

УДК 539.3: 624.04  
DOI: 10.12737/24900

М.В. Зернин

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БАББИТОВЫХ СЛОЕВ С ТРЕЩИНАМИ

Описаны методики и приведены результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния двухслойных цилиндрических образцов с одной и несколькими трещинами. Разработана методика прямого моделирования трещин в слое по методу конечных элементов. Выполнены серии расчетных исследований по определению коэффициентов интенсивности напря-

жений, а также по анализу взаимовлияния трещин, имеющих в слое.

**Ключевые слова:** баббит, напряженно-деформированное состояние, НДС, моделирование трещин, метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений, взаимовлияние трещин.

M.V. Zernin

## STRESS-STRAINED STATE OF BABBIT LAYERS WITH CRACKS

A finite element procedure for calculated investigations of SSS at a crack tip in a babbitt layer is created. The procedure is adjusted for bimetal cylindrical sample loaded according to a circuit of bending with rotation. The dependences for stress intensity factors are obtained and it is shown that accuracy of such modeling is higher than in procedure options used earlier. A set of computations for samples with some cracks in a layer is carried out. The criteria of crack

separation into independent and interacted are revealed. The results of the work will be used for the further adjusted analysis of experiments and for the formation of dependences in a cyclic crack resistance of babbitt layers. The procedure shown and results can be useful for other objects with layers applied on a more solid basis.

**Key words:** babbitt, stress-strained state, SSS, crack modeling, finite element method, stress intensity factor, crack interaction.

### Постановка задачи

На кафедре «Динамика и прочность машин» БГТУ в течение многих лет выполняются исследования [1-4] различных механических свойств антифрикционных материалов (АФМ) для подшипников скольжения (ПС). АФМ применяются в ПС в виде тонкого слоя, нанесенного на более прочную основу. Среди прочих экспериментальных методик используют испытания слоев АФМ, нанесенных на стальную основу, но при отсутствии смазочного материала и контактного нагружения [1-4]. Во всех испытаниях очень важно корректно определить условия нагружения АФМ. В настоящей статье описано получение характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) в двухслойных цилиндрических образцах, применяемых нами для исследований развития системы трещин в баббитовом слое. Такие биметаллические образцы исполь-

зовались для изучения процессов развития и влияния трещин друг на друга. При обработке результатов эксперимента важно выполнить разделение трещин на независимые и взаимовлияющие.

Если длина слоя АФМ на образце значительно превышает толщину слоя, то можно исследовать закономерности зарождения и развития системы трещин. При появлении очередных трещин отсеивают те из них, которые образовались в зоне возмущенного НДС от появившихся ранее трещин. В результате обработки экспериментальных данных получают такие важные для подшипниковых материалов характеристики, как долговечность до зарождения  $k$ -й трещины и до наличия  $k$  трещин длиной не менее некоторой критеральной величины.

Образец для стенда МУИ-6000 [1] представляет собой стальную трубу с цен-

тральной частью диаметром 14 мм, длиной 106 мм, на которую нанесен слой баббита толщиной 2 мм (рис. 1а). Размеры хвостовиков и длина всего образца определяются

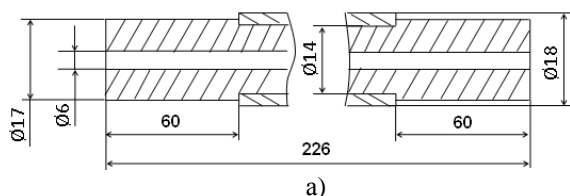
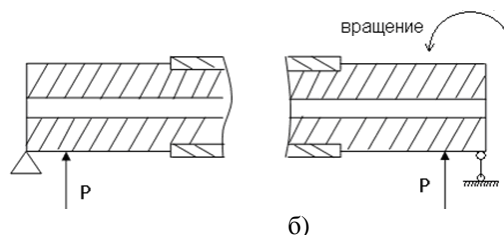


Рис. 1. Цилиндрический двухслойный образец для стенда МУИ-6000 (а) и схема его нагружения чистым изгибом с вращением (б)

конструкцией стенда МУИ-6000. На стенде МУИ-6000 рабочая часть образцов нагружается по схеме чистого изгиба с вращением (рис. 1б).



Контроль наличия и замер длин трещин в слое осуществлялся при периодических осмотрах образца. Использовался метод проникающих жидкостей. Длина трещин замерялась гибкой линейкой с точностью до 0,5 мм. При необходимости более точных замеров длины трещины участок поверхности с трещиной осматривался в оптический микроскоп и трещина измерялась с точностью 0,01 мм. Несколько испытанных образцов препарировались та-

ким образом, чтобы чётко выявлялся фронт трещины. Показано [2], что фронт трещины можно схематизировать дугой окружности (рис. 2). Для таких трещин коэффициент интенсивности напряжений (КИН) в месте выхода трещины на поверхность образца будет всегда максимальным. Стадии развития трещин в баббитовом слое образца можно представить в виде этапов, схематично показанных на рис. 2а-г.

