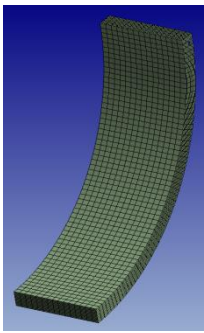
одном ряду, перпендикулярном первым главным напряжениям и координаты их вершин становятся близкими (равными).

Остановка расчета может выполняться при любой назначенной длине трещины. Но в тестовом примере останавливали расчет при достижении длины трещины 5 мм. При проведении экспериментов был выбран именно этот критерий прекращения испытаний.

Программа расчета долговечности антифрикционного слоя подшипника

На базе программной платформы .NET Framework 4.6.1 на языке C# было разработано Windows-приложение, реализующее расчет долговечности баббитового слоя ПС. В качестве исходных данных ис-

пользуются Excel-файлы с информацией о геометрии баббитового слоя подшипников – образцов (П-О), разбитого на участки (рис. 7а) и табличные данные о напряжениях в участках (рис. 7б).



а)

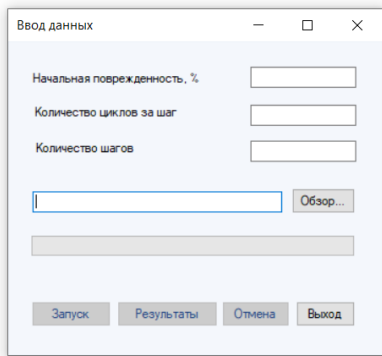
Node Number	X Location (mm)	Y Location (mm)	Z Location (mm)	r Location (mm)	φ Location (°)	Normal X Stress (MPa)	Normal Y Stress (MPa)	Normal Z Stress (MPa)	Von-Mises Stress (MPa)	Max Principal Stress (MPa)	Equivalent Stress (MPa)	Radial Stress (MPa)	Hoopstress (MPa)	Axial Stress (MPa)
171203	25.000	0.000	-12.500	25.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
171204	24.991	0.054	-12.500	25.000	1.500	0.000	-0.004	0.001	0.006	0.001	0.005	0.000	-0.004	0.001
171205	24.966	1.308	-12.500	25.000	3.000	0.000	-0.004	0.005	0.008	0.001	0.004	0.000	-0.004	0.001
171206	24.923	1.962	-12.500	25.000	4.500	0.000	0.004	0.001	0.004	0.004	0.004	0.000	0.004	0.001
171207	24.863	2.613	-12.500	25.000	6.000	0.000	0.012	0.001	0.011	0.012	0.011	0.000	0.012	0.001
171208	24.786	3.263	-12.500	25.000	7.500	0.000	0.015	0.001	0.016	0.016	0.016	0.000	0.016	0.001
171209	24.692	3.911	-12.500	25.000	9.000	0.000	0.015	0.001	0.015	0.016	0.015	0.000	0.015	0.001
171210	24.581	4.556	-12.500	25.000	10.500	0.000	0.010	0.001	0.011	0.011	0.011	0.000	0.011	0.001
171211	24.454	5.198	-12.500	25.000	12.000	0.000	0.002	0.001	0.003	0.003	0.003	0.000	0.003	0.001
171212	24.309	5.836	-12.500	25.000	13.500	-0.001	-0.010	0.001	0.012	0.009	0.009	0.000	-0.011	0.001
171213	24.148	6.471	-12.500	25.000	15.000	-0.002	-0.026	0.001	0.028	0.001	0.022	0.000	-0.028	0.001
171214	23.970	7.100	-12.500	25.000	16.500	-0.004	-0.044	0.001	0.048	0.001	0.038	0.000	-0.048	0.001
171215	23.776	7.725	-12.500	25.000	18.000	-0.007	-0.065	0.001	0.072	0.001	0.057	0.000	-0.072	0.001
171216	23.566	8.345	-12.500	25.000	19.500	-0.011	-0.088	0.001	0.100	0.001	0.078	0.000	-0.099	0.001
171217	23.340	8.959	-12.500	25.000	21.000	-0.016	-0.112	0.001	0.125	0.001	0.101	0.000	-0.128	0.001
171218	23.097	9.567	-12.500	25.000	22.500	-0.023	-0.133	0.001	0.157	0.001	0.122	0.000	-0.156	0.001
171219	22.839	10.168	-12.500	25.000	23.999	-0.029	-0.148	0.001	0.178	0.001	0.139	0.000	-0.177	0.001
171220	22.565	10.763	-12.500	25.000	25.500	-0.033	-0.148	0.001	0.181	0.001	0.142	0.000	-0.181	0.001
171221	22.271	11.350	-12.500	25.000	27.001	-0.031	-0.121	0.000	0.153	0.001	0.119	-0.001	-0.152	0.000
171222	21.970	11.929	-12.500	25.000	28.501	-0.016	-0.053	-0.002	0.070	0.001	0.055	-0.001	-0.067	-0.002
171223	21.651	12.500	-12.500	25.000	30.000	0.025	0.073	-0.005	0.108	0.103	0.107	-0.002	0.100	-0.005
171224	21.318	13.062	-12.500	25.000	31.499	0.095	0.275	-0.011	0.382	0.375	0.381	-0.001	0.374	-0.011
171225	20.967	13.611	-12.500	25.000	33.000	0.230	0.524	-0.029	0.788	0.784	0.787	-0.012	0.767	-0.029
171226	20.603	14.160	-12.500	25.000	34.500	0.331	0.911	-0.054	1.302	1.264	1.294	-0.018	1.261	-0.054

