

Металлургия и материаловедение

УДК 624.04: 539.4

DOI: 10.12737/24899

М.В.Зернин

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ БАББИТА Б83

Описаны методики и приведены результаты экспериментальных исследований разрушения баббита Б83. На этапе обработки результатов эксперимента выполнены расчеты напряжений по методу конечных элементов. Получены характеристики разрушения баббита при статическом и циклическом нагружении.

Ключевые слова: баббит Б83, статическое нагружение, циклическое нагружение, характери-

стики разрушения, метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений, инвариантный J-интеграл, циклическая трещиностойкость.

M. V. Zernin

CRACK RESISTANCE OF BABBIT B83

Babbit 83 crack resistance test in accordance with SSR 25-506-85 was carried out. By finite element method there were defined values of stress intensity factors in flat samples with a grown crack. The fracture viscosity characteristics of babbit $K_C \approx 3,0 \div 3,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ are obtained. On the basis of a macro-fractographic analysis of wear fractures of a babbit sample and a finite element procedure for the definition of values of stress intensity factors the characteristics of cyclic crack resistance are obtained. It is

shown that a final fracture is realized at $K_g = K_C \approx 3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, and a transition from an elastic stage to the stage elasto-plastic development of a crack is realized at $K_{ep} \approx 2,0 \dots 2,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Key words: babbit B83, static loading, cyclic loading, disintegration characteristics, finite element method, stress intensity factor, invariant J-integral, cyclic crack resistance.

Постановка задачи

На кафедре «Динамика и прочность машин» БГТУ в течение многих лет выполняются исследования [1-7] различных механических свойств антифрикционных материалов (АФМ) для подшипников скольжения (ПС). В частности, исследованы свойства баббита Б83, содержащего кроме Sn 10...12% Sb и 5,5...6,5% Cu и представляющего собой твердый раствор Sb и Cu в олове (α -фаза). В этом твердом растворе находятся интерметаллиды Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 в виде дендритных образований (γ -фаза) и кубовидные кристаллы интерметаллидов SbSn (β -фаза). Этот баббит проявляет отличные антифрикционные качества, но прочностные его свойства сравнительно низки. Нами систематизированы свойства баббита в монографии [6], исследования свойств продолжаются [7]. До настоящего времени не были выяснены ха-

рактеристики разрушения баббита при статическом и циклическом его нагружении.

АФМ применяются в ПС в виде тонкого слоя, нанесенного на более прочную (стальную или бронзовую) основу. Нам представляется рациональной следующая система методик экспериментальных исследований АФМ. При испытаниях образцов АФМ следует определить основные его прочностные характеристики. Далее при испытаниях слоев АФМ, нанесенных на стальную основу, но при отсутствии смазочного материала и контактного нагружения следует определить прочностные характеристики слоев АФМ. Такие испытания можно выполнять в строго контролируемых условиях нагружения материала, а испытания слоев АФМ при наличии смазывающего материала и контактирования поверхностей использовать для оценки

влияния этих факторов на полученные прочностные характеристики. При этом желательно тоже в максимальной степени контролировать условия нагружения

Критерии разрушения тел с трещинами

Фактически всегда в реальных материалах имеются исходные трещиноподобные дефекты. В процессе эксплуатации появляются новые дефекты и все дефекты увеличиваются в размерах (развиваются). Небольшое количество трещиноподобных дефектов становятся макротрещинами, которые также развиваются. Можно выделить стадию устойчивого развития макротрещин, после которой одна из трещин (или несколько) вступает в стадию неустойчивого развития, переходящую в долом образца (разделение его на две или больше частей). Этот переход осуществляется при некотором критическом значении параметров, характеризующих напряжение у вершины трещины. Для статического нагружения критерий разрушения в общем виде записывается так [6; 8; 9]:

$$P(p, l) \leq P_c. \quad (1)$$

Здесь $P(p, l)$ обозначена критериальная величина, зависящая от параметров внешней нагрузки p и длины трещины l . Справа в выражении (1) стоит та же критериальная величина P , но соответствующая

АФМ. В настоящей статье описано получение характеристик трещиностойкости баббитовых образцов.

предельному (критическому) состоянию материала и поэтому обозначенная P_c . Эта величина определяется экспериментально. Как правило, она постоянная и считается механической характеристикой материала, по которой оценивают сопротивление материала росту трещины (его трещиностойкость). Если в выражении (1) оказывается знак «меньше», то трещина не растёт; если равенство, то наступает критическое (предельное) состояние равновесия, трещина страгивается, образец разрушается.

В задачах механики разрушения необходимо находить решение соответствующей математической задачи теории упругости для тела с разрезами нулевой толщины. Такие задачи относятся к сингулярным краевым задачам, т.е. к граничным задачам с особыми точками. К особым точкам относится точка вершины трещины (рис. 1б, в), поскольку решения теории упругости для напряжений и деформаций в этой точке стремятся к бесконечности (рис. 2а).