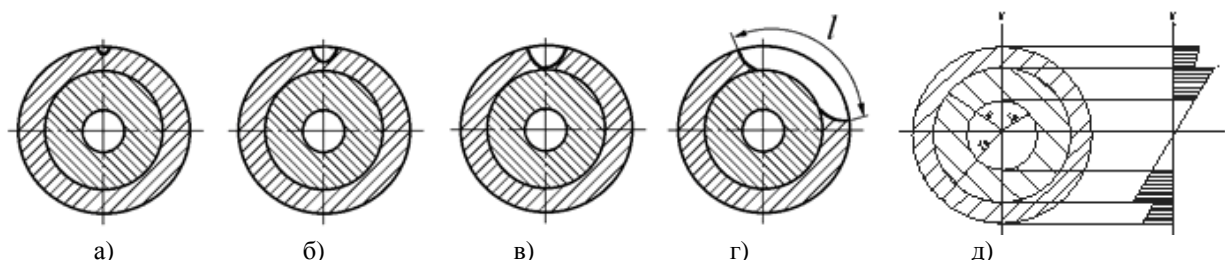


Рис. 2. Схематизация трещин в слое цилиндрического образца при различной длине  $l$ : а - зародыш макротрещины; б - развитие полукруглой трещины; в - трещина достигла поверхности стыка слоя и сердечника; г - большая длина трещины; д - эпюра номинальных напряжений в сечении образца

При малых размерах трещины (рис. 2а-в) можно пренебречь ее влиянием на перераспределение номинальных напряжений в баббитовом слое (рис. 2д). Последующее увеличение размера  $l$  трещины (рис. 2г) приводит к повышению напряжений в баббитовом слое, которое желатель-

но учитывать. Для описания процессов развития трещин кроме результатов (в координатах «число циклов нагружения – длина трещины») нужно знать: значения КИН; являются трещины независимыми или взаимовлияющими.

### Определение коэффициента интенсивности напряжений

Нами проводились испытания образцов много лет, начиная с 1983 года [1]. За эти годы выполнялись уточнения по определению КИН [2]. Это важнейшая характеристика механики разрушения, опреде-

ляющая поле НДС в вершине трещины [5; 6]. Простейшее схематическое представление поля напряжений у вершины трещины нормального отрыва (рис. 3а) показано на рис. 3б, в.

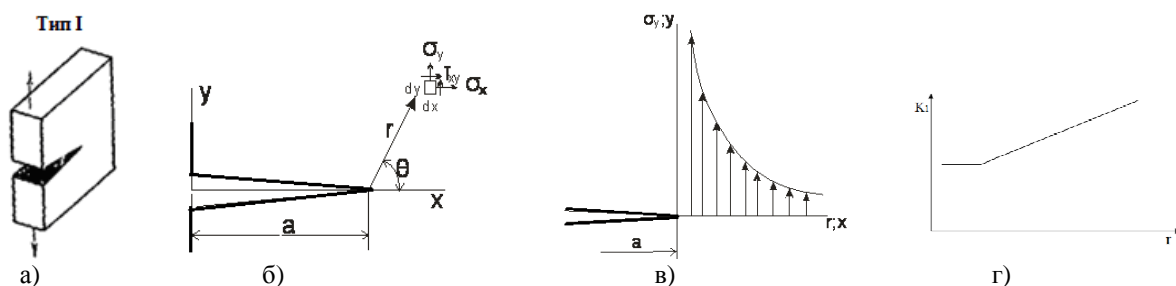


Рис. 3. Схематическое изображение трещины нормального отрыва (а), компоненты напряжений вблизи вершины трещины в двумерном представлении (б), эпюры напряжений в упругой постановке задачи (в) и характер изменения коэффициента интенсивности напряжений вблизи вершины трещины (г)

Результаты решения задачи о напряжениях у вершины трещины нормального отрыва (рис. 3а) можно представить в виде [5; 6]

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \quad (1)$$

где  $r$  и  $\theta$  - полярные координаты (рис. 3б);  $\sigma_{ij}$  - компоненты поля напряжений.

При решении упругой задачи о НДС у вершины трещины получаем бесконечное значение напряжений (рис. 3в). Но в реальных случаях возникает пластическая зона. Если пластическая зона у вершины трещины невелика и игнорируется или каким-то образом корректируется, то говорят о линейной механике разрушения. Для больших значений  $r$  величина  $\sigma_y$  стремится к номинальным напряжениям  $\sigma$ . Уравнение (1) справедливо только в ограниченной области – вблизи вершины трещины.

Формулы для КИН можно получить приближенными методами, например с применением гипотезы плоских сечений или на основе расчетов НДС по МКЭ с последующей обработкой результатов с целью получения простой формулы для вычисления. Значение КИН можно определить из формулы (1), если получено поле напряжений. Нами принята такая методология определения значений КИН по результатам расчетов НДС. КИН является константой в формуле (1). Если угловую координату принять нулевой, то напряжения у вершины трещины представляются графиком, изображенным на рис. 3в, и формула (1) вырождается в формулу

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}. \quad (2)$$

Из формулы (2) получаем

$$K_I = \sigma_y \sqrt{2\pi r}. \quad (3)$$

Значения КИН можно вычислить в любой точке, где известны напряжения. Если КИН вычислять при нескольких значениях радиуса, то можно построить по этим точкам график (рис. 3г). Если на таком графике выявляется участок с постоянным значением КИН, то можно сделать следующие выводы: конечноэлементная сетка достаточно подробна и правильно моделирует особенности НДС вблизи вершины трещины; размер зоны применимости формулы (1) соответствует размеру участка стабильного значения КИН; численное значение КИН можно определить в любой точке такого участка, но, учитывая некоторые погрешности результатов расчетов НДС, нужно вычислять среднее. Именно такая методика определения КИН по результатам конечноэлементных расчетов НДС всех образцов с трещинами использована далее.

