

Машиностроение и машиноведение

УДК 539.4: 624.04

DOI: 10.30987/article_5cda64cc1934b2.58791459

М.В. Зернин

МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ФИЗИЧЕСКИ КОРОТКИХ И МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ТРЕЩИН И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ ДЛЯ БАББИТА НА ОСНОВЕ ОЛОВА

Проанализированы стадии развития трещин усталости. Приведены известные модели развития физически коротких трещин и обобщенные модели, описывающие несколько стадий. Показана перспективность предложенной статистической обобщенной модели. Приведены полученные параметры циклической трещиностойкости баббита на основе олова.

Ключевые слова: стадии развития трещин усталости, микроструктурно короткие трещины,

физически короткие трещины, упругопластическая механика усталостного разрушения, эмпирические модели, статистические модели, баббит на основе олова.

M.V. Zernin

MODELS OF PHYSICALLY SHORT AND MACROSCOPIC CRACK DEVELOPMENT AND THEIR APPLICATION FOR TIN BASED BABBIT

The stages of fatigue crack development are analyzed. The well-known models of physically short cracks and generalized models describing some stages are shown. A perspective of a statistical generalized model offered is shown. The parameters obtained of a

cyclic crack resistance of tin-based babbitt are presented.

Key words: stages of fatigue crack development, micro-structurally short cracks, physically short cracks, elastic-plastic mechanics of fatigue fracture, empirical models, tin-based babbitt.

Описание стадий развития усталостных трещин и постановка задачи

На кафедре «Механика и динамика и прочность машин» БГТУ в течение многих лет выполняются исследования различных механических свойств антифрикционных материалов (АФМ) для подшипников скольжения (ПС). В частности, исследованы свойства баббита Б83, который проявляет отличные антифрикционные качества, но прочностные его свойства невысоки. Нами систематизированы свойства баббита в монографии [1], в настоящее время уточняются [2-5] характеристики разрушения баббита при статическом и циклическом нагружении.

Приповерхностные слои материала повреждаются сильнее, чем глубинные [1;

6-9]. При многократном циклическом нагружении усталостные микротрещины возникают обычно на поверхности даже при отсутствии контактных нагрузок (рис. 1а). При высоком уровне напряжений рост трещин начинается с самых первых циклов нагружения. Так бывает и при меньших уровнях напряжений, если уже до начала эксплуатации детали имеется значительное количество трещиноподобных дефектов в ее объеме и на поверхности. Причем концентрация начальных и вновь появившихся микродефектов в приповерхностных слоях может быть на несколько порядков выше, чем в глубинных слоях [6-9].

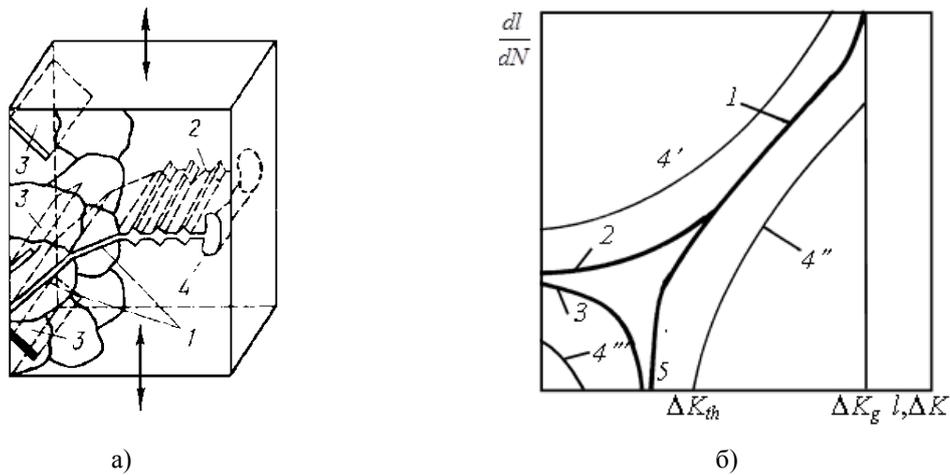


Рис. 1. Усталостные трещины, распространяющиеся с поверхности (а), и схематическое изображение обобщенной кинетической диаграммы развития усталостных трещин (б)

В поликристаллических телах множество трещин может стартовать одновременно (рис. 1а), но большинство из них останавливается, и только одна из трещин со временем начинает доминировать над остальными и вызывает разрушение. Подробно стадии развития усталостных трещин и причины их остановки анализируются в работах [1; 7-9]. Для усталостных трещин, распространяющихся с поверхности (рис. 1а), можно выделить несколько характерных зон [7]: 1 - зона развития с влиянием металлографических особенностей поликристаллического материала; 2 - зона развития макротрещины; 3 - нераспространяющиеся (неэффективные) трещины; 4 - пластическая зона у вершины распространяющейся (эффективной) макротрещины.