б)

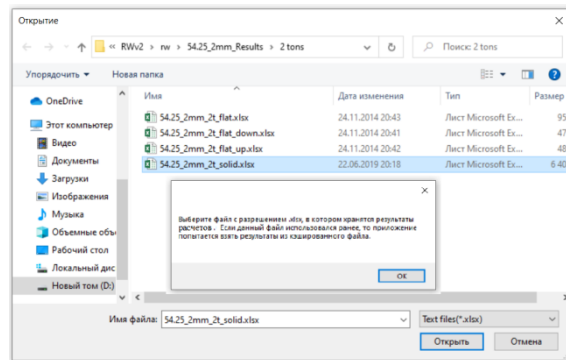
Рис. 7. Антифрикционный слой, дискретизированный на участки (а), фрагмент Excel таблицы с напряжениями в участках слоя (б)

Некоторые интерфейсные формы программы приведены на рис. 8-9. На рис. 8а изображено интерфейсное окно, с помощью которого пользователь может задать необходимые данные для расчета, а именно: начальная поврежденность участка в процентах; количество циклов нагружения за шаг расчета; предельное количество шагов расчета; имя файл с данными о напряжениях в исследуемой модели в формате *.xlsx*. Для того, чтобы выбрать нужный файл, следует нажать на кнопку «Обзор...». Появится предварительное окно, уведомляющее о формате файла, с ко-

торым работает приложение (вставка на рис. 8б). Ввиду того факта, что данные в файле *.xlsx* не упорядочены, на его чтение может потребоваться довольно много времени. По завершении чтения, приложение записывает упорядоченные данные в формате *.json*. Далее при выборе однажды загруженного файла *.xlsx* будет использован файл *.json*, что значительно ускорит повторный расчет. Подтвердив прочитанное, в окне «Открытие» выбираем файл, в названии которого присутствует «*solid*» (рис. 8б). Именно в этих файлах присутствует информация о полной модели.

