

## ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.178.16: 620.178.3: 620.191.33: 621.822: 621.891

М.В.Зернин, Е.В.Мефед, А.Г.Яшутин, А.В.Гришанов

### **РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СИСТЕМЕ КРИТЕРИЕВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ**

Изложены первые результаты реализации разрабатываемой на кафедре «Динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета методики расчетного определения долговечности подшипников скольжения по системе критериев повреждения поверхностей от циклических объемных напряжений и различных видов изнашивания. Продемонстрирована приемлемая точность расчетов на примере испытанных образцов подшипников скольжения.

Ключевые слова: подшипник скольжения, объемные циклические напряжения, различные виды изнашивания, критерии повреждения, расчет долговечности.

Подшипники скольжения (ПС) являются одними из типичных узлов трения, которые подвержены комплексу воздействий и повреждений. В ПС практически всегда давления и другие компоненты тензора напряжений распределены неравномерно, могут реализоваться одновременно различные режимы трения на разных участках поверхности: жидкостный, граничный и даже сухой. Соответственно могут проявляться повреждения различных типов. Причем эти повреждения могут протекать по отдельности на различных участках поверхностей, но чаще в некоторых зонах одновременно протекают процессы повреждения различных типов, влияющие друг на друга. На основании собственного опыта и классификаторов, используемых различными фирмами, нами предложена систематизация повреждений элементов ПС [1; 2]. При этом основой систематизации являются механизмы процессов повреждения.

В подшипниках жидкостного трения возможными являются повреждения от перегрева, механической (объемной) усталости, изменений давлений на небольших участках поверхности (на уровне микроструктуры), химического воздействия смазочных веществ (коррозия и смолообразование). В масле часто присутствуют пропускаемые фильтрами твердые частицы, которые могут оказывать абразивное или эрозионное воздействие. В подшипниках сухого трения могут проявляться контактные повреждения по любому известному механизму изнашивания в зависимости от условий контактирования и свойств материалов пары трения. В подшипниках смешанного режима трения на разных участках поверхности могут проявляться повреждения, характерные для ПС двух названных типов трения.

Отметим, что среди механизмов изнашивания немаловажное место занимают такие виды, которые объясняются усталостными процессами в материале: усталостный износ, износ отслаиванием, ротационный и другие. Возможно проявление взаимного влияния объемной усталости и изнашивания из-за ускоренного накопления усталостных повреждений в приповерхностных слоях или из-за удаления наиболее повреждаемых от усталости поверхностных слоев. На рис.1 показаны характерные стадии усталостных повреждений участка антифрикционного материала ПС.

Ранее была предложена достаточно общая методика расчетно-экспериментальной оценки долговечности ПС с учетом усталостных и износоконтактных повреждений и взаимовлияния всех повреждающих факторов [1; 2]. В настоящее время основные элементы этой методики реализованы (в первом приближении) и подтверждена принципиальная их

работоспособность. Разрабатывается проект программного комплекса, реализующего всю предложенную общую методику и допускающего дополнительное расширение функциональных возможностей, а также применение различных моделей отдельных повреждающих процессов. Последующие пояснения опираются на схематическое представление вычислительного процесса (рис. 2).

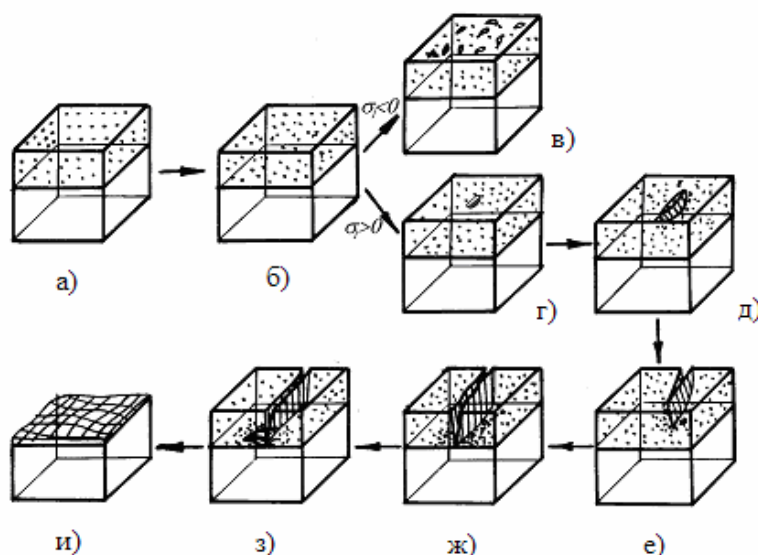


Рис. 1. Стадии усталостных повреждений участка антифрикционного слоя подшипника скольжения: а - начальное состояние с некоторой концентрацией микротрещин; б - накопление рассеянных микротрещин; в - микровыкрашивание (если в поле макронапряжений нет растягивающих компонентов); г - появление и развитие короткой трещины до размера зародыша макротрещины; д - развитие поверхностной макротрещины в стороны и вглубь до стыка с подложкой; е - развитие макротрещины в стороны; ж - ускоренное накопление повреждений у вершины трещины в месте стыка анти-фрикционного материала и подложки; з - зарождение и развитие макротрещин вдоль стыка; и - выкрашивание фрагментов антифрикционного слоя

сов. После запуска вычисления выполняются в цикле по времени.