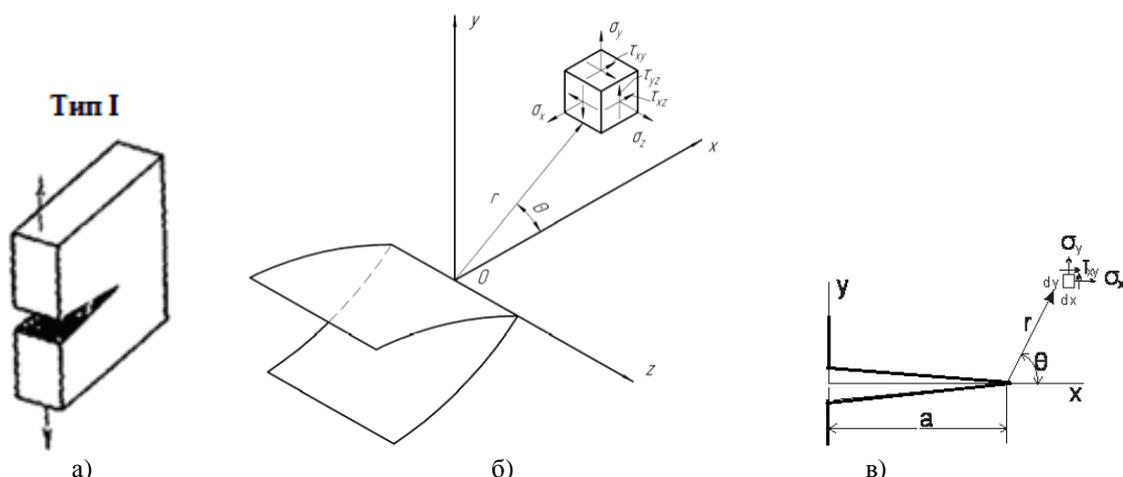


Рис. 1. Схематическое изображение трещины нормального отрыва (а) и компоненты напряжений вблизи вершины трещины: б - трехмерная схема; в - двухмерная схема

Результаты решения задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) у вершины трещины нормального отрыва (рис. 1а) можно представить в виде [8; 9]

$$U_i = \frac{K}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} F_i(\mu, \theta); \quad (2)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \varphi_{ij}(\theta), \quad (4)$$

где r и θ - полярные координаты (рис. 1б, в); U_i - компоненты поля перемещений; σ_{ij} - компоненты поля напряжений (рис. 1б); ε_{ij} - компоненты поля деформаций; G - модуль упругости при сдвиге; μ - коэффициент Пуассона.

При решении упругой задачи о НДС у вершины трещины получаем бесконечное значение напряжений (рис. 2а). Но в реальных случаях (рис. 2б) возникает пла-

стическая зона. Размер зоны пластичности при вершине трещины можно оценить, если определить расстояние от вершины трещины r_p , на котором упругое напряжение σ_y превышает предел текучести σ_{ys} (рис. 2б). Если пластическая зона у вершины трещины невелика и игнорируется или каким-то образом корректируется, то говорят о линейной механике разрушения. Если пластическая деформация в теле с трещиной развита настолько, что ее игнорирование невозможно, то применяются методы нелинейной механики разрушения.

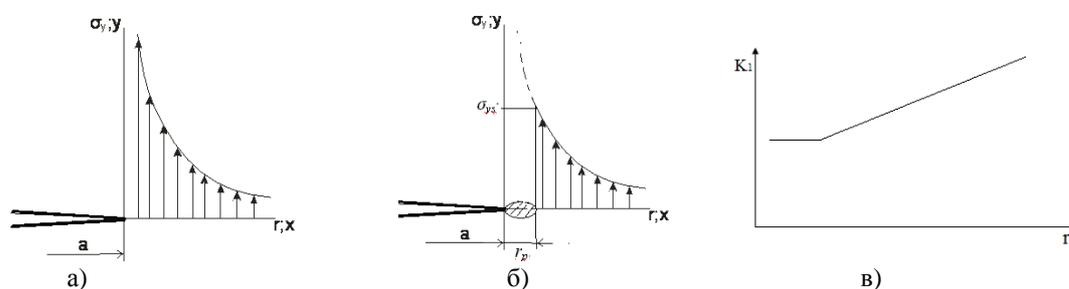


Рис. 2. Асимптотический (а) и реальный (б) графики напряжений вблизи вершины трещины и график расчетных значений коэффициента интенсивности напряжений (в)

Коэффициент K , входящий в выражения (2-4), характеризует величину перемещений, напряжений и деформаций в окрестности трещины и называется *коэффициентом интенсивности напряжений* (КИН). Формулы (2-4) являются асимптотическими и отображают напряженно-деформированное состояние только вблизи вершины трещины. На рис. 2а приведен для примера график изменения напряжений вблизи трещины.

Различают несколько типов деформации трещины, в соответствии с которыми ставят нижний индекс при коэффициенте интенсивности напряжений. В наших испытаниях был реализован тип I - нормальный отрыв. Перемещения берегов трещины происходят вдоль нормали к исходной поверхности трещины (рис. 1а). При этом типе деформации критерий разрушения выглядит как $K_I \leq K_{IC}$, где K_{IC} - *предельный коэффициент интенсивности напряжений*, называемый также *вязкостью разрушения*. Эта механическая ха-

рактеристика материала характеризует способность материала сопротивляться распространению трещины при хрупком разрушении.