Трещины принято называть малыми, если их длина не превышает размера зерна материала. Критерием отнесения трещины к разряду макроскопических (длинных) может являться высокая концентрация напряжений у ее вершины по сравнению с микроструктурной концентрацией напряжений (например у границы зерен). Обычно зародыш макротрещины превышает размеры элементов структуры в несколько раз. Его величина может быть различна не только при разном уровне нагрузки, но и при различных видах напряженно-деформированного состояния (НДС). Согласно современной классификации [10], микроструктурно короткими трещинами (МКТ) называют трещины, которые разви-

ваются в пределах зерна. Физически короткими трещинами (ФКТ) называют трещины размерами больше размера одного зерна, но меньше размера зародыша макротрещины. Для их моделирования требуется применять упругопластическую механику разрушения (УПМР).

На схеме кинетической диаграммы усталости (рис. 1б) приведено обобщение стадий развития усталостных трещин, основанное на достаточно представительных экспериментальных исследованиях и обзорных публикациях [1; 7-10]. По горизонтальной оси может отсчитываться длина трещины или коэффициент интенсивности напряжений (КИН). Для разных уровней напряжений разные значения длины трещины соответствуют характерным точкам на горизонтальной оси. Использование КИН в качестве параметра оси абсцисс также является условным. Например, при одноосном нагружении макротрещина развивается по схеме нормального отрыва (первой моде), а МКТ - по схеме плоского среза (второй моде) [7; 11]. Т.е. на горизонтальной оси имеется некоторая начальная область, до которой необходимо отсчитывать K_2 , а после нее - K_1 .

Сплошные линии на рис. 1б: 1 - кинетическая диаграмма, характерная для макротрещин; 2 - описывает развитие коротких трещин, перерастающих в макротрещины (эффективных трещин); 3 - характеризует развитие нераспространяющихся (неэффективных) трещин. При рас-

смотрении текущего их развития нельзя предположить заранее, какая из коротких трещин перерастет в макротрещину, а какая остановится. Существует множество причин (большинство из них - случайной природы) для перехода каждой индивидуальной трещины как в класс развивающихся коротких, так и в класс неэффективных [1]. Пунктирные линии 4', 4'', 4''' очерчивают границы области рассеивания экспериментальных значений скорости развития всех трещин. Причем границы 4''' чаще всего не бывает, что означает присутствие в материале неэффективных трещин очень малых размеров.

В механике развития макротрещин усталости принято, что существует некоторое пороговое значение КИН K_{th} - точка 5 на оси абсцисс, левее которой трещины не развиваются. Но трещины могут расти и в допороговой области, иначе гладкие образцы без начальных макротрещин никогда бы не разрушились. Причем многие исследователи обнаружили, что скорости роста трещин в допороговой области для многих материалов оказались на 2-4 порядка выше скоростей роста длинных трещин [7; 10-11]. Фактически в допороговой области имеется система коротких трещин, и скорости их развития существенно (на несколько порядков) различаются.

В благоприятном случае по мере прохождения трещиной новых кристаллитов влияние ориентации соседних зерен уменьшается. Некоторые из КТ по мере подрастания начинают ориентироваться

перпендикулярно первому главному нормальному напряжению (линия 2 на рис. 1б), т.е. становятся макротрещинами. В вершине образуется пластическая зона (область 4 на рис. 1а), трещина становится значимым концентратором напряжения. Ее можно считать длинной, значимость кристаллографических параметров становится несущественной. По мере увеличения числа циклов нагружения появляются новые трещины и подрастают уже имеющиеся. Обычно большое количество трещин достигают длины в несколько десятков микрон, после чего их рост прекращается (линия 3 на рис. 1б).

Основные ограничения линейной механики разрушения (ЛМР) сохраняются и для линейной механики усталостного разрушения (ЛМУР). Кроме того, лимитируется допустимая минимальная скорость роста трещины за один цикл нагружения. Эти ограничения приемлемы для макротрещин, а для анализа КТ в большинстве случаев следует применять УПМР. Одним из важнейших направлений развития механики разрушения является создание единого подхода для трещин всех размеров, объединяющего ЛУМР и УПМР с указанием границ их применимости. Несколько вариантов таких подходов подробно разобраны в работах [1; 10]. В настоящей статье кратко изложим эти подходы и опишем применение моделей развития коротких трещин для баббитов на основе олова.

Границы, разделяющие эффективные и неэффективные трещины

Кратко опишем основные результаты обзорных исследований, проиллюстрированные диаграммами в координатах «логарифм размаха напряжений - логарифм длины трещины». На рис. 2а приведена диаграмма из работы [11] о коротких трещинах в материале с несколькими фазами различных размеров. Толстой линией обозначена граница, разделяющая эффективные и неэффективные трещины. Эта линия состоит из трех участков, ниже нее трещины рассматриваются как неэффективные, выше - как эффективные. Т.е. линия соответствует нулевой скорости развития тре-

щины заданной длины. На оси длин трещин отмечены два критериальных значения длины: l_1 , меньше которой МКТ не снижают предел выносливости гладкого образца, и l_2 , больше которой трещины рассматриваются как длинные и к ним применима ЛМУР. Кроме того, на левой части диаграммы (соответствующей развитию МКТ) учтено, что трещины короче l_1 развиваются по второй моде. Для развития таких трещин требуются меньшие нагрузки, поэтому при размахе напряжений, меньшем предела выносливости, граница

неэффективных трещин сдвигается ниже горизонтальной линии 1 и является кривой

линией с выпуклостью вниз (линия 3).