На шаге 1 определяются параметры воздействий на детали подшипникового узла с применением различных аналитических, численных или экспериментальных методов. Такие методики и модели систематизированы в соответствующей базе. Наиболее перспективным полагаем применение современных численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ). Достигнуты существенные успехи в реализации решений задач гидродинамики ПС и задач о контактировании без смазочного материала, но с учетом нелинейных свойств поверхностных слоев [2; 4].

На шаге 2 выполняется ряд подготовительных операций. Определяется возможность появления тех или иных видов износоконтактных или усталостных повреждений с применением какого-либо критерия из соответствующей библиотеки. Кроме того, определяются критерии предельного износа для каждого из моделируемых видов износа при данных условиях нагружения. Перечислим некоторые из наиболее часто встречающихся критериев износа, проиллюстрированные на поверхности, дискретизированной на участки согласно рис. 3: достижение предельной глубины износа хотя бы на одном участке (1) поверхности контакта (варианты: любой точки; точки, лежащей в определенной части поверхности контакта; точки, лежащей на определенной линии; конкретной точки поверхности контакта); достижение предельного износа на некоторой доле ( $k$  участков из  $K = K_1 \times K_2$  их общего количества) поверхности (варианты: произвольно расположенных участков (2) (или заданный процент изношенной площади); соседних участков (3), составляющих

различных возможностей, а также применение различных моделей отдельных повреждающих процессов. Последующие пояснения опираются на схематическое представление вычислительного процесса (рис. 2).

Методика основана на пространственной и временной дискретизации процессов накопления повреждений различного вида. Для отдельных дискретных участков возможно применение разных моделей накопления повреждений, описывающих различные виды изнашивания и усталость материала. Модели и свойства материалов сгруппированы в соответствующие базы-библиотеки, и пользователю предоставляется право выбора вариантов реализации отдельных шагов вычислительного процесса в соответствии с различными моделями реальных физических процес-