КИН можно вычислить по любой из формул (2-4), если определены соответствующие поля (перемещений, деформаций или напряжений). При этом можно брать любую из точек, входящих в зону асимптоты (рис. 2а). На наш взгляд, целесообразно вычислять КИН в нескольких точках этой зоны. Стабильность значения КИН может являться критерием достаточной точности решения задачи по определению соответствующего поля. А участок стабильного значения КИН является участком, в пределах которого локализуется возмущенное поле НДС у вершины трещины (рис. 2в). В промышленных программных пакетах реализованы такие методы. В частности, в ANSYS [10] реализован расчет КИН на основе формулы (2), т.е. на основе рассчитанного по методу ко-

нечных элементов (МКЭ) поля перемещений.

В качестве альтернативной характеристики трещиностойкости используется *энергетический инвариантный интеграл*. Составляют уравнение баланса энергии для области вокруг трещины, вырезанной из плоского тела, и получают разность энергий тела до и после приращения трещины. Постулируется, что эта разность энергий расходуется на соответствующее приращение площади трещины [8; 9].

$$J = \int_{\Gamma} (Wdy - \sigma_{ij} n_j \frac{du_i}{dx} ds), \quad (5)$$

где Γ – контур, охватывающий вершину трещины, начинающийся на нижней поверхности трещины и заканчивающийся на верхней; W – удельная потенциальная энергия деформации.

Энергетический интеграл (5), иначе *J-интеграл* (иногда *интеграл Черепанова - Райса* [8;9]), не зависит от выбора контура интегрирования Γ , поэтому и называется инвариантным. Однако есть рекомендация

в случае наличия пластической зоны, окружающей вершину трещины, выбирать контур интегрирования внутри пластической зоны на расстоянии, равном примерно трем раскрытиям трещины в вершине. В промышленных программных пакетах тоже реализована методика расчета этой характеристики трещиностойкости [10].

При циклическом нагружении материала высоким уровнем 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. В поликристаллических телах множество малых трещин могут стартовать одновременно (рис. 3), но большинство из них тормозятся, и только одна из трещин при мягком (силовом) режиме нагружения со временем начинает доминировать над остальными и вызывает разрушение.

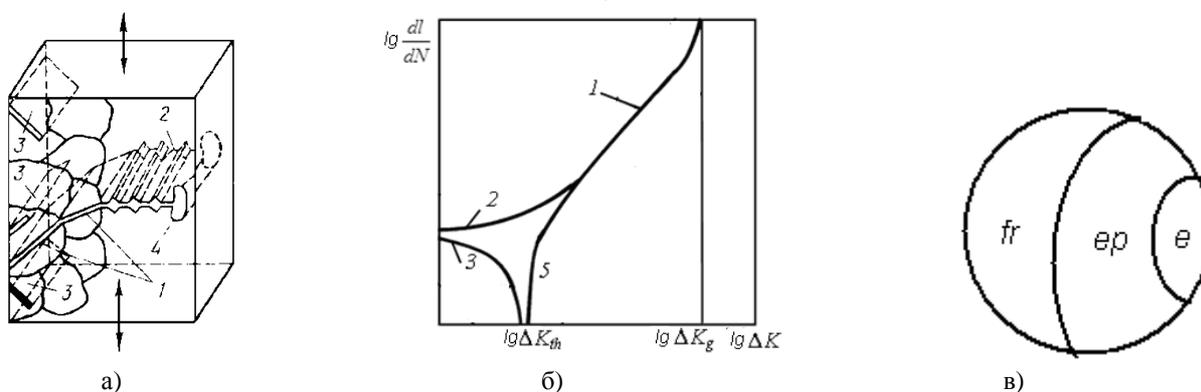


Рис. 3. Усталостные трещины, распространяющиеся с поверхности (а), схематическое изображение обобщенной кинетической диаграммы развития усталостных трещин (б) и зоны в усталостном изломе (в)

На рис. 3а показаны: 1 - этап развития дефектов с влиянием металлографических особенностей поликристаллического материала; 2 - этап развития макротрещины; 3 - нераспространяющиеся (неэффективные) трещины; 4 - пластическая зона в вершине макротрещины. Если размеры пластической зоны малы, то применима линейная механика усталостного разрушения. Когда размерами пластической зоны нельзя пренебречь, трещина растет по закономерностям нелинейной механики разрушения. Различия развития коротких и

длинных трещин можно объединить на схеме кинетической диаграммы усталости (рис. 3б). Здесь приведена так называемая обобщающая (обобщенная) схема стадий развития усталостных трещин, основанная на достаточно представительных экспериментальных исследованиях и предложенная в нашей монографии [6].

По горизонтальной оси отсчитывается логарифм размаха КИН ΔK , по вертикальной – логарифм скорости развития трещины. На рис. 3б линиями показаны: 1 - кинетическая диаграмма, характерная для

макротрещин; 2 – диаграмма развития коротких эффективных трещин, которые перерастают в макротрещины; 3 – диаграмма развития неэффективных трещин, которые останавливаются. Описание процессов развития такой совокупности трещин возможно с применением статистических моделей. Для баббита такие исследования [3] нами выполнялись на биметаллических образцах, в которых баббитовый слой нанесен на более прочную стальную основу.