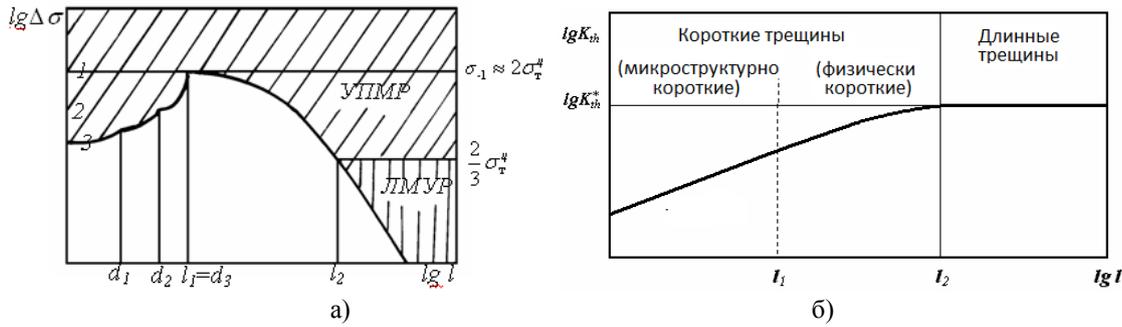


Рис. 2. Границы неэффективных трещин в многофазном материале (а) и схематическое изображение взаимосвязи предела циклической трещиностойкости K_{th} и длины трещины (б)

Для многофазных материалов слева на рис. 2а выделены стадии роста трещины до длин d_1 , d_2 и d_3 , которые отражают размеры микроструктурных особенностей, оказывающих влияние на характер роста трещин. Такое влияние могут оказывать включения, зерна или расстояния между фазами. При длинах трещин, больших радиуса влияния микроструктурных особенностей ($l_1 < l < l_2$), рост трещин можно описать на основе механики сплошной среды и они развиваются по первой моде. Для роста таких ФКТ необходимы столь высокие напряжения, что зона пластичности у вершины трещин становится велика. Следует применять УПМР.

Детально исследованы модели развития коротких трещин в работе Л.И. Доможирова [10]. Циклическое нагружение характеризуется следующими особенностями упругопластического деформирования материала в вершине трещины [10]. В полцикле разгрузки происходит повторное пластическое течение обратного знака. В вершине трещины в каждом полцикле разгрузки будет появляться новая пластическая зона сжатия. Т.е. на монотонную (знакопостоянную) пластическую зону размерами $d_p = \beta(K_{max} / \sigma_T)^2$ наложена циклическая (знакопеременная) пластическая зона размерами $d_{pc} = \beta(\Delta K / 2\sigma_T^C)^2$, где β - коэффициент, зависящий от напряженного состояния, σ_T^C - циклический предел текучести, учитывающий влияние эффекта Баушингера. Если принять

одинаковыми пределы текучести [10], то $d_{pc} / d_p = (1 - R)^2 / 4$, где R - коэффициент асимметрии цикла. Отсюда следует, что при $R \geq -1$ циклическая пластическая зона меньше монотонной и различие их размеров растёт с повышением R .

Для трещин в интервале длин $l_1 < l < l_2$ (ФКТ) в работе [10] приведены результаты, основанные на учете взаимосвязи предела выносливости гладкого образца, порогового значения КИН K_{th} и длины трещин. Такая зависимость для предела выносливости σ_R при произвольном коэффициенте асимметрии цикла R имеет вид $\sigma_R = K_{th} / \sqrt{\pi l} y$, где функция y отражает влияние формы объекта, трещины и других факторов. Л.И. Доможировым [10] при использовании более точного выражения для напряжений у вершины трещины получены некоторые обобщающие зависимости, которые представляются достаточно общими и применимыми для многих расчетных схем посредством введения соответствующей функции y .

Полученное при использовании критерия Мизеса выражение имеет вид $\sigma_R = \sigma_T^C / \sqrt{\pi l y^2 (\sigma_T^C / K_{th})^2 + (1 - \mu + \mu^2)}$, где μ - коэффициент Пуассона. Аналогичное выражение получено [10] на основе модели Эль-Хаддада и Топпера [12] для описания развития коротких трещин: $\sigma_{-1} = \sigma_{-1_0} / \sqrt{\pi l y^2 (\sigma_T^C / K_{th})^2 + 1}$, где σ_{-1_0} - предел выносливости гладкого образца

при симметричном цикле нагружения. Все приведенные здесь выражения неплохо соответствуют экспериментальным результатам [10].