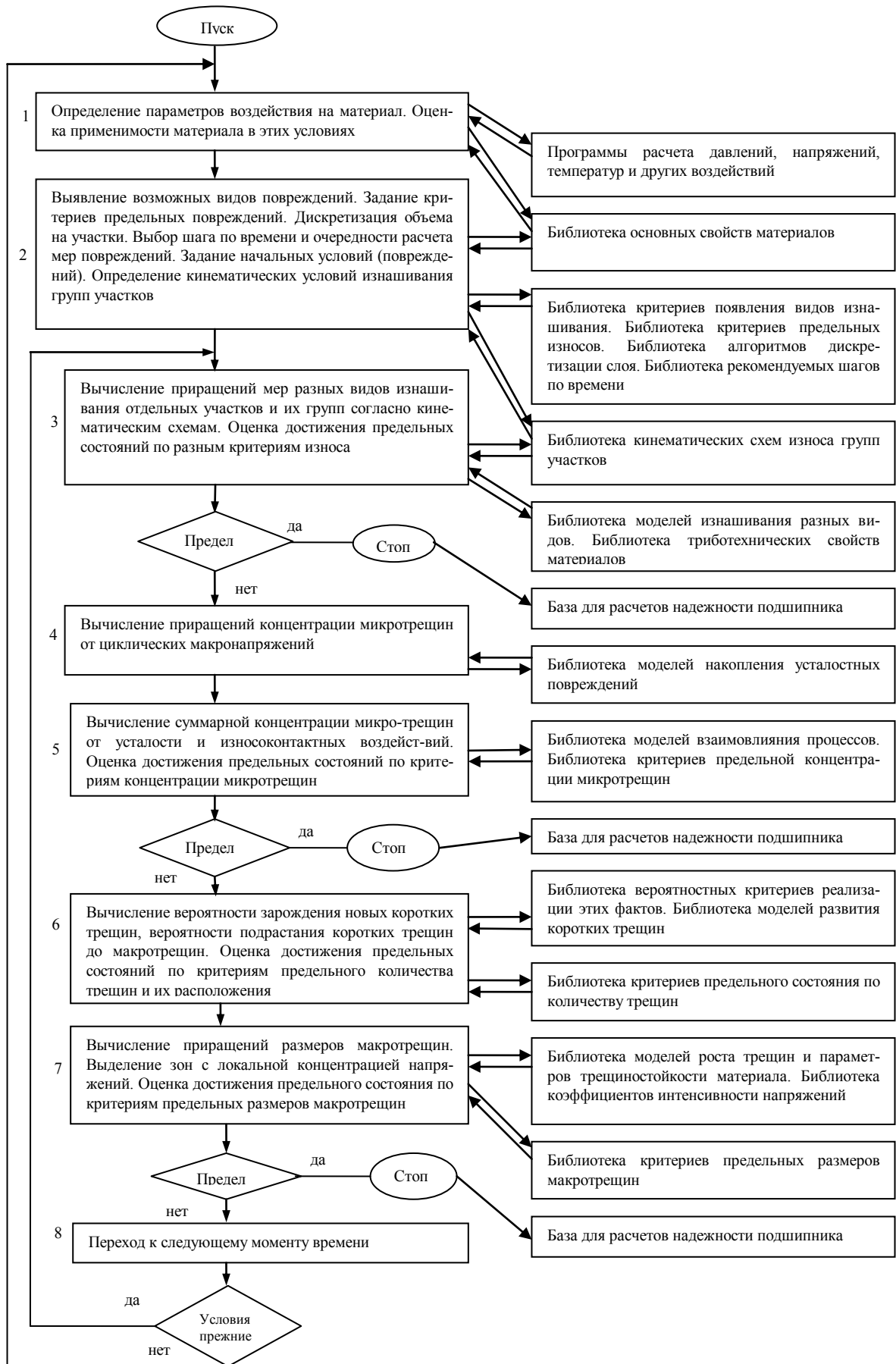


Рис. 2. Схема расчета долговечности ПС по системе критериев износа и усталости

площадку определенной величины - по площади или длине; те же самые критерии, но в конкретных частях повреждаемой поверхности (4 и 5); появление царапины определенной длины (6) в произвольной или конкретной зоне поверхности; перечисленные критерии износа, но не по показателю линейного изнашивания, а по показателю поверхностной поврежденности (например, питтинговых микроповреждений); достижение предельного линейного износа всей поверхности в целом или заданное сближение за счет изнашивания двух контактирующих деталей как жесткого целого; достижение заданного уровня весового износа.

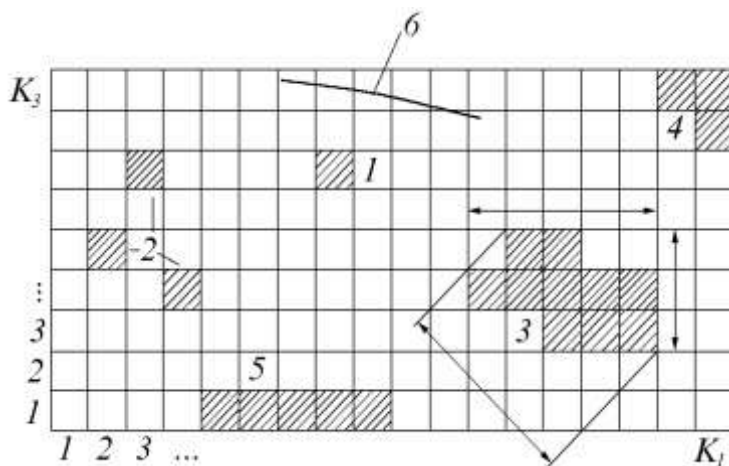


Рис. 3. Дискретизированная повреждаемая поверхность с заштрихованными участками, на которых достигнут предельный уровень износа

Критериями усталостного повреждения могут быть предельная поврежденность какой-то площадки на поверхности (площадка может быть привязана к определенной зоне поверхности, или же заданы только предельные значения размеров повреждения без указания его конкретного места), наличие предельной концентрации трещин на какой-то площадке, наличие макротрещины предельной длины, наличие предельного числа макротрещин длиной не менее какого-то заданного значения и т.п.

Выполняется дискретизация рассчитываемой детали на участки и выбирается шаг по времени, причем для различных процессов повреждения материала в разных условиях можно выбирать различные шаги дискретизации временной оси. Возможен вариант изменения режимов нагружения отдельных участков материала без смены режима нагружения всей детали в целом. Это может происходить в результате накопления повреждений определенного вида. Так, изнашивание поверхности может приводить к увеличению площади контактирования, изменению давлений и других компонент тензора напряжений или деформаций. При описании таких переходных процессов используются модели со ступенчатым изменением параметров нагружения. Если переходный процесс разбит на достаточно малые временные интервалы, то можно считать условия нагружения постоянными в пределах каждого малого интервала и изменяющимися скачком при переходе от одного интервала к следующему. При такой дискретизации переходных процессов можно применять вместо сложных интегральных моделей более простые модели накопления повреждений со ступенчатой схематизацией изменения режимов нагружения. Если при расчете сменился режим нагружения, то достигнутый к этому моменту уровень накопленных повреждений считается начальным для новых условий нагружения. Если расчет повреждений только начинается, то задается начальный уровень повреждений как некоторые начальные условия задачи и выбирается очередность расчета мер повреждений от разных видов изнашивания. Эта операция необходима для корректного учета взаимовлияния различных механизмов повреждений. В принципе, большинство одновременно протекающих процессов влияют друг на друга. В предлагаемой методике расчета на каждом временном шаге рассматриваются различные виды повреждения как практически независимые процессы. По мере корректного описания этих взаимосвязей возможно дополнение методики расчета полученными новыми моделями. Пока же взаимосвязь и взаимовлияние можно

приблизенно учесть при суммировании приращений независимых повреждений от разных процессов в конце каждого временного шага.

Анализируются схемы соединения участков в соответствии с классификацией кинематических условий изнашивания участков (условий совместности их изнашивания): выполняется более подробная дискретизация поверхностей трения на участки и постулируются взаимосвязи участков с целью вычисления вероятностных характеристик возникновения различных макропроявлений износа.

На шаге 3 выполняются несколько операций по определению приращений износных повреждений. Сначала последовательно вычисляются возможные приращения мер различных видов повреждения отдельных участков. Окончательное значение приращения меры износа определяется с учетом совместного изнашивания групп участков, соединенных в соответствии с выбранной кинематической схемой. Пользователю предлагается выбор модели изнашивания из библиотеки моделей. Среди большого количества моделей, содержащихся в этой библиотеке, мы считаем предпочтительными структурные модели, основанные на описании реальных процессов повреждения. В частности, могут быть использованы основные положения механики контактного разрушения [2].