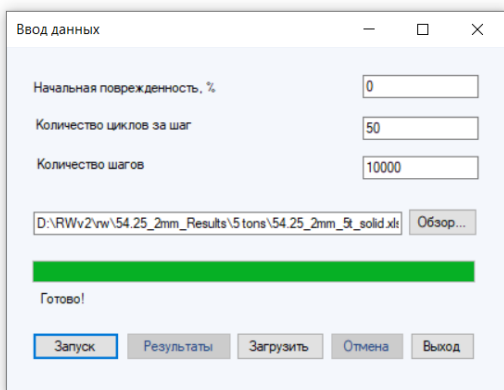


а)

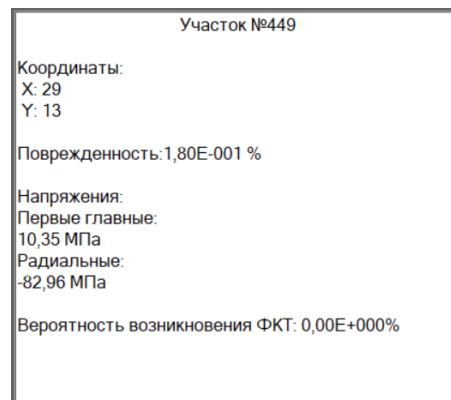


б)

Рис. 8. Окно ввода данных (а) и выбора файла с напряжениями



а)



б)

Рис. 9. Заполненное окно с данными для расчета (а) и информация о выбранном участке (б)

Введя все данные и дождавшись загрузки файла (рис. 8б), можно приступить к расчету, нажав на кнопку «Запуск». По завершении расчета, станет доступна кнопка «Результаты». После ее нажатия появится окно с итогами вычислений. В окне «Результаты» можно выбрать: текстовый отчет об общей информации; информация по выбранному участку; информация по выбранной трещине; развертка баббитового слоя ПС с изображенной с помощью цветовой гаммы поврежденностью каждого участка. В первом слева окне выводится отчет о том, когда возникла трещина, какие трещины слились в одну, когда расчет прекращен. Нажав на ин-

тересующий нас участок можно получить данные по нему во втором окне (рис. 9б). Чтобы посмотреть трещины, следует указать в четвертом слева окне «Все трещины». Это приведет к тому, то все участки, пораженные трещинами, окрасятся в черный цвет. Также можно выбрать отдельную трещину и увидеть, на каких участках она располагается. Полученный результат можно сохранить с помощью кнопки «Сохранить результаты». При перезапуске приложения в окне «Ввод данных» есть кнопка «Загрузить», посредством которой загружаются результаты прошлых расчетов.

Описание тестового объекта исследования и результатов тестирования

В качестве тестовой задачи была рассчитана усталостная долговечность П-О, испытанных ранее в лаборатории ДПМ БГТУ [12-13]. Выполнены усталостные испытания полукольцевых П-О, прижимаемых циклически изменяемой (пульсирующей) нагрузкой к вращающемуся валу. Образец, вал и его опоры погружены в масляную ванну с регулируемой температурой. Были проведены испытания [12-13] нескольких типоразмеров П-О для исследования влияния различных факторов на долговечность АФС.

Были выполнены расчеты трехмерного НДС П-О [14] в программном комплексе *Femap-Nastran*. Использованы трехмерные гексагональные КЭ, пример конечно-элементной сетки показан на рис. 10а,б. 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).