Экспериментальную взаимосвязь предела выносливости и размера трещины по кривой линии на рис. 2а можно интерпретировать как тезис о том, что предел выносливости, скорее всего, отражает способность имеющихся в материале трещин развиваться. Трещины при выполнении условия $\pi l(\sigma_T^c / K_{th})^2 \ll (1 - \mu + \mu^2)$ не влияют на предел выносливости. Условие применимости ЛМУР (наклонный участок на рис. 2а) имеет вид $\pi l(\sigma_T^c / K_{th})^2 \gg (1 - \mu + \mu^2)$. Промежуточная область соответствует длинам трещин $0,1(K_{th} / \sigma_T)^2 < l < 2,5(K_{th} / \sigma_T)^2$, причем здесь принято $\sigma_T^c \approx \sigma_T$. Последнее условие позволяет оценить размеры l_1 и l_2 , которые являются границами участков кривой на рис. 2а. Л.И. Доможировым обосновано [10] использование параметра $l^* = 0,1(K_{th} / \sigma_T)^2$ для определения указанных границ. Трещины длиной $l/l^* < 1$ практически не влияют на предел выносливости, который в этом случае определяется пределом текучести. При $l/l^* > 20$ влияние трещин на предел выносливости описывается подходами ЛМР.

Если из формулы, аппроксимирующей правый (наклонный) участок кривой на рис. 2а, выразить КИН и подставить предельные значения, то можно получить взаимосвязь K_{th} и длины трещины: $K_{th} = \sigma_{th} \sqrt{\pi l}$. Эта формула может быть представлена линией согласно рис. 2б. Такой характер взаимосвязи указанных параметров также подтверждается экспериментальными результатами [10]. Если же вместо КИН использовать его эффектив-

ное значение K_1^* , полученное в работе [10] с применением более точного описания поля НДС у вершины трещины, то график этого параметра на рис. 2б соответствует горизонтальной прямой линии. Инвариантность параметра K_1^* отражает тот факт, что протяженность пластической зоны в вершине трещины d_p^0 , соответствующая условиям нераспространения трещины при циклическом нагружении, не зависит от размеров трещины [10]. Параметр K_1^* при заданных условиях нагружения можно считать характеристикой циклической трещиностойкости материала.

Отметим, что принятое выше допущение о равенстве пределов текучести $\sigma_T^c \approx \sigma_T$ является достаточно сильным. На самом деле эти пределы текучести различаются в несколько раз. Так что применение полученных выше формул сомнительно.

Резюмируем изложенное в настоящем разделе: пределом выносливости является скорее предел распространения трещин (невозможности образования доминирующей трещины), чем предел способности материала к их зарождению; на процессы развития коротких и макроскопических трещин оказывает влияние большое количество факторов, большинство из которых трудно контролировать. После определения экспериментальных значений скоростей развития и длин коротких и длинных трещин получаем систему точек, практически полностью заполняющую (но с различной плотностью) зону рассеивания, ограниченную линиями 4 на рис. 1б. Этот факт указывает на перспективность статистических методов обработки результатов экспериментов и расчетов процесса развития трещины.

Модели развития физически коротких трещин

Модели, описывающие все особенности поведения коротких трещин, должны содержать большое количество параметров, для определения которых требовалось бы выполнять тонкие экспери-

ментальные исследования. Кроме того, многие параметры определяются сочетанием случайных величин и, как следствие, должны носить стохастический характер. На настоящем этапе состояния исследова-

ний коротких трещин вполне оправдано применение упрощенных моделей, основанных на некоторых сильных гипотезах [1; 10; 11; 13; 14]. Приведем некоторые модели.

Для ФКТ, развивающихся через несколько зерен, пластическое деформирование самих зерен и локальное поле НДС у вершины вносят сопоставимый вклад в развитие таких трещин. Причем по мере подрастания ФКТ вторая составляющая НДС начинает приобретать доминирующую роль. Скорость развития сравнительно небольших ФКТ сильнее зависит от уровня напряжений, чем от длины трещины. Для моделирования развития ФКТ в работах [11; 13; 14] приведена простая по форме эмпирическая зависимость

$$\frac{db}{dN} = C(\Delta\gamma)^m b - C_{th}, \quad (1)$$

где $\Delta\gamma$ - размах деформации сдвига, а параметр C_{th} аналогичен условию порогового уровня скорости.

Другие авторы используют для описания развития ФКТ схожие по форме уравнения. Т.е. уравнение (1) является типичной, но не единственной аппроксимирующей зависимостью для описания развития коротких трещин.

Если моделируется прохождение трещиной нескольких стадий подрастания, то для описания всего процесса развития трещин уравнения обоих типов (МКТ и ФКТ) складывают [11; 14]. Величина первого слагаемого имеет существенное значение при уровне напряжений, ненамного превышающем предел выносливости материала. При более высоких напряжениях этап зарождения и роста МКТ составляет пренебрежимо малую долю долговечности [14]. Так как напряжения в конструкции могут изменяться и при их повышении ба-

рьер может быть преодолен, то остановившаяся трещина опять будет развиваться. Для таких условий может оказаться значимой продолжительность обеих стадий, а также стадии остановки трещины. Такой принцип суперпозиции нескольких решений применяется довольно часто [14]. Перспективно также построение моделей, учитывающих накопление повреждений у вершины МКТ или ФКТ. Например, в работах К. Миллера [11, 14] излагается подобная попытка.