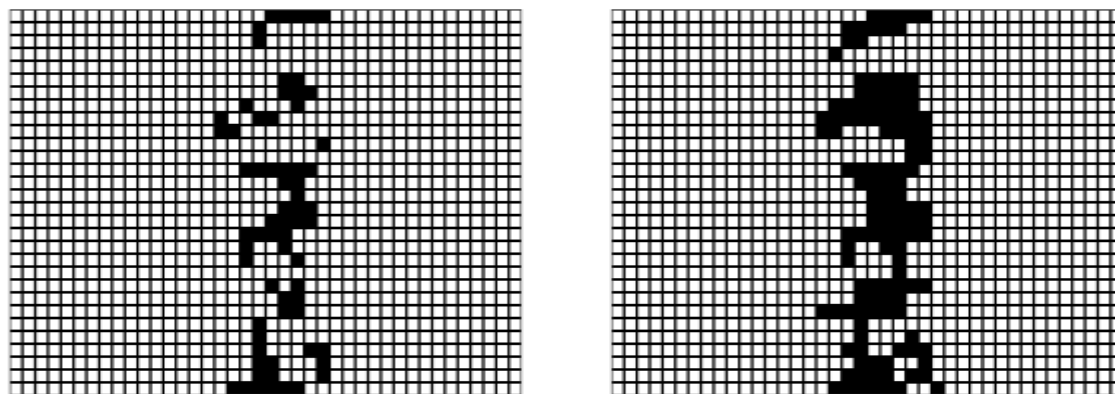
Ранее было показано [2], что очень многие виды изнашивания имеют усталостную природу. Поэтому все износоконтактные виды повреждений можно подразделить на две большие группы. В первую группу включены те виды повреждений, основой которых являются усталостные процессы, и изначальное повреждение можно рассматривать как накопление рассеянных по объему (или только по приповерхностному слою) материала усталостных микроповреждений. Такие повреждения можно суммировать с учетом неоднородности их распределения по объему материала. Наличие этих видов изнашивания повлечет уменьшение общей долговечности детали. Во вторую группу включены все остальные виды износных повреждений. Взаимовлияние их с объемной усталостью более сложное и может приводить как к уменьшению, так и к увеличению общей долговечности детали.

Проанализированы многочисленные известные полуэмпирические и структурные модели процессов изнашивания различного типа. Эти модели систематизированы в соответствующих базах для использования в расчетах (рис. 2). Экспериментально определяемые коэффициенты моделей могут быть выбраны из библиотеки экспериментальных данных об износостойкости материала при конкретных условиях.

Вычисляются приращения мер износа выявленных групп участков с учетом их кинематических связей. Для этого привлекаются соответствующие разделы библиотеки кинематических схем изнашивания и вероятностные критерии износа. После вычисления значений уровней поврежденности участков от каждого вида изнашивания вычисляется суммарный уровень поврежденности от всей совокупности видов изнашивания в соответствии с определенной очередностью их суммирования. Оценивается, не являются ли достигнутые уровни поврежденности предельными. Если такие пределы достигнуты, то можно остановить процесс вычислений и занести результат в соответствующую базу. Статистическая обработка многих подобных результатов позволяет оценить надежность подшипникового узла.

На рис. 4 приведена развертка поверхности ПС с изношенными участками баббита (на рис. 4б состояние при наработке в 10 раз большей, чем на рис. 4а). При этих расчетах использованы результаты выполненных нами ранее [5] испытаний баббита Б83 в режиме граничного трения (рис. 5).

На шаге 4 моделируется процесс накопления рассеянных по объему усталостных повреждений. Возможно применение полуэмпирических моделей накопления усталостных повреждений, оперирующих не с явными физическими критериями протекания процесса,



а) б)  
Рис. 4. Износ ПС при различных значениях наработки

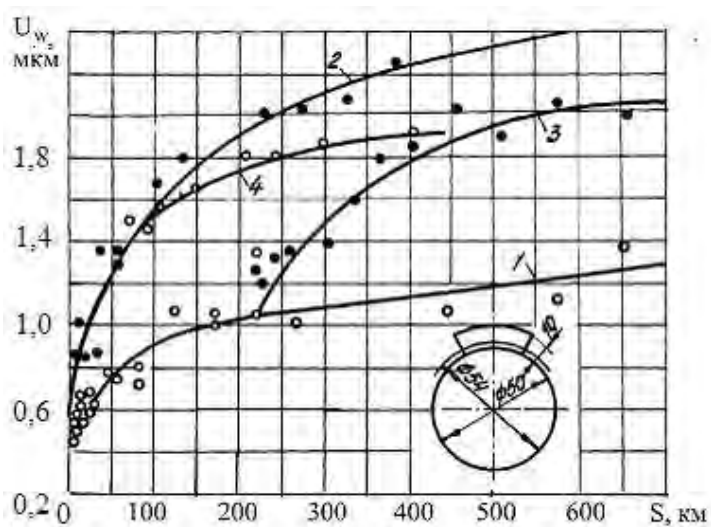


Рис. 5. Результаты измерения износа баббита Б83 при граничном трении в паре с закаленной сталью по схеме «вал – частичный вкладыш»: 1, 2 – при давлениях 2,5 и 5 МПа; 3, 4 – при ступенчатом изменении давления с 2,5 до 5 МПа и с 5 до 2,5 МПа (●-5 МПа; ○- 2,5 МПа)