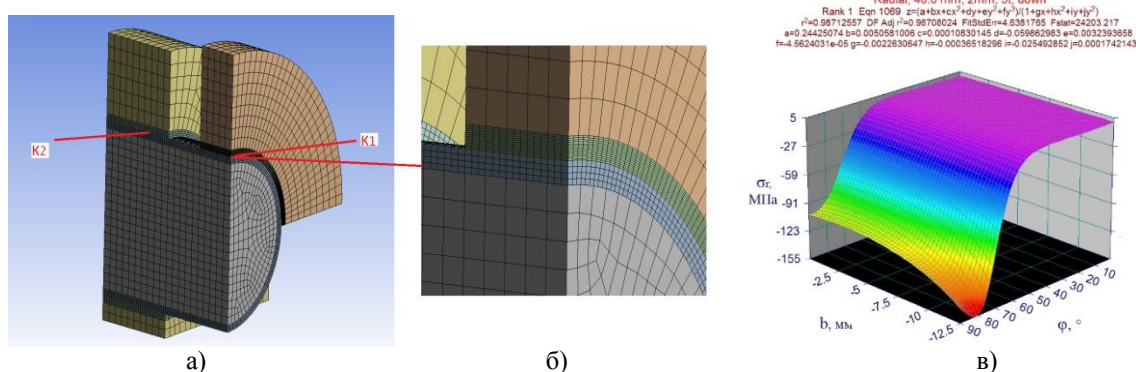


Рис. 10. Конечно-элементная схема модели (а), задание измельчения сетки в зоне контакта (б), радиальные напряжения в баббитовом слое толщиной 2 мм при R4 = 40 мм (в)

Выполнены 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 [8].

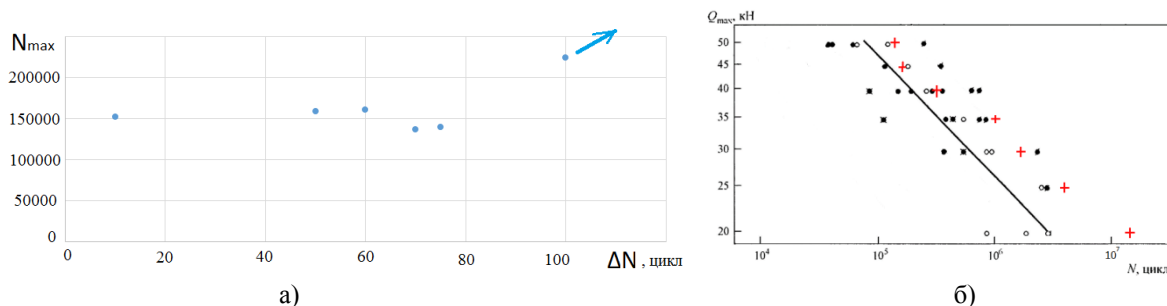


Рис. 11. Влияние величины шага (временного интервала) на расчетную долговечность (а), сопоставление экспериментальных и расчетных долговечностей с толщиной баббитового слоя 2 мм (б)

Выполнялись расчеты долговечности одного из образцов при нескольких уровнях нагрузки. Но прежде выполнен выбор необходимого шага (рис. 11а). Показано, если брать шаги менее 85 циклов нагружения, то расчетная долговечность будет практически одинаковой. На рис. 11б представлены экспериментальные данные

(кривая усталости, аппроксимирующая черные точки) и расчетные точки (красные кресты) долговечности П-О. На рис. 12 приведены примеры визуализации повреждений. На рис. 12а цветом отображен разный уровень рассеянных микротрещин, а на рис. 12б – появившаяся в их поле макротрещина.