По мере подрастания ФКТ пластическое деформирование самих зерен перестает играть доминирующую роль, наиболее существенное влияние начинает оказывать поле НДС у вершины таких трещин. Но некорректно применение КИН в качестве единственного параметра, определяющего это поле НДС. Размеры пластической зоны у вершины ФКТ не соответствуют критериям применимости ЛМР. Тем не менее имеются попытки [10; 14] применять ЛМУР, но с дополнительным учетом ряда эффектов (более точное описание поля НДС у вершины, учет упруго-пластического поведения материала).

Например, можно использовать прием Ирвина [15], согласно которому для применения ЛМР в случае протяженной пластической зоны в выражение для КИН подставляют не реальную длину трещины, а увеличенную на радиус пластической зоны. Аналогичным образом построена модель Эль-Хаддада и Топпера [10; 12], показавших, что поведение коротких трещин можно описать методами ЛМР, если к фактическому размеру трещины добавить некоторую длину, являющуюся константой материала для заданных условий испытаний. В частности, для первой моды КИН вычисляется по формуле

$$K = \sigma \sqrt{\pi(l + l_0)} y, \quad \text{где } l_0 = \left(\frac{K_{th}}{\sigma_{R_0} y} \right)^2 / \pi.$$

Причем для различных материалов величина l_0 составляет в среднем 10 характерных размеров микроструктурного элемента материала [10; 16] или четверть характерного размера l_2 [17]. Эта модель

фактически является попыткой сравнить с критериальными значениями упругую область локального НДС, которая начинается не от самой вершины трещины, а от границы пластической зоны. Возможные погрешности модели связаны с недостаточ-

ной точностью описания реального НДС у вершины трещины при применении асимптотических формул, но сдвинутых на параметр l_0 , который на самом деле зависит от многих факторов.

Учет уровня номинальных напряжений предлагается [18] осуществить путем использования не постоянного предела трещиностойкости K_c , а критерия [19]

$$I_c = K_c \sqrt{1 - (\sigma_1 / \sigma_b)^2},$$

где σ_b - предел прочности материала.

Л.И. Доможиров [10] предлагает использовать размер пластической зоны по линии продолжения трещины d_p в качестве критериального параметра, контролирующего развитие усталостной трещины. При этом использованы зависимости для размера d_p , полученные на основе более точного описания НДС у вершины трещины. Для частного случая (трещина первой моды в бесконечной пластине из идеально упругопластического материала с применением критериев текучести Мизеса и Треска - Сен-Венана) получено выражение для эффективного КИН K_1^* , однозначно

Обобщенные модели развития трещин

Пытаются также построить обобщения на все области развития трещин усталости. Например, в работе [10] предложено отыскивать закономерность развития трещин различной длины в форме уравнения Париса:

$$dl / dN = C_2 d_{pc}^{m_2},$$

где d_{pc} - размер пластической зоны при циклическом пластическом деформировании.

Это выражение преобразовано [10] к более удобной форме при использовании критерия Мизеса:

$$dl / dN = C_1 \left[K_1 / \sqrt{1 - (\sigma / \sigma_T^c)^2 (1 - \mu + \mu^2)} \right]^{m_1}. \quad (2)$$

В уравнении (2) отражено совместное влияние номинальных напряжений и локального поля напряжений у вершины трещины, то есть уравнение относится к классу обобщенных. При разных сочетаниях двух составляющих напряжений обобщенное уравнение превращается в бо-

связанного с размером пластической зоны d_p . Этот параметр практически совпадает с K_1 в том случае, когда пластическая зона не выходит за пределы поля напряжений, определяемого K_1 . Т.е. в рамках применимости ЛМР критерий K_1^* вырождается в критерий K_1 .

Но для больших размеров пластической зоны проявляются различия двух указанных критериев. Такой критерий используется для обобщенного описания развития как коротких, так и длинных трещин в рамках единых расчетных зависимостей. Т.е. критерий K_1^* является силовым критерием разрушения при различных соотношениях размеров пластической зоны и самой трещины. Сложности состоят в построении самого выражения для K_1^* при других формах трещин, других нагрузках, с учетом упрочнения материала и т.д. Автору представляется перспективным использовать подход Л.И. Доможирова совместно с конечноэлементными расчетами НДС у вершины трещины.

более простые уравнения, соответствующие вязкому разрушению (не влияет трещина), или обычное уравнение ЛМУР для среднего участка кинетической диаграммы усталости (уравнение Париса, отражающее влияние только КИН). При учете обоих факторов напряженного состояния можно описывать кинетику развития коротких трещин усталости, так как приведенные выше обобщенные уравнения инвариантны к размерам трещин.

В работе [10] анализируется кинетика коротких трещин в поверхностном слое, предел текучести которого может быть значительно меньше (до 2,5 раза) и линейно возрастает до глубины, составляющей 10-20 размеров зерна стали. В этом слое более сильное влияние относительных номинальных напряжений. По мере роста таких трещин, с одной стороны, уменьшается влияние номинальных напряжений, так как возрастает предел текучести, и возрас-

тает влияние локальных напряжений, так как возрастает КИН. Эти два противоположно влияющих фактора могут как ускорять, так и замедлять процессы развития коротких трещин. Рассматриваемая модель Л.И. Доможирова позволяет учесть указанные эффекты, что наглядно продемонстрировано в работе [10] на ряде примеров, сопоставляемых с экспериментальными данными. В том числе моделируется сначала снижение, а потом возрастание скорости развития поверхностных усталостных трещин и последующий переход их в область макротрещин.