реализации этого шага построены библиотеки моделей суммирования накопленных усталостных повреждений и моделей суммирования взаимосвязанных усталостных и износо-контактных повреждений. Например, можно учесть удаление из-за изнашивания поверхностных слоев материала, обычно наиболее повреждаемых от усталости. Этот пример наглядно демонстрирует немаловажную роль очередности суммирования повреждений от разных процессов. Нами проанализированы [2] некоторые известные модели комплексного протекания нескольких повреждающих процессов и показаны направления их развития, в том числе и для более корректного включения их в общую схему расчета (рис. 2). На рис. 6 приведены некоторые реализованные в настоящее время варианты. Процессы трещинообразования вблизи поверхности могут завершиться несколькими видами макротрещин (схема I), которые могут развиваться различным образом (схема II). На схеме III изображены два варианта завершения взаимовлияния процессов развития трещины и изнашивания поверхности. Трещина может прорасти вглубь или будет окончательно удалена вследствие изнашивания.

а с некоторой условной величиной, обычно равной нулю в начале процесса и единице в конце его. Но при наложении нескольких повреждающих процессов более логично и наглядно использовать структурные модели с явной мерой повреждения. Одна из таких моделей, развиваемая нами [1-3] как вариант объединенной структурной модели В.В. Болотина [6], принята за основу последующих вычислений. В качестве меры рассеянных повреждений использована скалярная величина – объемная концентрация микротрещин.

На шаге 5 вычисляется суммарный уровень поврежденности от взаимосвязанных или независимых процессов повреждения. Для

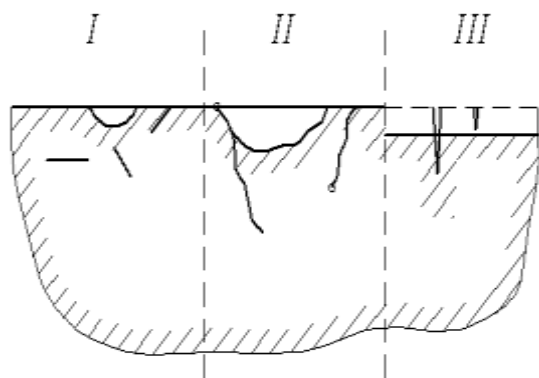


Рис. 6. Варианты взаимовлияния процессов развития трещин и изнашивания поверхности: I – зарождение макротрещин различного типа вблизи поверхности; II – варианты траекторий развития таких макротрещин; III – варианты завершения эффекта взаимовлияния развития трещин и изнашивания поверхности

Некоторые виды повреждений материала (питтинговые, коррозионные, эрозионные или кавитационные) можно количественно характеризовать критическим уровнем накопленных микрповреждений. Можно ввести в библиотеку критериев предельных износов понятие критического уровня микрповреждений, предшествующего выкрашиванию фрагмента определенного вида и размера или какому-то другому критериальному завершению этих процессов. Кроме того, для этих видов повреждений в качестве критерия работоспособности детали часто используют отношение площади поверхности, на которой достигнут критический уровень, ко всей площади рабочей поверхности детали. В предложенной методике расчета (рис. 2) вычисление критерия относительной

поверхностной микрповрежденности деталей легко реализуется на каждом временном шаге. В качестве примера на рис. 7 показаны различные стадии эрозионного повреждения поверхности подшипника частицами, находящимися в слое масла, при однородном воздействии на всю рассматриваемую часть поверхности.