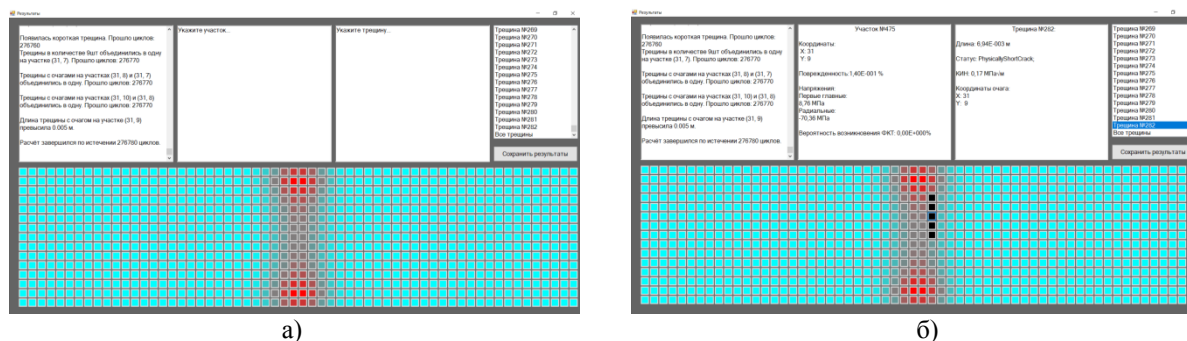


Рис. 12. Картины поврежденных поверхностей баббитового слоя: рассеянные микротрещины (а), с макротрещиной (б)

Заключение

Для многостадийной модели накопления усталостных повреждений идентифицированы параметры применительно к баббиту на основе олова. Построен и программно реализован алгоритм расчета усталостных повреждений в баббитовом

слое подшипников. В качестве тестового примера выполнена серия расчетов долговечности испытанных ранее подшипников – образцов и подтверждена работоспособность модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зернин, М.В.** Дискретное моделирование повреждений подшипников скольжения с учетом комплекса воздействий и критериев отказа. Сообщение 1. Общая схема расчета долговечности / М.В. Зернин // Трение и износ. - 1996. - Т. 17. - № 6. - С. 747-755.
2. **Зернин, М.В.** Модели развития физически коротких и макроскопических трещин и применение их для баббита на основе олова / М.В.Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. - № 5 (58). - С. 4 - 14.
3. **Зернин, М.В.** Статистический принцип определения границы перерастания коротких трещин в макротрещины и реализация его для баббита на основе олова / М.В.Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. - №7 (60). - С. 86-94.
4. **Зернин, М.В.** Трещиностойкость баббита Б83 / М.В.Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. - №1 (54). - С. 91- 101.