В усталостном изломе образца с круглым поперечным сечением можно выделить три зоны (рис. 3в): зона развития трещины с несущественным влиянием пластических деформаций (условно названная упругой) e ; зона развития трещи-

ны с влиянием пластичности ep ; зона долома образца fr .

В механике развития длинных трещин усталости принято, что существует некоторое *пороговое значение КИН* ΔK_{th} – точка 5 на оси абсцисс (рис. 3б), левее которой трещины не развиваются. Уравнение линии 1 (развитие макротрещин) мы получили по результатам экспериментальных исследований биметаллических образцов [3]. Рассмотрим здесь только получение *критического значения КИН* ΔK_g и значения КИН K_{ep} , соответствующие переходу от упругой к упругопластической стадии развития трещины усталости. Эти параметры можно определить на основе макрофрактографических исследований разрушенных монометаллических образцов.

Получение характеристик статической трещиностойкости баббита

Предел трещиностойкости определяли по результатам статических испытаний образцов с бесконечно острым надрезом. Такой острый надрез обычно получают в результате выращивания усталостной трещины от специально нанесенного концен-

тратора. В нашем случае трещину выращивали в плоских образцах с краевым надрезом (рис. 4). Согласно методическим указаниям [11], такие образцы относятся к 5-му типу.

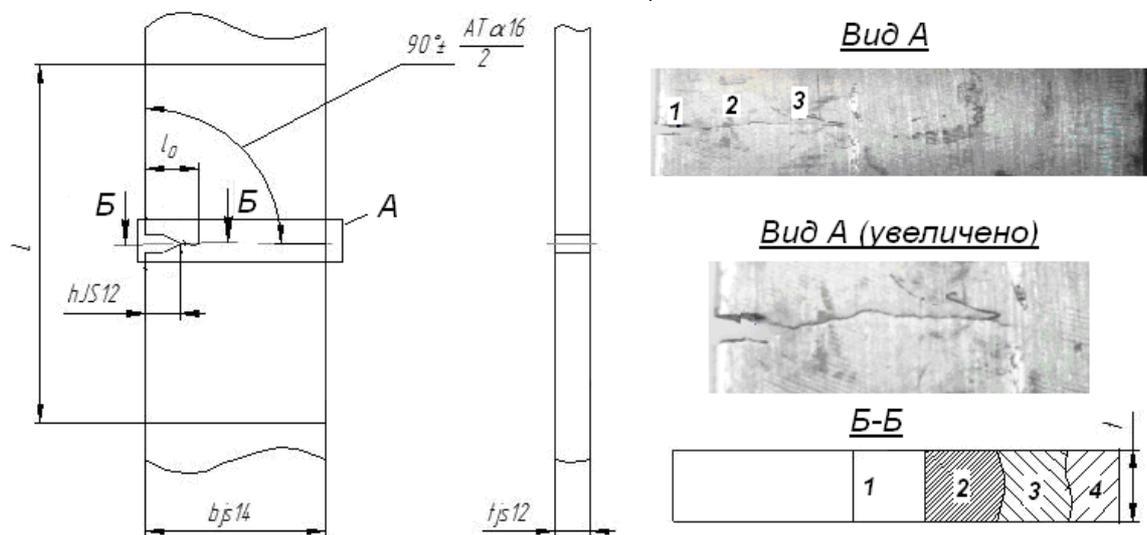


Рис. 4. Плоский образец с трещиной для получения характеристик статического разрушения

Плоские образцы были выполнены из баббита Б83. После нанесения на них краевого надреза (зоны 1 на видах А и Б) выполнены усталостные испытания их по схеме чистого изгиба с целью выращивания трещины. Выращивание усталостной трещины производилось в два этапа: первый – зарождение и развитие трещины при

высоком уровне нагружения (зоны 2 на видах А и Б), второй – развитие и стабильный рост при низком уровне напряжений (зоны 3 на видах А и Б). В результате статических испытаний на трещиностойкость появлялась зона долома (зона 4 на виде Б).

Для определения характеристик трещиностойкости использована машина с

электрогидравлическим приводом, метрологические параметры которой соответствуют требованиям ГОСТа [11]. При растяжении образцов до разрушения выполнялась запись значений силы и перемещений захватов в excel-файл. Раскрытие трещины определялось экспериментально-расчетным путем: выполнялся расчет по МКЭ для выявления упругой составляю-