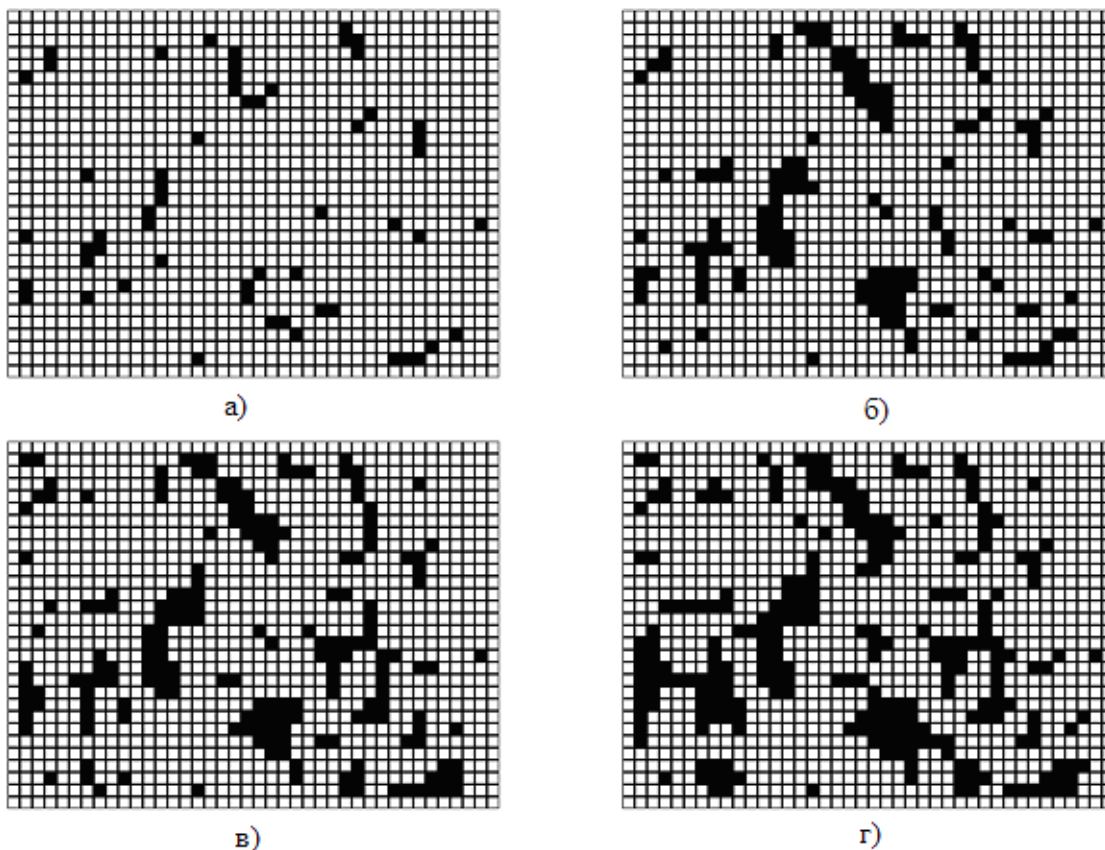


Рис. 7. Процесс эрозионного повреждения поверхности: а – 5% повреждения; б – 10% повреждения; в – 15% повреждения; г – 20% повреждения

На шаге 6 моделируется зарождение коротких трещин и подрастание их до размеров макротрещин. Здесь также возможны разные варианты моделей. Нами предложено [1-3] двухстадийное описание перехода от объемного накопления микротрещин к зародышу макротрещины. Такая модель является вариантом описания реального процесса развития коротких трещин, проанализированного ранее [2].

На первой стадии вычисляются вероятности зарождения рядом с любой из имеющихся микротрещин еще одной микротрещины. Подразумевается, что каждая микротрещина имеет размер характерного элемента структуры материала, а две такие микротрещины составляют одну короткую трещину вдвое большего размера. Когда вероятность образования такой короткой трещины из двух микротрещин достигает заданного уровня (обычно 50%), то считается состоявшимся факт ее появления. Реализованы элементы случайного поиска при назначении номера того участка, где появилась короткая трещина. Около короткой трещины выделяется зона, в пределах которой локализуется концентрация напряжений. Объем этой зоны в дальнейшем исключается из зависимостей для моделирования накопления рассеянных повреждений, что приводит к скачкообразному уменьшению вероятности зарождения следующей короткой трещины. В выделенной зоне применяются закономерности развития коротких трещин.

Вторая стадия зарождения макротрещин моделирует подрастание коротких трещин до размеров зародыша макротрещины. При этом могут быть использованы различные модели развития коротких трещин [8], собранные в соответствующую базу моделей. В том числе могут быть использованы полученные экспериментально статистические закономерности развития коротких трещин [2] и их статистическая схематизация. На каждом шаге вычисляется вероятность подрастания каждой короткой трещины и вероятность подрастания хотя бы одной из них до размеров зародыша макротрещины. При достижении заданного уровня вероятности принимается, что одна из коротких трещин достигла размера зародыша макротрещины. Определяется положение зародыша макротрещины вместо одной из коротких трещин с применением датчика случайных чисел, учитывающего вклад каждой короткой трещины в общую вероятность появления макротрещины. Около макротрещины также очерчивается зона с повышенной концентрацией напряжений, в которой применяются закономерности развития макротрещин. В последующие моменты времени аналогичным образом моделируется зарождение других коротких и макроскопических трещин.

На шаге 7 моделируется развитие макротрещин. Большое число моделей развития макротрещин реализованы в соответствующей библиотеке. На каждом временном интервале вычисляется приращение размеров макротрещин. Могут быть использованы различные критерии определения траектории роста трещины в ширину и глубину. Можно учитывать также влияние процессов изнашивания, а именно уменьшение размеров поверхностной трещины. Для вычисления приращений размеров трещин привлекается информация из библиотеки соответствующих моделей, библиотеки экспериментально полученных параметров трещиностойкости материалов, библиотеки коэффициентов интенсивности напряжений. Возможно применение традиционного МКЭ для расчетов параметров напряженно-деформированного состояния у вершины трещины, а также специально построенных гибридных конечных элементов.

На практике применяются критерии выбраковки подшипников, в основе которых лежит информация о числе и предельной концентрации трещин. В предлагаемой дискретной методике выполняется прямое назначение числа и места расположения трещин. Поэтому указанные критерии выбраковки (остановки вычислительного процесса) реализуются сравнительно просто.