Испытания таких образцов проводят уже много лет, и имеется несколько вариантов формул, полученных на разных этапах исследований и по разным методикам. Нами выполнен анализ этих формул и сопоставление их с результатами наших исследований по МКЭ. Первые варианты формул для КИН получены А.Г.Кузьменко и приведены в работе [1]. А.Г.Кузьменко использовал метод сечений при схематизации формы трещины в виде кольцевого сектора (рис. 4а). А.Г.Кузьменко получил зависимость для определения КИН для трещин небольшого размера (наличие которых не изменяет исходное НДС в слое образца без трещин). Для трещины больших размеров (глубина трещины больше толщины баббитового слоя) используется

корректирующий множитель, отражаю-

щий изменение номинальных напряжений.

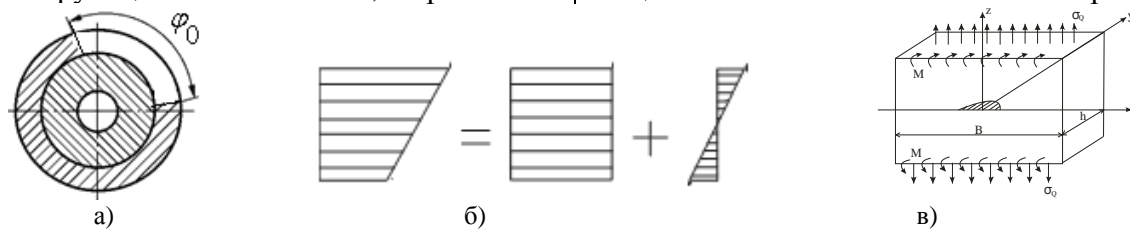


Рис. 4. Расчетная схема (по А.Г.Кузьменко) для образца с трещинами (а), декомпозиция эпюры напряжений в баббитовом слое как сумма составляющих от растяжения и изгиба (б), а также схема трещины в полосе, нагружаемой растяжением и изгибом (в)

Непосредственно в баббитовом слое линейная эпюра напряжений может быть представлена как сумма постоянной компоненты и компоненты от изгиба (рис. 4б). На основе этого факта автор получил для КИН более точную формулу [2], применив расчетную схему полосы (рис. 4в), нагруженной чистым изгибом и растяжением [7]. При этом граница трещины моделировалась по схемам, изображенным на рис. 2. Вывод формул содержится в статье [2]. Эти формулы также следует отнести к приближенным, так как при их получении использован ряд гипотез. В настоящее время имеется возможность выполнить прямое моделирование НДС у вершины трещины с применением МКЭ для получения более точных зависимостей для КИН.

Для моделирования самой трещины были апробированы 2 варианта: бесконечно острый разрез и разрез конечной ширины. Сопоставление результатов расчетов по обеим расчетным схемам может явиться еще одной проверкой правильности разработанной методики прямого моделирования НДС у вершины трещины. При создании модели задавались размеры образцов, которые испытывались экспериментально на стенде МУИ-6000. Для стального и баббитового слоев модули упругости были приняты  $E=2 \cdot 10^{11}$  МПа и  $E=0,6 \cdot 10^{11}$  МПа соответственно, коэффициенты Пуассона - 0,3 и 0,33 соответственно. Расчеты выполнены инженерами К.И.Гнибедой (Сидоровой), В.В.Лукияновой (Азаровой).

### Моделирование трещины как бесконечно острого разреза

При моделировании использовалась расчетная схема, приведенная на рис. 5. Рассматривалась половина образца, т.е. предполагалось, что трещина находится в его среднем (по длине) сечении. В этом сечении накладывались связи в осевом направлении, и только на участке, где име-

лась трещина, таких связей не было. Прикладывались силы, которые создавали изгибающий момент, такой, чтобы номинальные напряжения в верхней точке трещины соответствовали напряжениям 50 МПа. Моделировались трещины с границами по схемам, изображенным на рис. 2.

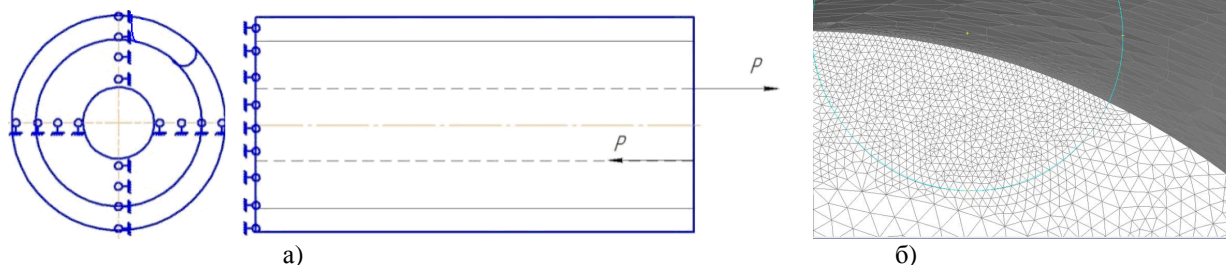


Рис. 5. Расчетная схема образца с независимой трещиной в среднем сечении (а) и фрагмент конечноэлементной сетки вблизи вершины трещины (б)

Особое внимание уделялось разбивке модели на конечные элементы (КЭ) в пре- процессоре FEMAP [8]. Образец разбивал-

ся на тетраэдральные КЭ. Выполнено сгущение сетки вблизи вершины трещины (рис. 5б).