Но наибольший интерес представляет попытка Л.И. Доможирова [10] объединить все этапы усталостного разрушения в обобщенной кривой усталости материала, по вертикальной оси которой откладывается не амплитуда напряжений, а эффективный коэффициент интенсивности напряжений K_1^* , при вычислении которого использованы относительные номинальные напряжения σ/σ_T и КИН. Т.е. в единую кривую (линия 1 на рис. 2б) можно уложить результаты усталостных испытаний гладких образцов и образцов с исходными трещинами определенной длины. Причем использование параметра K_1^* применимо для коротких и длинных трещин. В такой кривой некоторым образом объединяются обычная кривая усталости и кинетическая диаграмма развития усталостных трещин (рис. 1б), что является положительным фактором.

Автором настоящей статьи предложена [5] модель развития коротких и длинных трещин, которую можно назвать обобщенной статистической моделью. Схематически обобщенная кинетическая диаграмма предлагаемой модели представлена на рис. 3а. Помимо линий 1, 2 и 3, соответствующих вероятностям 99, 50 и 1 %, нанесены серии вертикальных сечений и линии 5-11, представляющие дифференциальные функции распределения скоростей развития трещин при различных значениях КИН. Если на таких графиках выделяются участки, соответствующие различным законам рассеивания, то можно провести линию 4, соединяющую границы

перехода от одного нормального закона (с большим рассеиванием) к другому нормальному закону (с меньшим рассеиванием). Значение КИН (длины трещин), при котором такой переход реализуется при вероятности 50%, можно считать порогом перехода от коротких к макроскопическим трещинам. Это значение КИН соответствует размеру зародыша макротрещины при данной нагрузке.

Из такой модели получены [5] следующие параметры циклической трещиностойкости: граница перехода от коротких трещин к макротрещинам (от зоны I к зоне II, $K_{IN} = 1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$); уравнение развития (например уравнение Париса) для участка стабильного роста макротрещины (зона II, $dl/dN \approx 10^{-6} K_{Imax}^5$); граница перехода от стабильного роста к ускоренному росту макротрещины (от зоны II к зоне III, $K_{ep} \approx 2,0 \dots 2,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$). Обычно этой точке соответствует переход от упругой (с пренебрежимо малой пластической зоной у вершины) к упругопластической (с пластической зоной значимых размеров, учет которой необходим) стадии развития макротрещин. При циклическом нагружении баббитовых образцов разрушение реализуется при $K_g = K_C \approx 3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Если из результатов эксперимента можно получить графики, подобные рис. 3б, то по углам наклона ветвей можно получить количественные характеристики рассеивания скоростей развития коротких и длинных трещин. Эти параметры можно использовать для статистического моделирования развития коротких и длинных трещин.

Добавим, что параметры развития трещин, приведенные на рис. 3б, получены по результатам испытаний образцов, представляющих собой двухслойную сталебаббитовую трубу, нагружаемую на стенде МУИ-6000 чистым изгибом с вращением [20]. Т.е. это результаты развития трещин в баббите при одноосном НДС. Модели развития трещин в слое ПС при многоосном НДС и с учетом расклинивающего влияния масла, попадающего в трещину, будут описаны позже.