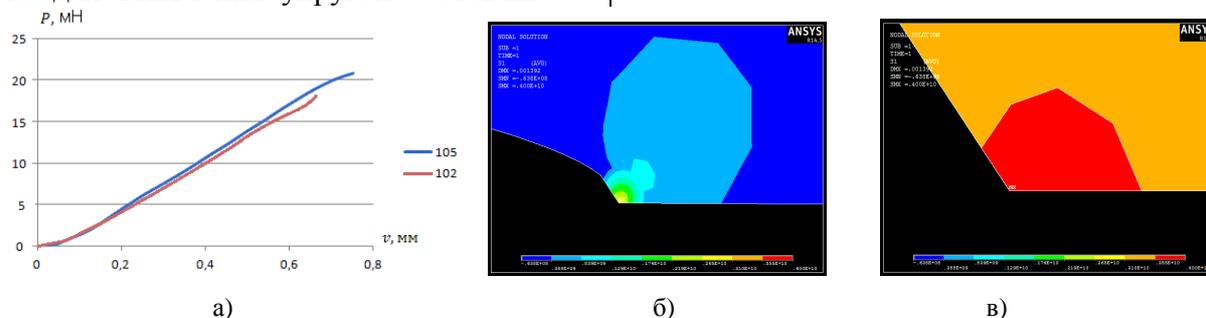


Рис. 5. Диаграмма деформирования в координатах P - v (а) и картина первых главных напряжений вблизи трещины (б) и крупно непосредственно у вершины (в)

Из графика в координатах P - v следует, что мы имеем дело с диаграммой первого типа согласно классификации [11], что соответствует хрупким материалам. Для металлов, имеющих диаграммы деформирования этого типа (а следовательно, и для баббита Б83), предел трещиностойкости равен критическому коэффициенту интенсивности напряжений $K_C = K_{IC}$ при данной длине трещины.

Критическое значение КИН определяли несколькими методами. В обработке результатов испытаний и выполнении расчетов по МКЭ принимал участие инженер Е.Ю.Барышев. При вычислении КИН прямым методом [11] по значениям нагрузки P_C и длины трещины l вычисляли величину K_C по формуле

$$K_C = \frac{P_C l^{1/2}}{t \cdot b} Y_5^i, \quad (6)$$

где параметр $Y_5^i = 1,99 - 0,41(l/b) + 18,7(l/b)^2 - 38,48(l/b)^3 - 53,85(l/b)^4$

В программном пакете ANSYS реализована возможность вычисления значения КИН из формулы (2) и с использованием энергетического критерия трещиностойкости (5). В нем используется связь между инвариантным энергетическим интегралом J , производной потенциальной

шей деформации образцов; эта составляющая вычиталась из экспериментально определенных перемещений захватов. В итоге получены диаграммы P - v , где P - сила, приложенная к образцу, v - раскрытие трещины. На рис. 5 приведены такие диаграммы для двух образцов (с номерами 102 и 105).

энергии тела Π по длине трещины l и коэффициентом интенсивности напряжений K_I . При вычислении подынтегральных выражений перемещения, деформации и напряжения должны быть приведены к системе координат, связанной с вершиной трещины. Однако в пакете ANSYS контур интегрирования задается номерами узлов, через которые этот контур должен проходить [10]. Таким образом, контур в общем случае может пересекать стороны элементов, располагающиеся между заданными узлами, ANSYS автоматически выполняет интерполяцию. Для реализации этих методик были построены конечноэлементные сетки с мелкими конечными элементами вблизи вершины трещины. Картины напряжений приведены на рис. 5б, в. Результаты вычислений K_C для двух образцов представлены в табл. 1. Видно, что величина $K_C \approx 3,0...3,2 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ мало зависит от применяемого метода вычисления.

Таблица 1
Результаты расчета K_C

Методы расчета	$K_C, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	
	№ 102	№ 105
По формуле (6)	3,008	3,20
ANSYS, метод перемещений	3,03	3,21
ANSYS, метод J-интеграла	2,975	3,168

Макрофрактографический анализ усталостных изломов баббитовых образцов

Нами испытаны при циклическом нагружении [6] два типоразмера образцов из баббита: с круглоцилиндрическим сечением и с кольцевым поперечным сечением. Образцы доведены до разрушения при циклическом нагружении симметричным циклом при различных значениях амплитуды напряжений, построены кривые усталости [6]. Здесь на основе исследований изломов оценим *критическое значение КИН ΔK_g* , соответствующее переходу к стадии долома, и значение КИН K_{ep} , соответствующее переходу от упругой к упругопластической стадии развития трещины.

Изломы рассматривались при незначительном увеличении (рис. 6а), что позволило представить стадии развития трещин в виде, показанном на рис. 6б. При развитии трещины усталости по упругому механизму фронт можно схематизировать

участком полуэллипса с близкими значениями полуосей (фактически дугой окружности). По мере увеличения пластической зоны у вершины трещины (зона упругопластического развития) радиус такой дуги увеличивается (рис. 6б). Для большинства изломов точнее можно оценить только очертания границы перехода от упругой к упругопластической стадии развития трещины. Таким параметром выбран радиус дуги окружности r_{ep} , разделяющей указанные две зоны. Можно для этого размера трещины подсчитать КИН K_{ep} и сопоставить с критическим значением КИН ΔK_g . Определенный по указанной границе смены стадий развития трещин КИН K_{ep} должен быть несколько меньше ΔK_g .