### Моделирование трещины как разреза конечной ширины

Ранее аспирантом А.В.Гришановым под руководством автора анализировались различные варианты моделирования разреза [9], используемого для описания трещины в баббитовом слое (рис. 6а-г). Показано, что наиболее рационально выполнять

разрез по схеме рис. 6г. После показано, что рационально выбирать ширину разреза 0,05 мм и угол при вершине  $40^\circ$  (рис. 6д). Сетки КЭ показаны на рис. 6е. На рис. 7 нанесены дополнительные координатные оси, аналогичные локальной координате  $r$ .

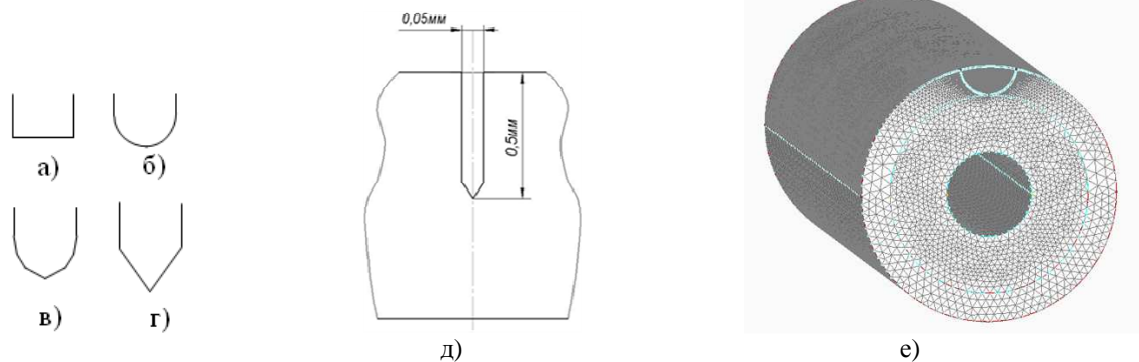


Рис. 6. Модели вершины трещины (а-г), трещина как разрез конечной ширины (д) и сетка КЭ (е)

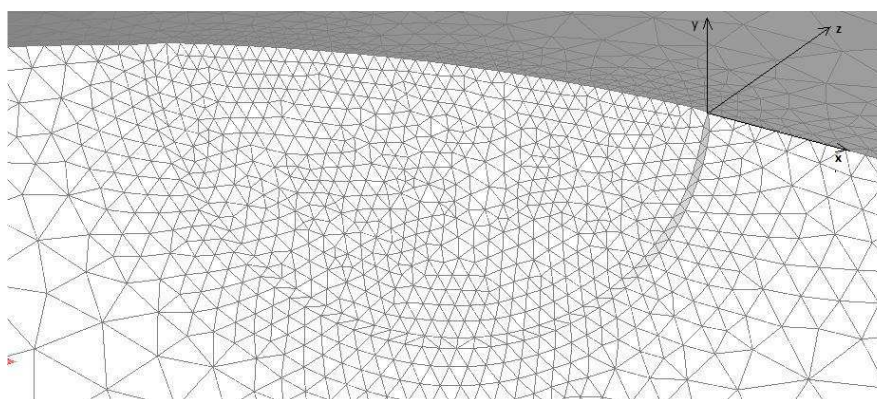


Рис. 7. Конечноэлементная сетка вблизи вершины трещины

### Анализ расчетных исследований образцов с трещинами

Была выполнена серия конечноэлементных расчетов НДС в образцах со следующими размерами трещин (с длинами  $l$ , измеряемыми по дуге окружности): 0,4; 1; 1,4; 2,5; 3; 4; 6; 8; 14; 21; 26; 34; 40; 46; 52 мм. Фронт трещины в пределах толщины слоя имел очертания части круга.

Для получения значений КИН из всего массива напряжений выделялась та часть, которая позволяет построить графики типа рис. 3в – г. Выбирались узлы, расположенные на двух перпендикулярных направлениях, откладываемых от вершины трещины (дополнительные оси координат на рис. 7): по дуге окружности образца ( $x$ ), т.е. в плоскости трещины, и на линии продолжения ее фронта и в направлении

образующей образца ( $z$ ), т.е. перпендикулярно плоскости трещины.