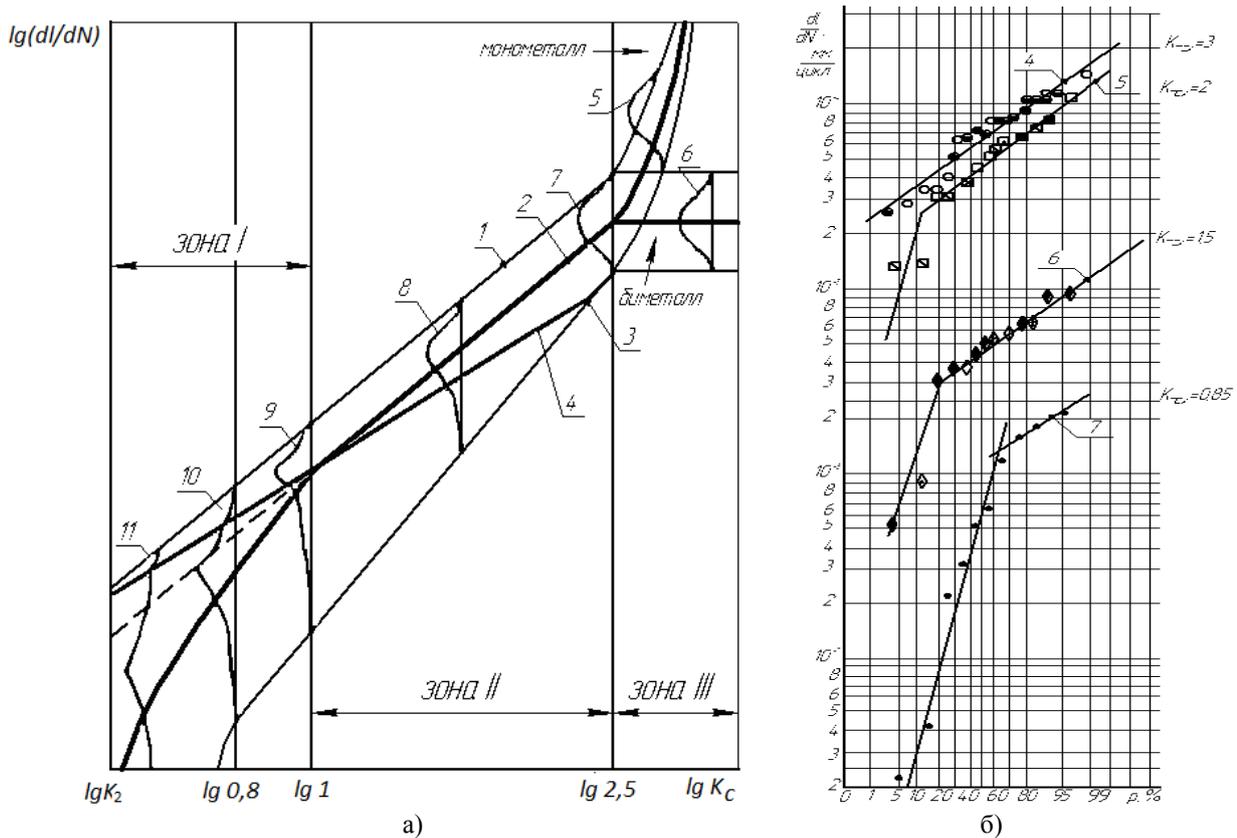


Рис. 3. Схематическое представление вероятностной кинетической диаграммы усталости (а) (1, 2, 3 - кинетические диаграммы усталости, соответствующие вероятностям $p = 99 \%$, $p = 50 \%$, $p = 1 \%$; 4 - линия, соединяющая границы перехода от одного нормального к другому нормальному закону распределения скоростей развития трещин при разных K_{\max} ; 5-11 - графики дифференциальных функций распределения скоростей развития трещин) и статистическое представление скоростей развития трещин разных размеров (разных значений КИН) (б)

Заключение

Из анализа литературных источников выявлены следующие положения. Трещины подразделяются на микроструктурно короткие, физически короткие и длинные (макротрещины).

На развитие микроструктурно коротких трещин в пределах зерна материала существенное влияние оказывает их ориентация относительно кристаллографических осей зерна, развиваются они по второй моде. Большинство таких трещин останавливаются, достигнув границы зерна, т.е. являются неэффективными. Учитывая, что во многих материалах изначально имеются трещиноподобные дефекты с размерами, сопоставимыми с размерами зерна, можно не моделировать развитие МКТ. Можно отнести этот этап к стадии накопления микроповрежденности,

выбрав за меру повреждения количество разрушенных отдельных элементов структуры (зерен).

Физически короткие трещины развиваются по первой моде, но вблизи их вершины имеется значительная пластическая зона. Для моделирования их развития следует применять УПМР. Применимы также подходы ЛМУР, в которых использованы корректирующие параметры, учитывающие размеры пластической зоны. В частности, нами использовано уравнение (2) для моделирования развития ФКТ в баббите.