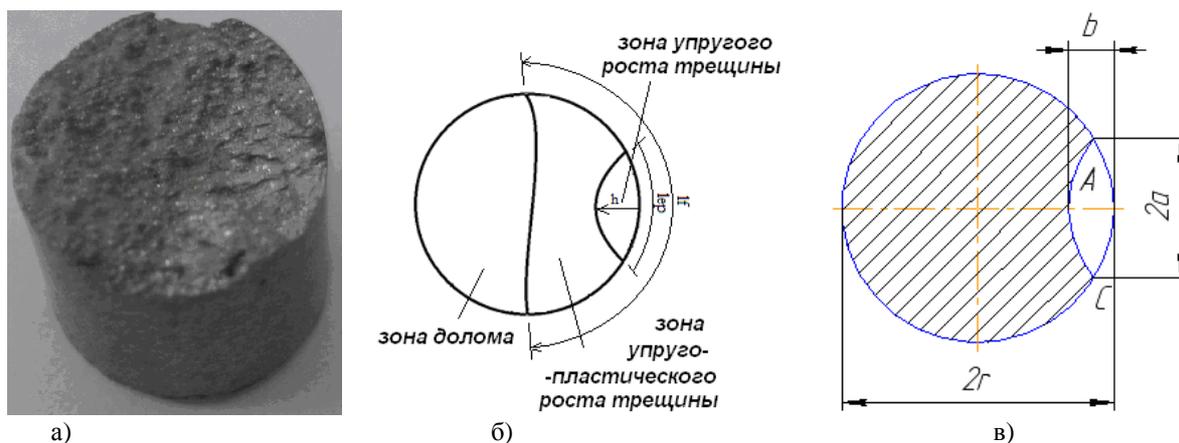


Рис. 6. Фотография усталостного излома образца с круглым поперечным сечением (а), схематизация границ различных стадий развития трещины (б) и схема для определения КИН (в)

Макрофрактографический анализ изломов образцов позволил выделить несколько зон усталостных повреждений. Более гладкая и блестящая область излома соответствует развитию трещин преимущественно упругим механизмом. Трещина в образце распространяется как полуэллипс, часто оси полуэллипса бывают равны, как следствие, фронт трещины представляет собой полуокружность с радиусом r . Далее осуществляется переход к упруго-пластической стадии развития трещины, которая характеризуется более

темным цветом излома. Эта стадия соответствует возрастающей ветви кривой 1 на рис. 3б. По мере развития трещины размеры живого сечения уменьшаются, а реальные напряжения возрастают. На этой стадии процесс роста трещины значительно ускоряется. Фронт трещины переходит от эллиптической к прямолинейной форме, и происходит статический долом образца. Зона долома имеет такой же внешний вид, как и статический излом образца. Внешне граница зоны долома стремится к прямой линии.

Итак, задача формулируется следующим образом: по усталостным изломам образцов определить геометрию границы перехода от упругой к упругопластической стадии развития трещины; рассчитать значения КИН K_{ep} для таких трещин; по возможности определить параметры границы перехода к стадии долома и рассчитать КИН для таких трещин; сопоставить определенные таким образом характеристики циклической трещиностойкости с характеристикой статической трещиностойкости K_C .

Для образцов круглого поперечного сечения имеются формулы [12] для вычисления КИН на основе представления формы трещины по схеме, приведенной на рис. 6в:

$$K_I = F_I \sigma \sqrt{\pi b} \quad (7)$$

$$F_I = f(b/a, b/r).$$

Как и большинство формул для КИН, эта формула получена на основе выполнения большого количества расчетов НДС вблизи вершины трещины по МКЭ, а потом результаты аппроксимированы фор-

мулой (7) с использованием функции F_I . Но значения функции F_I приведены в [12] в виде таблицы для некоторого количества сочетаний геометрических параметров трещины a , b и r . Пользоваться такой таблицей неудобно. Поэтому решено определять значения КИН по МКЭ, а формулу (7) использовать в качестве теста для наших конечноэлементных моделей. В выполнении расчетов по МКЭ принимали участие инженеры Д.О.Аниканов и В.В.Лукьянова (Азарова).

Расчетная схема цилиндрического образца с трещиной изображена на рис. 7а. Из условий симметрии рассматривалась половина образца с назначением связей, перпендикулярных плоскостям симметрии. В пределах трещиноподобной полости связи, перпендикулярные этой полости, отсутствовали. Таким образом моделировался бесконечно острый разрез, по форме близкий к полуэллипсу. К противоположному торцу модели прикладывалась распределенная нагрузка.