Выбирались напряжения  $\sigma$  для узлов, расположенных на разных удалениях от вершины трещины. Массивы данных (удаление  $r$  – напряжения) импортировались в Excel, вычислялись значения КИН по формуле (3) и строились графики напряжений и КИН в зависимости от удаления  $r$ . В одном случае в соответствии с введенной на рис. 7 локальной системой координат от вершины трещины удаление  $r=x$  (по дуге окружности образца), в другом случае  $r=z$  (в направлении образующей образца). На рис. 8 и 9 представлены эти графики при моделировании трещины разрезом конечной ширины с углом  $40^\circ$  при вершине.

При моделировании трещины бесконечно острым разрезом получены аналогичные графики. На всех графиках КИН имеется небольшой участок стабильного значения. Значения КИН, полученные по

двум типам моделей (бесконечно острый разрез и разрез конечной толщины), практически одинаковы. Следовательно, конечноэлементные сетки достаточно точные.

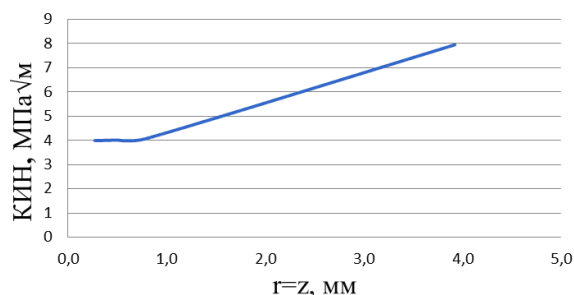
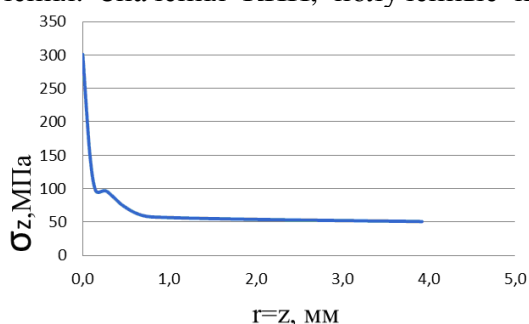


Рис. 8. Графики зависимости напряжений (а) и КИН (б) от координаты  $r=z$

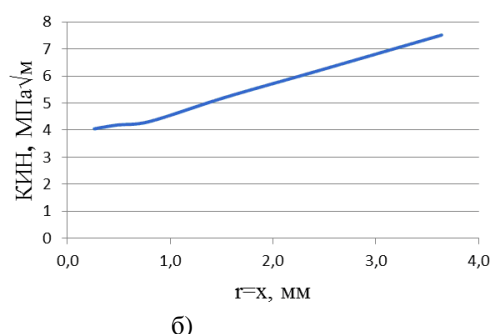
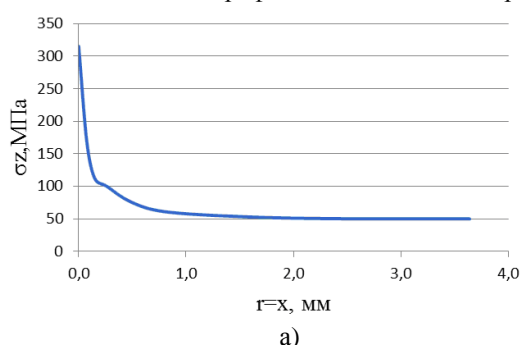


Рис. 9. Графики зависимости напряжений (а) и КИН (б) от координаты  $r=x$

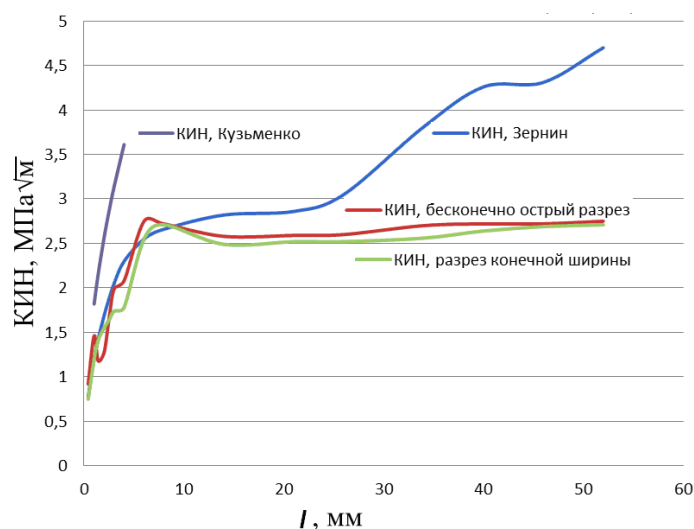
В таблицу сведены все результаты расчетов КИН по МКЭ и расчетов КИН для разных длин трещин по формулам автора [2] и по формулам А.Г.Кузьменко [1]. Расчеты для длинных трещин по формулам А.Г.Кузьменко не выполнялись, так

как уже для малых трещин формула А.Г.Кузьменко дает завышенные значения, а корректировка ее для случая длинных трещин приведет к еще большим значениям КИН. Сводная диаграмма со всеми результатами приведена на рис. 10.