Описанная процедура применялась для расчетной оценки долговечности баббитового слоя подшипников-образцов, методика и результаты испытаний которых приведены в наших работах [2; 7-9]. А именно, испытывались полукольцевые подшипники-образцы при нагружении одной или двумя циклически изменяемыми силами. Образец прижимался к вращающемуся валу, который находился в масляной ванне с регулируемой температурой масла. Для подшипников-образцов достаточно точно определялись давления и напряжения. В таких экспериментах можно выяснить влияние особенностей контактного нагружения при наличии смазки, конструктивных особенностей подшипников и ряда технологических факторов. При нашем участии исследовано [7-9] влияние на долговечность толщины баббитового слоя, изгибной жесткости, температуры масла, различных технологий нанесения баббита на стальную основу и различных типов армирования баббитов металлической сеткой. Для примера на рис. 8 приведены кривые усталости для трех серий испытаний. В первой серии (рис. 8а) оценивалось влияние на долговечность толщины слоя баббита, во второй серии (рис. 8б) – влияние изгибной жесткости стальной основы подшипника-образца. В третьей серии (рис. 8в) оценивалось влияние вида напряженного состояния, которое варьировалось путем приложения не только вертикальной нагрузки, но и разделенной на две силы, удаленные от вертикали на определенный угол.

На этих рисунках отмечены точками расчетные значения долговечности по критерию зарождения первых макротрещин. Видно, что экспериментальные и расчетные ре-

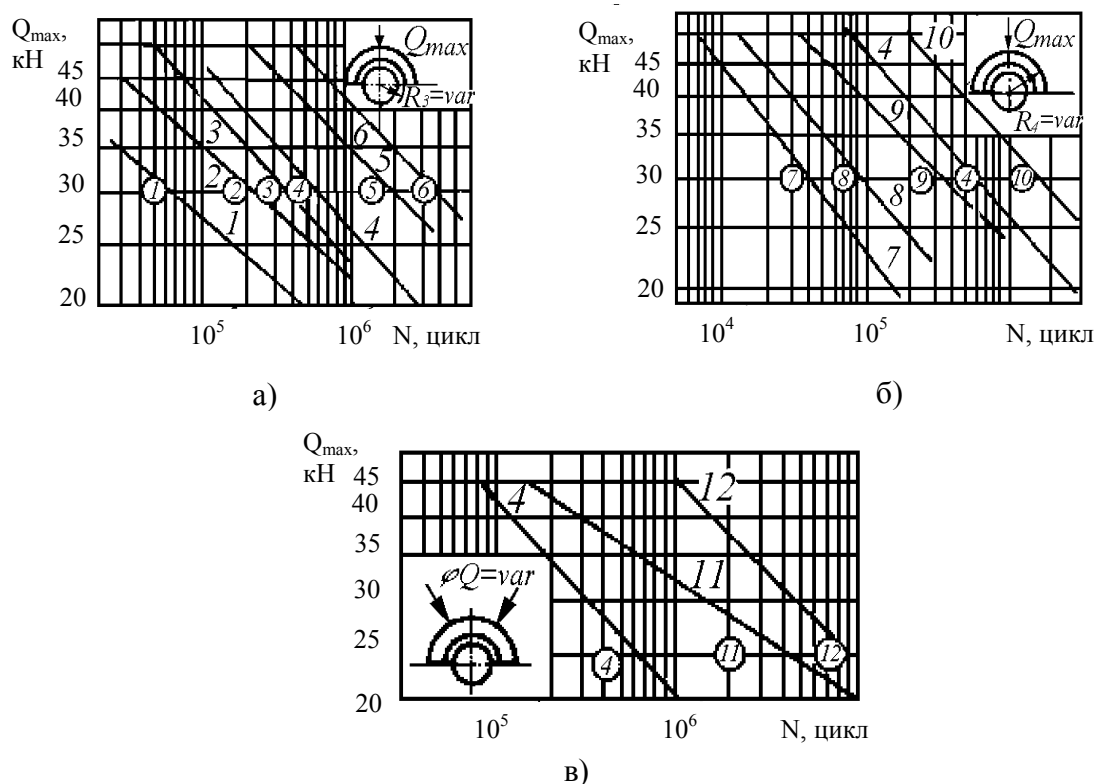


Рис. 8. Кривые усталости (по критерию зарождения первой макротрещины в слое баббита Б83) подшипников-образцов: а - при различной толщине слоя за счет варьирования радиуса  $R_3$  (1 - 8 мм; 2 - 6,5 мм; 3 - 4 мм; 4 - 2 мм; 5 - 1 мм; 6 - 0,5 мм); б - при различной жесткости стальной подложки за счет варьирования радиуса  $R_4$  (1 - 40мм; 2 - 45мм; 3 - 50мм; 4 - 54,25мм; 5 - 70мм при толщине 25мм); в - при различных углах приложения нагрузки (1 - 0°; 2 - 27°; 3 - 36°)

зультаты неплохо согласуются. На рис. 9 приведены развертки поверхностей двух подшипников-образцов на различных этапах повреждения.