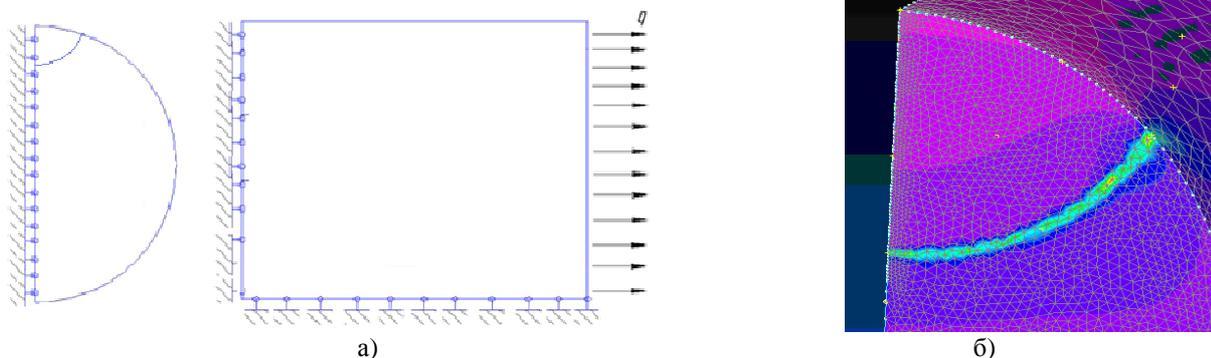


Рис. 7. Расчётная схема цилиндрического образца с трещиной (а) и фрагмент конечноэлементной сетки (б)

Параметры сетки (рис. 7б) подбирались таким образом, чтобы результаты совпадали с результатами расчетов по формуле (7). Кроме того, контролировалось, чтобы у вершины трещины имелся участок стабильного значения КИН, аналогичный рис. 2в. После такого подбора параметров расчетной схемы выполнена серия расчетов для определения K_{ep} для конкретных значений радиусов r_{ep} , взятых из анализа изломов конкретных образцов

(табл. 2). Также выполнены испытания на усталость образцов с диаметром сечения 15 мм. Анализ их результатов показал аналогичный итог. Долом образца реализуется при $K_g = K_C \approx 3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, переход к стадии упругопластического развития трещины реализуется при $K_{ep} \approx 2,0 \dots 2,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Таблица 2

Характеристики границы перехода от стадии упругого к стадии упругопластического развития трещин в образцах с круглым поперечным сечением диаметром 12 мм

Амплитуда силы, кН	Амплитуда напряжения σ_a , МПа	№ образца	$N \cdot 10^{-3}$, циклов	r_{ep} , мм	K_{ep} , МПа $\sqrt{м}$
5,0	43,4	003	22,5	~1	2,053
		021	12,4	~1	2,053
4,5	39,05	020	18,2	~2	2,502
		029	22,7	~2	2,502
4,0	34,71	017	73,2	~2	2,224
		031	18,4	~2	2,224
3,5	30,37	004	105	~3	2,455
		017	55,1	~2,5	2,2
		023	29,6	~3,5	2,709
3,0	26,04	021	44,3	~3,5	2,709
		002	550	~4	2,54
2,5	21,7	027	162,5	~5	2,977
		014	500	~6	2,845
		024	518	~5	2,481
		025	457	~6	2,845

При рассмотрении изломов трубчатых образцов (рис. 8а) принята схематизация отдельных зон излома по рис. 8б. Выявленные зоны в изломе трубчатых образцов можно охарактеризовать так же, как и для цилиндрических образцов: имеется граница l_{ep} перехода к стадии упругопластического развития трещины и l_f - длина

трещины, соответствующая долому образца. Количественные характеристики зон упругого и упругопластического развития трещин приведены в табл. 3. Там же приведены значения КИН, соответствующие границе перехода от упругого к упругопластическому механизму развития трещины.

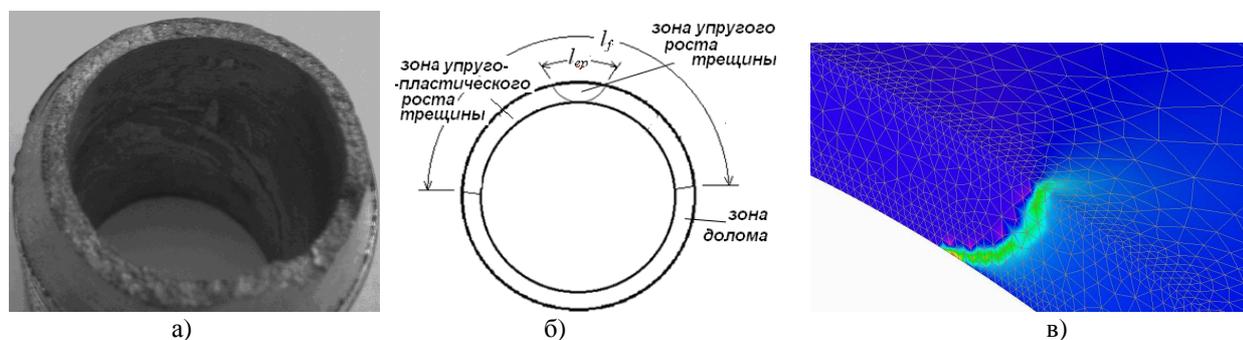


Рис. 8. Фотография усталостного излома образца с кольцевым поперечным сечением (а), схематизация границ различных стадий развития трещины (б) и фрагмент конечноэлементной сетки для определения КИН (в)

Также выполнены испытания на усталость образцов с двумя другими сочетаниями внешнего и внутреннего диаметров поперечного сечения. Анализ их результатов показал аналогичный итог. Долгом об-

разца реализуется при $K_g = K_C \approx 3$ МПа $\sqrt{м}$, переход к стадии упругопластического развития трещины реализуется при $K_{ep} \approx 2,0...2,8$ МПа $\sqrt{м}$.