Таблица

Значения длин трещин  $l$  и КИН, полученных по различным методикам

Длина трещины $l, \text{мм}$	КИН по формуле М.В.Зернина [2], $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	КИН по МКЭ (бесконечно острый разрез), $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	КИН по МКЭ (разрез конечной ширины), $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	КИН по формуле А.Г.Кузьменко [1], $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
0,4	0,77	0,92	0,75	1,147
1	1,21	1,46	1,2	1,819
1,4	1,42	1,18	1,41	2,152
2	1,69	1,273	1,55	2,568
2,5	1,88	1,66	1,64	2,866
3	2,05	1,99	1,74	3,138
4	2,3	2,08	1,78	3,611
6	2,55	2,75	2,55	-
8	2,66	2,72	2,71	-
14	2,82	2,58	2,49	-
21	2,86	2,59	2,52	-
26	3,05	2,6	2,52	-
34	3,81	2,7	2,56	-
40	4,26	2,72	2,64	-
46	4,31	2,72	2,69	-
52	4,7	2,75	2,71	-

Рис. 10. Графики зависимости КИН от длины трещины  $l$ 

По рис. 10 можно сделать следующие выводы: формулы А.Г.Кузьменко [1] неточны и применять их нецелесообразно; значения КИН, полученные по двум вариантам конечноэлементных моделей, различаются несущественно, причем после достижения трещиной длины 10 мм значение КИН становится практически постоянным; значения КИН, рассчитанные по формулам автора [2], близки к результатам МКЭ для длин трещин до 10 мм; начиная со значений длин трещин от 10 мм результаты по формуле автора [2] существенно отличаются от результатов, полученных по МКЭ.

Итак, для длин трещин до 10 мм возможно использование как формулы автора

[2], так и результатов расчета МКЭ. Для длин трещин от 10 мм и выше следует применять результаты МКЭ. Чтобы иметь возможность определить значения КИН, по результатам расчетов МКЭ построены полиномиальные аппроксимирующие зависимости:

$$\text{КИН} = -2\text{E}-09 l^6 + 5\text{E}-07 l^5 - 5\text{E}-05 l^4 + 0,002 l^3 - 0,053 l^2 + 0,553 l + 0,659; \quad (4)$$

$$\text{КИН} = -3\text{E}-09 l^6 + 7\text{E}-07 l^5 - 6\text{E}-05 l^4 + 0,002 l^3 - 0,052 l^2 + 0,5292 l + 0,634. \quad (5)$$

Здесь формула (4) аппроксимирует результаты расчетов по модели трещины как бесконечно острого разреза, формула (5) – по модели разреза конечной ширины.

### Оценка взаимовлияния трещин друг на друга

Ранее [1] были выполнены простейшие расчеты по МКЭ по двумерным расчетным схемам и принято, что если трещины отстоят друг от друга на расстоянии не менее трех толщин слоя, то их можно считать независимыми. Здесь приведем результаты решения трехмерных задач для уточнения критериев взаимовлияния трещин. Использованы несколько упрощенные модели, которые позволили разделить трещины на независимые и взаимовлияющие без тщательного анализа НДС у их вершин: полукруглый участок фронта моделировался только с одной стороны трещины, а с другой стороны фронт представлялся прямой линией.

Для оценки взаимовлияния трещин друг на друга был проведена серия расчетов НДС образцов с системой трещин, в частности для двух трещин, находящихся друг от друга на разном расстоянии: 5; 10; 20 мм. Трещины моделировались в виде кольцевого сектора 90 и 180° (рис. 11а). При разбивке модели на КЭ типа «тетраэдр» осуществлялось сгущение сетки вблизи вершины трещины (рис. 11б). Значения прикладываемых сил подобраны таким образом, чтобы моделировалась схема чистого изгиба (рис. 1б).

После расчета образца строились графики изменения напряжений и коэффициента интенсивности напряжений от

вершины трещины в двух перпендикулярных направлениях – в направлении образующей образца ( $z$ ) и по дуге окружности образца ( $x$ ) (эти дополнительные оси координат нанесены на рис. 7) - для первой и второй трещин. Критерием отнесения трещин к классу независимых является затухание повышенного уровня напряжений на участке между трещинами, т.е. уменьшение их до номинального значения 50 МПа. Так, на рис. 12а напряжения между

трещинами выходят на этот номинальный уровень, т. е. трещины, расположенные на удалении 20 мм друг от друга, можно считать независимыми, трещины на удалении 10 мм - уже нельзя. На рис. 12б видно, что напряжения между трещинами больше 50 МПа. Если трещины имеют больший размер, то их взаимовлияние начинает проявляться при большем удалении друг от друга (рис. 13).