Перспективны модели развития трещин, объединяющие несколько стадий их развития, в частности статистическая модель, предложенная автором и реализованная для баббита на основе олова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – 3-е изд. – М.: Либроком, 2017. – 544 с.
 2. Зернин, М.В. Трещиностойкость баббита B83 / М.В. Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (54). – С. 91-101.
 3. Зернин, М.В. Напряженно-деформированное состояние баббитовых слоев с трещинами / М.В. Зернин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (54). – С. 102-111.
 4. 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.
 5. 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.
 6. Алехин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.
 7. Головин, С.А. Микропластичность и усталость металлов / С.А. Головин, А. Пушкар. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
 8. Ботвина, Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов / Л.Р. Ботвина. – М.: Наука, 1989. – 230 с.
 9. Трошенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трошенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
 10. Доможиров, Л.И. Определение характеристик сопротивления многоциклового усталости металлов с позиций уточненных подходов линейной механики разрушения: дис. ... д-ра техн. наук / Л.И. Доможиров. – М., 1998. – 395 с.
 11. Miller, K.J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. Part 1. A review of the two recent books / K.J. Miller // *Fatigue on Eng. Mat. and Struct.* - 1987. - V. 10. - № 3. - P. 75-91.
 12. Эль-Хаддад, М.Х. Распространение коротких усталостных трещин / М.Х. Эль-Хаддад, К.Н. Смит, Т.Х. Топпер // Труды АОИМ. Теоретические основы инженерных расчетов. - 1979. - № 1. - С. 43-47.
 13. Миллер, К. Ползучесть и разрушение / К. Миллер. - М.: Металлургия, 1986. - 120 с.
 14. Miller, K.J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. Part 2. A general summary / K.J. Miller // *Fatigue on Eng. Mat. and Struct.* - 1987. - V. 10. - № 2. - P. 83-113.
 15. Ирвин, Дж.Р. Линейная механика разрушения, переход от вязкого разрушения к хрупкому и методы контроля разрушения / Дж.Р. Ирвин // Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. - М.: Мир, 1970. - С. 225-224.
 16. Анохин, А.А. Экспериментальные методы оценки трещиностойкости в области малых трещин / А.А. Анохин, В.Н. Козлов // Заводская лаборатория. – 1990. – № 3. – С. 57-61.
 17. Tailor, D. Fatigue crack propagation behaviour of short cracks: the effect of microstructure / D. Tailor, J.F. Knott // *Fatig. Engin. Mater. And Struct.* – 1981. – № 2. – P. 147-155.
 18. Степнов, М.Б. К исследованию стадии развития малых усталостных трещин / М.Б. Степнов, А.С. Серегин, А.Б. Лисин, Ю.П. Доронин // Машиноведение. - 1986. - № 4. - С. 52-55.
 19. Партон, В.З. Механика упругопластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. - М.: Наука, 1974. - 416 с.
 20. 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.
-
1. Morozov, E.M. *Contact Problems of Fracture Mechanics* / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – 3-d edition. – М.: Librokom, 2017. – pp. 544.
 2. Zernin, M.V. Crack resistance of B83 babbitt / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.1(54). – pp. 91-101.
 3. Zernin, M.V. Stress-strain state of babbitt layers with cracks / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.1 (54). – pp. 102-111.
 4. Zernin, M.V. Stress-strain state in anti-friction layer of slider bearing with cracks available / M.V. Zernin // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2017. – No.2 (55). – pp. 93-103.
 5. Zernin, M.V. Statistical principle to define limits of short crack development 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.
 6. Alyokhin, V.P. *Physics of Strength and Plasticity of Material Surface Layers* / V.P. Alyokhin. – М.: Science, 1983. – pp. 280.
 7. Golovin, S.A. *Micro-plasticity and Fatigue of Metals* / S.A. Golovin, A. Pushkar. – М.: Metallurgy, 1980. – pp. 240.
 8. Botvina, L.R. *Kinetics of Structural Material Destruction* / L.R. Botvina. – М.: Science, 1989. – pp. 230.
 9. Troshchenko, V.T. *Metal Crack-resistance at Cyclic Loading* / V.T. Troshchenko, V.V. Pokrovsky, A.V. Prokopenko. – Kiev: Scientific Thought, 1987. – pp. 256.
 10. Domozhiron, L.I. Definition of resistance characteristics of metal multi-cyclic fatigue from revised approaches position of linear mechanics of fracture:

- Thesis for Dr. Sc. Tech. Degree / L.I. Domozhirov. – М. – М., 1998. – pp. 395.*
11. Miller, K.J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. Part 1. A review of the two recent books / K.J. Miller // *Fatigue on Eng. Mat. and Struct.* - 1987. - V. 10. - № 3. - P. 75-91.
 12. El-Haddad, M.H. Propagation of short fatigue cracks / M.H. El-Haddad, K.N. Smith, T.H. Topper // *Proceedings of AOIM. Theoretical Fundamentals of Engineering Computations.* – 1979. – No.1. – pp. 43-47.
 13. Miller, K. *Creeping and Destruction* / K. Miller. – М.: Metallurgy, 1986. – pp. 120.
 14. Miller, K.J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. Part 2. A general summary / K.J. Miller // *Fatigue on Eng. Mat. and Struct.* - 1987. - V. 10. - № 2. - P. 83-113.
 15. Irving, J.R. Linear mechanics of destruction, transition from viscous destruction to brittle one and methods of destruction control / J.R. Irving // *Tests of High-Strength Metals for Fracture Viscosity at Flat Deformation.* – М.: Mir, 1970. – pp. 225-224.
 16. Anokhin, A.A. Experimental methods for assessment of crack-resistance in small crack area / A.A. Anokhin, V.N. Kozlov // *Factory Laboratory.* – 1990. – No.3. – pp. 57-61.
 17. Tailor, D. Fatigue crack propagation behaviour of short cracks: the effect of microstructure / D. Tailor, J.F. Knott // *Fatig. Engin. Mater. And Struct.* – 1981. – № 2. – P. 147-155.
 18. Stepanov, M.B. To stage investigation of small fatigue crack propagation / M.B. Stepanov, A.S. Seriyogin, A.B. Lisin, Yu.P. Doronin // *Machine Science.* – 1986. – No.4. – pp. 52-55.
 19. Parton, V.Z. *Mechanics of Elastic-Plastic Fracture* / V.Z. Parton, E.M. Morozov. – М.: Science, 1974. – pp. 416.
 20. Zernin, M.V. Experimental investigations of crack system formation in babbit layers applied on steel basis / M.V. Zernin, A.G. Kuzmenko, P.N. Savonichev // *Factory Laboratory.* – 1998. – Vol.64. – No.1. – pp. 38-44.

Статья поступила в редакцию 28.02.19.

*Рецензент: д.т.н., технический директор
ООО "Научно-производственное предприятие Дипром"*

Болдырев А.П.

Статья принята к публикации 23. 04. 19.

Сведения об авторах:

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

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