Таблица 3

Характеристики границы перехода от стадии упругого к стадии упругопластического развития трещин в образцах с кольцевым поперечным сечением с диаметрами: внешним - 32 мм и внутренним - 29,4 мм

Амплитуда силы, кН	Амплитуда напряжения σ_a , МПа	№ образца	$N \cdot 10^{-3}$, циклов	l_{ep} , мм	K_{ep} , МПа $\sqrt{м}$
4,5	35,2	14	5,6	~1,5	2,416
4,0	31,3	05	76,0	~2	2,516
		24	20,0	~2,5	2,884
3,5	27,38	15	58,5	~2,5	2,523
3,0	23,43	02	100	~4	2,99
2,5	19,55	07	220	~5	2,95
2,0	15,95	25	340	~6,5	2,966

Заключение

Выполнены испытания на статическую трещиностойкость баббита Б83 в соответствии с ГОСТ 25-506-85. Получены характеристики вязкости разрушения $K_c \approx 3,0...3,2$ МПа $\sqrt{м}$. Проанализированы результаты циклических испытаний образцов из баббита Б83. На основе макрофрактографических исследований уста-

лостных изломов и их конечноэлементного анализа получены характеристики циклической трещиностойкости. Показано, что долом образца реализуется при $K_g = K_c \approx 3$ МПа $\sqrt{м}$, а переход к стадии упругопластического развития трещины реализуется при $K_{ep} \approx 2,0...2,8$ МПа $\sqrt{м}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- 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.
- 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.
- Зернин, М.В. Экспериментальная оценка влияния асимметрии цикла нагружения на усталостную долговечность баббитовых слоев /М.В.Зернин // Заводская лаборатория. - 1998. - Т. 64. - № 4. - С. 48-52.
- Зернин, М.В. Контактная ползучесть баббитового слоя подшипников скольжения / М.В.Зернин, А.Г.Кузьменко, А.В.Яковлев // Заводская лаборатория. - 2008. - Т. 74. - № 5. - С. 58-62.
- Морозов, Е.М. Контактные задачи механики разрушения / Е.М. Морозов, М.В. Зернин. - 2-е изд. - М.: Либроком, 2010. - 544 с.
- Зернин, М.В. Критерии эквивалентности напряженных состояний и обобщенная диаграмма деформирования баббита на основе олова /М.В.Зернин//Вестник Брянского государственного технического университета . -2014. - №3. - С. 26-34.
- Брок, Д. Основы механики разрушения /Д.Брок. - М.: Высш. шк., 1980. - 368 с.
- Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения/ Г.П.Черепанов. - М.: Наука, 1974. - 640 с.
- Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера /Е.М.Морозов.- М.: Ленанд, 2010. - 456 с.
- ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
- Мураками, Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений /Ю.Мураками. - М.: Мир,1990. - 566 с.
- Zernin // Factory Laboratory. - 1984. - № 8. - pp. 77-79.
- Zernin, M.V. To investigation of fatigue life of babbitt layer in heavy-loaded slider bearings /

- M.V.Zernin, A.V.Yakovlev// Factory Laboratory. - 1997. - № 11. - pp. 39-47.
3. Zernin, M.V. Experimental investigations 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. Zernin, M.V. Experimental assessment of asymmetry impact of loading cycle upon fatigue life of babbitt layers /M.V.Zernin // Factory Laboratory. - 1998. - Vol. 64. - № 4. - pp. 48-52.
 5. Zernin, M.V. Contact creep of babbitt layer in slider bearings / M.V.Zernin, A.G.Kuzmenko, A.V.Yakovlev // Factory Laboratory. - 2008. - Vol. 74. - № 5. - pp. 58-62.
 6. Morozov, E.M. Contact Problems of Destruction Mechanics / E.M. Morozov, M.V. Zernin. – 2-d ed. – M.: Librocom, 2010. – pp. 544.
 7. Zernin, M.V. Criteria of stressed state equivalence and generalized diagram of tin-based babbitt deformation /M.V.Zernin// Bulletin of Bryansk State Technical University. - 2014. - №3. - pp. 26-34.
 8. Broek, D. Fundamentals of Destruction Mechanics /D.Broek. – M.: Higher School, 1980. – pp. 368.
 9. Cherepanov, G.P. Mechanics of Brittle Fracture / G.P.Cherepanov. – M.: Science, 1974. – pp. 640.
 10. Morozov, E.M. ANSYS in Engineer's Hands /E.M.Morozov. – M.: Lenand, 2010. – pp. 456.
 11. SSR 25.506-85. Computations and Strength Tests. Methods of Metal Mechanical Tests. Definition of Crack Resistance Characteristics (fracture toughness) at Static Loading.
 12. Murakamy, Yu. Reference Book on Stress Intensity Factors /Yu.Murakamy. - M.: Мир, 1990. – pp. 566.

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.

Брянского государственного технического университета, e-mail: zerninmv@mail.ru.