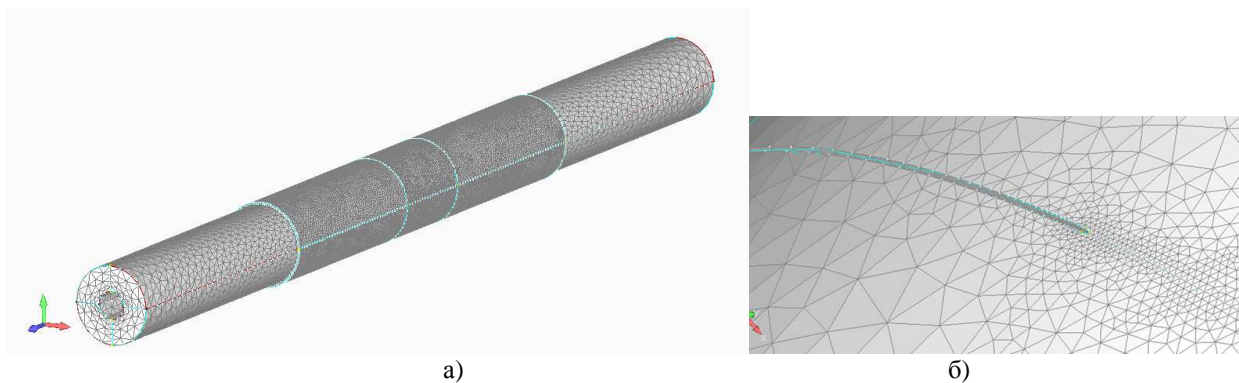


Рис. 11. Конечноэлементная сетка образца с двумя трещинами (а) и ее сгущение у вершины трещины (б)

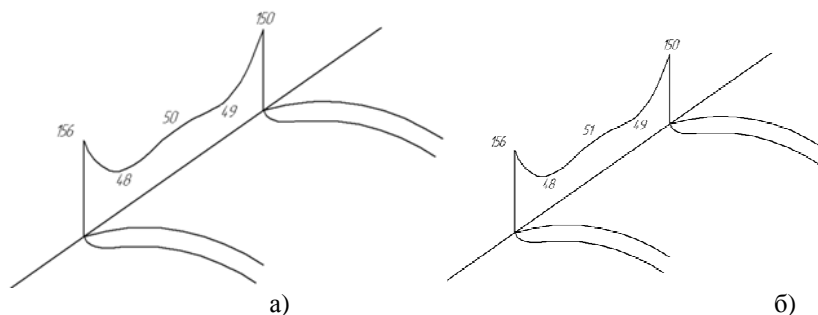


Рис. 12. Распределение напряжений между двумя трещинами размерами  $90^\circ$  по дуге окружности и расположенными друг от друга на расстоянии 20 мм (а) и 10 мм (б)

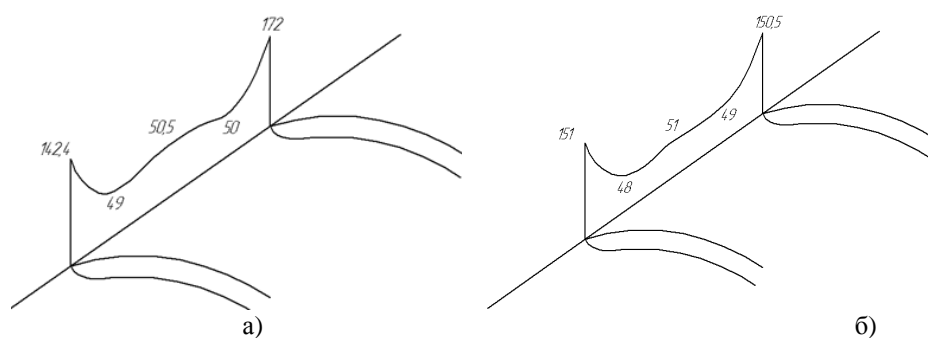


Рис. 13. Распределение напряжений между двумя трещинами размерами  $180^\circ$  по дуге окружности и расположенными друг от друга на расстоянии 10 мм (а) и 20 мм (б)

Из рис. 12 и 13 следует, что на расстоянии 20 мм трещины практически не влияют друг на друга. При сближении трещин на расстояние 10 мм и менее они начинают влиять друг на друга. Эти фак-

торы следует учитывать при обработке результатов эксперимента.

Оценивалось также влияние размеров больших трещин на номинальное поле НДС в баббитовом слое образца. На рис.



14а - в показано, что пока размер трещины по дуге окружности не превышает 40 мм ( $270^\circ$ ), нейтральная линия совпадает с геометрической осью симметрии образца, т. е. расположена там же, где и в образце без трещин. Но уже для трещины длиной 46 мм (рис. 14г) напряжения в точке геомет-

рической симметрии образца не нулевые, значит, эпюра номинальных напряжений существенно изменилась. А у трещины длиной 52 мм (рис. 14д) существенно сказывается взаимное влияние друг на друга двух встречных фронтов трещин.

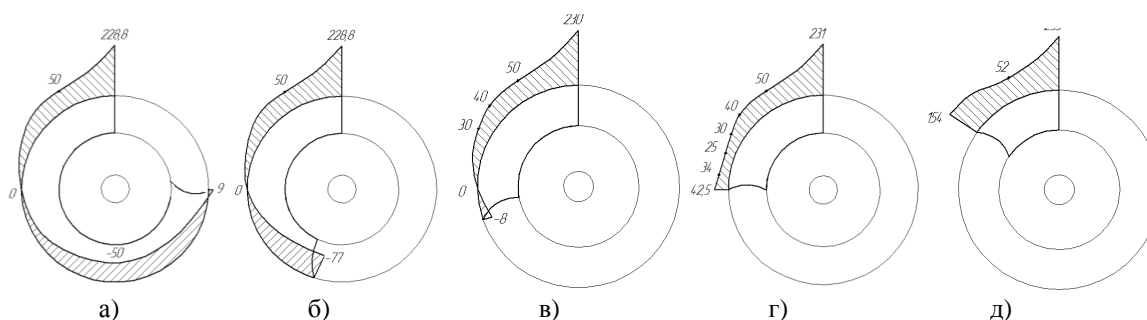


Рис. 14. Распределение напряжений по дуге окружности для трещин различных размеров: 14 мм (а), 34 мм (б), 40 мм (в), 46 мм (г) и 52 мм (д)

Можно сформулировать общие выводы по результатам исследований взаимодействия трещин: трещины до 40 мм ( $270^\circ$ ) и удаленные друг от друга на расстояние более 20 мм по образующей не влияют друг на друга; трещину размером

менее 45 мм можно рассматривать как трещину с независимым развитием встречных фронтов. Эти положения можно использовать для более точного анализа результатов экспериментальных исследований.