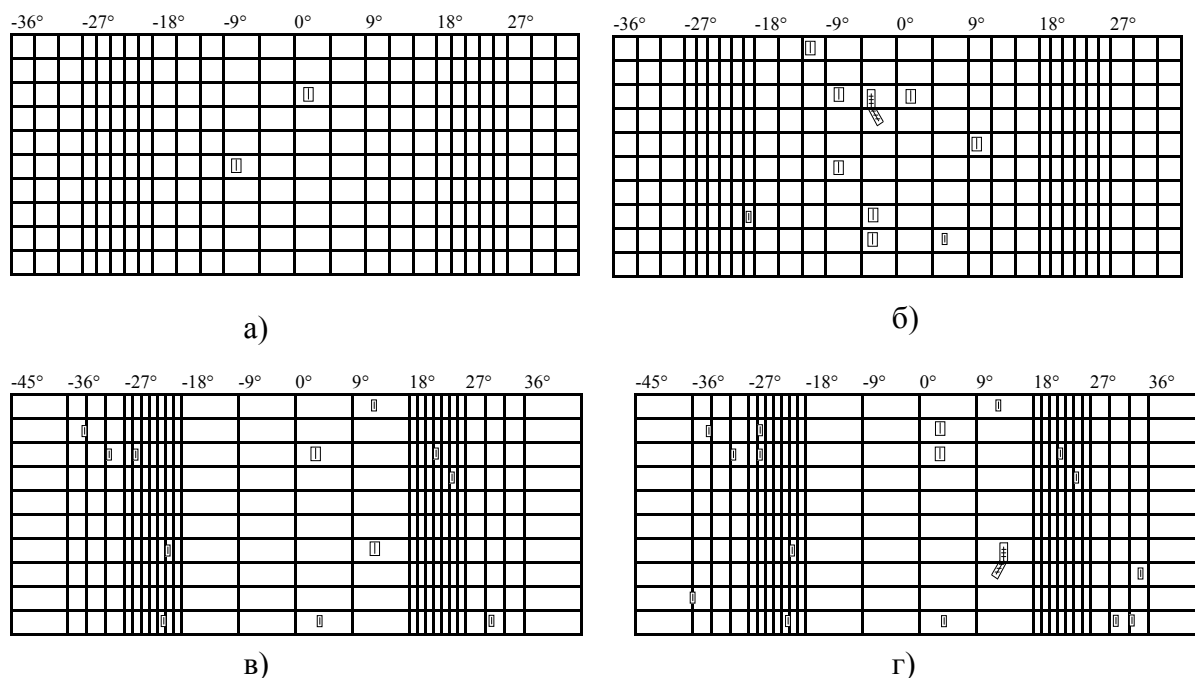


Рис. 9. Состояние поверхности АФС в случае нагружения подшипника-образца с параметрами  $R_4=54,25$  мм,  $R_2=25$  мм,  $B=25$  мм,  $h_{\text{сл}}=4$ мм: а – одной силой ( $Q=30$  кН;  $\phi_q=0^\circ$ ) при долговечности  $N=3 \cdot 10^4$  циклов; б – одной силой ( $Q=30$  кН;  $\phi_q=0^\circ$ ) при долговечности  $N=5,4 \cdot 10^4$  циклов; в – двумя силами ( $Q=30$  кН;  $\phi_q=36^\circ$ ) при долговечности  $N=2,4 \cdot 10^4$  циклов; г – двумя силами ( $Q=30$  кН;  $\phi_q=36^\circ$ ) при долговечности  $N=7,6 \cdot 10^4$  циклов

На шаге 8 осуществляется переход к следующему расчетному моменту времени. В зависимости от сохранения или изменения режима нагружения осуществляется переход к различным шагам общего алгоритма вычислений (рис. 2).

Таким образом, моделируется одна конкретная реализация протекания процессов повреждения конкретного ПС при конкретных условиях его нагружения. Если вычислительный процесс для этих же условий нагружения того же ПС выполнять неоднократно, то результаты расчетов будут несколько различаться, так как на некоторых шагах алгоритма использованы датчики случайных чисел (например, при определении места появления короткой трещины и выявлении той короткой трещины, которая достигла размера макротрещины). Выполнив серию расчетов для неизменных начальных условий, получаем статистическую базу для расчетов показателей надежности.

Несколько сложнее формируется база результатов при учете случайного варьирования начальных параметров задачи в пределах заданных ограничений. Перед каждой реализацией методом статистических испытаний определяются конкретные значения варьируемых параметров. Результаты расчета можно обработать статистическими методами оценки надежности по всей системе критериев отказа. Еще сложнее моделируется процесс повреждения деталей при переменных режимах эксплуатации, особенно если случайный характер носят такие временные показатели, как очередность смены режимов и продолжительность работы на каждом режиме.

В настоящее время апробированы основные этапы расчетной методики и показана их принципиальная работоспособность, а также разработаны первые версии некоторых библиотек (рис. 2). Начата разработка проекта системы, реализующей общую схему расчета долговечности.

## 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. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения/Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – М.: Машиностроение, 1999. – 540 с.
3. Зернин, М.В. Конечноэлементное описание процессов усталости с учетом особых свойств поверхности материала/М.В. Зернин //Заводская лаборатория. - 1995. - № 2. - С. 43-51.
4. Зернин, М.В. Моделирование контактного взаимодействия с использованием положений механики «контактной псевдосреды»/ М.В. Зернин, А.П. Бабин, А.В. Мишин, В.Ю. Бурак// Вестн. БГТУ. – 2007. - №4. - С. 62-72.
5. Зернин, М.В. Методика определения малых величин износа и построение математической модели изнашивания баббита при неустановившемся режиме граничного трения/ М.В. Зернин, А.Г. Кузьменко// Заводская лаборатория. - 1998. - № 8. - С. 48-52.
6. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций/В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
7. 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.
8. 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.
9. Зернин, М.В. Экспериментальная оценка долговечности напыленных и армированных сеткой баббитовых слоев подшипников скольжения/М.В. Зернин// Трение и износ. - 1987. - Т. 18. - № 4. - С. 506-514.

Материал поступил в редколлегию 26.03.08.