5. **Рудаков, К.Н.** UGS Femap 9.3 Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций / К.Н.Рудаков. М. : ДМК Пресс. – 296с.
6. **Зернин М.В.** Усталостная долговечность цилиндрических баббитовых подшипников скольжения: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Зернин Михаил Викторович. – Брянск, 1989.- 249с.
7. **Морозов, Е.М.** Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – 3-е изд. – М. : Либроком, 2017. – 544 с.
8. **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.
9. **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.
10. **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. - № 5(78). - С.4-14.
11. **Зернин, М.В.** Контактная ползучесть баббитового слоя подшипников скольжения/ М.В.Зернин, А.Г. Кузьменко, А.В.Яковлев // Завод. лаб. - 2008. - Т. 74. - № 5. - С. 58-62.
12. **Кузьменко, А.Г.** Методика оценки сопротивления усталости антифрикционных материалов для подшипников скольжения/ А.Г. Кузьменко, А.В. Яковлев, М.В.Зернин // Завод. лаб. - 1984. – № 8. – С. 77-79.
13. **Зернин, М.В.** К исследованию усталостной долговечности баббитового слоя тяжело нагруженных подшипников скольжения/ М.В. Зернин, А.В. Яковлев // Завод. лаб. - 1997. - № 11. – С. 39-47.
14. **Зернин, М.В.** Напряженное состояние в антифрикционном слое подшипника скольжения при наличии трещин / М.В.Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. - № 2 (55).- С. 93-103.
1. **Zernin, M.V.** Discrete modeling of slider bearing failures taking into account impact complex and failure criteria. Report 1. General procedure of life computation / M.V. Zernin // *Friction and Wear*. – 1996. – Vol. 17. – No.6. – pp. 747-755.
2. **Zernin, M.V.** Models of development of physically short and macroscopic cracks and their use on tin basis / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2019. – No.5(58). – pp. 4-14.
3. **Zernin, M.V.** Statistical principle for limits definition of short crack growing into macro-cracks and its realization for tin-based babbitt / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.7(60). – pp. 86-94.
4. **Zernin, M.V.** Crack resistance of babbitt B83 / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State technical University*. – 2017. – No.1(54). – pp. 91-101.
5. **Rudakov, K.N.** UGS Femap 9.3 Geometrical and Finite-element Design Modeling / K.N. Rudakov. M.: DMK Press. – pp. 296.
6. **Zernin, M.V.** Fatigue Life of Cylindrical Babbitt Slider Bearings: thesis for Can. Sc. Tech. degree completion / Michael Victorovich Zernin. – Bryansk, 1989. – pp. 249.
7. **Morozov, E.M.** Contact Problems of Fracture Mechanics / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – 3-d Edition. – M.: Librokom, 2017. pp. 544.
8. **Zernin, M.V.** Equivalence criteria of stressed states and generalized diagram of tin-based babbitt deformation / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State technical University*. – 2014. – No.3. – pp. 26-34.
9. **Zernin, M.V.** Experimental and calculation researches of impact of stressed-deformed state upon fatigue life of slider bearing babbitt layers / M.V. Zernin// *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. No.2(63). – pp. 71-81.
10. **Zernin, M.V.** Applicability analysis of stressed state equivalence criteria for description of babbitt layer fatigue fracture in slider bearings / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2019. – No.5(78). – pp. 4-14.
11. **Zernin, M.V.** Contact creeping of slider bearing babbitt layer/ M.V. Zernin, A.G. Kuzmenko, A.V. Yakovleva // *Factory Laboratory*. – 2008. – Vol.74. – No.5 – pp. 58-62.
12. **Kuzmenko, A.G.** Procedure for fatigue resistance assessment of anti-friction materials for slider bearings/ A.G. Kuzmenko, A.V. Yakovlev, M.V. Zernin // *Factory Laboratory*. – 1984. – No.8. – pp. 77-79.
13. **Zernin, M.V.** To researches of babbitt layer fatigue life in heavily loaded slider bearings/ M.V. Zernin, A.V. Yakovlev // *Factory Laboratory*. – 1997. – No.11. – pp. 39-47.
14. **Zernin, M.V.** Stressed-state in anti-friction layer of slider bearing at cracks presence / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.2(55). – pp. 93-103.

Ссылка цитирования:

Зернин М.В. Реализация многостадийной модели усталостных повреждений баббита и антифрикционных слоев из него / М.В. Зернин, Н.Н. Рыбкин, И.А. Емельянов, А.В. Матюхин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. - № 3. – С. 4 - 15. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-4-15.

Статья поступила в редакцию 13.11.20.

*Рецензент: д.т.н., профессор, зав лабораторией Института
материаловедения Хабаровского научного центра
Дальневосточного отделения РАН*

Химухин С.Н.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 24.02.21.

Сведения об авторах:

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

Рыбкин Николай Николаевич, аспирант кафедры «Механика и ДПМ» Брянского государственного технического университета, e-mail: rnikolai@mks.ru.

Zernin Michael Victorovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Mechanics & DPM", Bryansk State Technical University, e-mail: zerninmv@mail.ru.

Rybkin Nikolay Nikolaevich, Post graduate student of the Dep. "Mechanics & DPM", Bryansk State Technical University, e-mail: rnikolai@mks.ru.

Емельянов Иван Андреевич, магистрант кафедры «Механика и ДПМ» Брянского государственного технического университета, e-mail: ivanemelyanov@mail.ru.

Матюхин Алексей Владимирович, магистрант кафедры «Механика и ДПМ» Брянского государственного технического университета, e-mail: alexmtkhn@yandex.ru.

Yemeliyanov Ivan Andreevich, Master degree student of the Dep. "Mechanics & DPM", Bryansk State Technical University, e-mail: ivanemelyanov@mail.ru.

Matyukhin Alexey Vladimirovich, Master degree student of the Dep. "Mechanics & DPM", Bryansk State Technical University, e-mail: alexmtkhn@yandex.ru.