### Заключение

Построена конечноэлементная методика расчетных исследований НДС у вершины трещины в баббитовом слое цилиндрического образца. Получены зависимости для КИН и показано, что точность такого моделирования выше, чем у применяемых ранее вариантов методик. Выполнена серия расчетов образцов с несколь-

кими трещинами в слое. Выявлены критерии разделения трещин на независимые и взаимовлияющие. Результаты работы будут использованы для последующего уточненного анализа экспериментов и построения зависимостей циклической трещиностойкости баббитовых слоев.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьменко, А. Г. Закономерности развития трещин в баббитах / А.Г.Кузьменко, М.В.Зернин. - Брянск, 1983. - 83 с. - Деп. в ВИНТИ 9.09.83, №5280-83.
2. Зернин, М.В. Развитие независимых усталостных трещин в баббитовых слоях, нанесенных на подложку / М.В.Зернин // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: межвуз. сб. науч. тр. - Брянск: Брян. ин-т транспорт. машиностроения, 1990. - С.119 – 131.
3. Зернин, М.В. Экспериментальные исследования зарождения системы трещин в баббитовых слоях, нанесенных на стальную основу / М.В.Зернин, А.Г.Кузьменко, П.Н.Савоничев // Заводская лаборатория. - 1998. - Т. 64. - № 1. - С. 38-44.
4. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. - 2-е изд. - М.: Либроком, 2010. - 544 с.
5. Броек, Д. Основы механики разрушения /Д.Броек. - М.: Высш. шк., 1980. - 368 с.
6. Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П.Черепанов. - М.: Наука, 1974. - 640 с.
7. Newman, J.C. A empirical stress – intensity factor equation for the surface crack / J.C.Newman, I.S.Raju // Eng. Fract. Mech. - P.185-192.
8. Рудаков, К.Н. UGS Femap 9.3. Геометрическое и конечноэлементное моделирование конструкций/ К.Н.Рудаков. - М.: ДМК Пресс. - 296 с.
9. Гришанов, А.В. Моделирование трещин при расчете напряжений в антифрикционных слоях, нанесенных на стальную основу/ А.В.Гришанов

// Вестник Брянского государственного техни-

ческого университета. – 2011. - №2.- С. 18-20.

1. Kuzmenko, A. G. Regularities of crack growth in babbitts / A.G.Kuzmenko, M.V.Zernin. - Bryansk, 1983. – pp. 83. – *Dep. in VIRTI* 9.09.83, №5280-83.
2. Zernin, M.V. Development of independent fatigue cracks in babbitt layers applied on substrate / M.V.Zernin // *Dynamics, Strength and Traffic Machinery: Inter-College Proceedings - Bryansk: Bryansk Institute of Transport Mechanical Engineering*, 1990. - pp.119 – 131.
3. Zernin, M.V. Experimental researches of crack system origin in babbitt layers applied on steel base / M.V.Zernin, A.G.Kuzmenko, P.N.Savonichev // *Factory Laboratory*. - 1998. - Vol. 64. - № 1. - pp. 38-44.
4. Morozov, E.M. *Contact Problems of Fracture Mechanics* / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – 2-d ed. – M.: Librocom, 2010. – pp. 544.
5. Broek, D. *Fundamentals of Fracture Mechanics* /D.Broek. – M.: Higher School, 1980. – pp. 368.
6. Cherepanov, G.P. *Mechanics of Brittle Fracture* / G.P.Cherepanov. – M.: Science, 1974. – pp. 640.
7. Newman, J.C. A empirical stress – intensity factor equation for the surface crack / J.C. Newman, I.S. Raju // *Eng. Fract. Mech.* – P.185-192.
8. Rudakov, K.N. *UGS Femap 9.3. Geometrical and Finite Element Modeling of Structures*/ K.N.Rudakov. - M.: DMK Press. – pp. 296.
9. Grishanov, A.V. Fracture modeling at computation of stresses in antifriction layers applied on steel base/ A.V.Grishanov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2011. - №2. - pp. 18-20.

*Статья поступила в редколлегию 1.06.2016.*

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

#### Сведения об авторах:

**Зернин Михаил Викторович**, к.т.н., доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение»

**Zernin Mikhail Victorovich**, BSTU, Dep. “Informatics and Software”, Can. Eng., Assistant Prof., 56-09-84, [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).

Брянского государственного технического университета, e-mail: [zerninmv@mail.ru](mailto:zerninmv@mail.ru).