

УДК 621.539.43.001.24

**ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МЕХАНИКЕ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ
НА СТАДИИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН**

Часть 1. Методика исследования распространения трещин при циклическом нагружении

© Александр Никитович Романов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

alrom37@mail.ru

***Аннотация.** Предложена методика исследования скоростей развития трещин при циклическом нагружении в широком диапазоне температур. Приведены основные силовые и деформационные параметры для описания скоростей развития трещин, кинетики накопления повреждений и предельных состояний.*

***Ключевые слова:** циклическая нагрузка, распространение трещин, метод формирования, раскрытие трещин, скорость распространения трещин.*

**MATERIALS SCIENCE PROBLEMS IN MECHANICS OF DEFORMATION
AND FRACTURE AT STAGE OF CRACKS PROPAGATION**

Part 1. The study's method of the cracks propagation at the cyclic loading

© Alexander Romanov

IMASH RAN, Moscow, Russia

alrom37@mail.ru

***Abstract.** The technique of research of speeds of development of cracks at cyclic loading in the wide range of temperatures is offered. The key power and deformation parameters for the description of speeds of development of cracks, kinetics of accumulation of damages and limit states are specified.*

***Key words:** cyclic loading, cracks propagation, method of heeting, crack's opening, speed of crack propagation.*

В отличие от ранее рассмотренных процессов деформирования конструкционных материалов на стадии до образования трещин [1-15] данный цикл связан с рассмотрением процессов разрушения на стадии развития трещин при статическом и циклическом нагружении.

Одной из важных задач механики деформирования и разрушения является расчетное и экспериментальное исследование закономерностей развития трещин при однократном и циклическом нагружении. Решение этой задачи становится все более актуальным в связи с непрерывным повышением рабочих параметров (нагрузок и температур) машин и

конструкций, применяемых в энергомашиностроении (в том числе в реакторостроении), в летательных аппаратах, в химическом и металлургическом оборудовании. Рабочие температуры для несущих элементов указанных машин и конструкций составляют 250-600⁰C и более, числа циклов нагружения 10-10⁴ и более. Повышение нагрузок, температур и времени нагружения приводит к увеличению неупругих деформаций за счет статической и циклической ползучести, что, в свою очередь, определяет более раннее образование и более интенсивное развитие трещин. [1-15].

При исследовании кинетики трещин статического и циклического разрушения используются критерии и методы линейной и нелинейной механики разрушения. К числу этих критериев относятся силовые (коэффициенты интенсивности напряжений K_c), деформационные (критическое раскрытие трещин δ_c , размер пластической зоны r_T , перемещение берегов трещины) и энергетические (энергия продвижения трещины γ_k , G_c и J_c – интеграл).

Определение указанных критериев связано с измерением длины трещины l , расчетом номинального напряжения $\Delta\sigma_n$ (для определения ΔK_I), измерением размаха номинальной упругопластической деформации Δe_n , размаха перемещений берегов трещины $\Delta\delta$ (раскрытие трещины), размера пластической зоны r_T по мере увеличения числа циклов нагружения N . Для измерений используются различные динамометрические устройства (механические, гидравлические, упругие с датчиками сопротивления). Для измерения Δe_n применяются механические, электромеханические, оптические, фотоэлектронные, индуктивные и другие типы деформометров. Перемещения также измеряются механическими, оптическими, электромеханическими, индуктивными, емкостными устройствами, как правило, с малыми базами (от 0,5 до 2-3 мм). Размер пластической зоны r_T может быть определен с помощью интерферометров и металлографических микроскопов. Для измерения длин трещин l наибольшее применение получили следующие методы: оптические, электросопротивления, ультразвуковые, токовихревые, датчиков последовательного разрыва, киносъемки и др.

При такого рода исследованиях в системах нагружения предусмотрена возможность проведения статического и циклического деформирования с варьируемыми скоростями и коэффициентами асимметрии цикла, с обеспечением выдержек при заданных деформациях или напряжениях, с автоматическими измерениями и регистрацией усилий и номинальных деформаций [15].

Для измерения длин трещин при высоких температурах в основном используются оптические и ультразвуковые методы, метод электропотенциалов и электросопротивления. Для измерения местных упругопластических деформаций Δe_{max} в вершине трещины, а также распределения этих деформаций в связи с определением коэффициентов интенсивности деформаций ΔK_I наиболее приемлемым оказывается метод прецизионных делительных сеток. Этот метод позволяет осуществлять измерения на базах от 0,02 до 0,1 мм непосредственно у вершины трещины. Диапазон деформаций, измеряемых этим методом, лежит в пределах от 1-2 до 50-70%. При этом применяемые оптические и другие средства для измерения размеров деформируемых сеток могут одновременно использоваться для измерения длины трещин l и раскрытия трещин δ_T .

Наибольшее применение для изучения развития трещин в широком диапазоне температур получили плоские образцы с начальными трещинами при внецентренном растяжении. Однако образцы такого типа целесообразно использовать при сравнительно низких уровнях размахов коэффициентов интенсивностей напряжений, когда размеры пластических зон r_T меньше длины трещины l и при положительных значениях коэффициентов асимметрии по напряжениям. При образовании в опасном сечении развитых упругопластических деформаций и деформаций ползучести и при знакопеременном нагружении следует применять осевое нагружение образцов с регистрацией номинальных деформаций. При

однократном и малоцикловом нагружении в условиях комнатных температур используются плоские образцы с симметричными центральными или боковыми трещинами. Прецизионные делительные сетки с малым шагом наносятся в зоне трещин на боковых полированных поверхностях образцов. При повышенных температурах в силу определенных трудностей с получением равномерного распределения температур по ширине и длине рабочей части применение плоских образцов становится менее рациональным, чем цилиндрических трубчатых. Для обеспечения возможности измерения местных деформаций и размеров пластических зон в вершине трещины статические и малоцикловые испытания при высоких температурах должны проводиться в соответствующих инертных газовых средах или в вакууме.

Ниже приводится описание методики экспериментального получения перечисленных характеристик для определения условий распространения трещин при статическом и малоцикловом нагружении в том числе с изотермическим высокотемпературным нагревом [15-17].

Схема упругопластического деформирования и разрушения при малоцикловом нагружении показана на рис.1. Образец из упрочняющегося материала в исходном ненагруженном состоянии имеет начальную длину трещины l_0 (рис.1,а). При нагружении образца (рис. 1,б) в исходном (нулевом) полуцикле ($k = 0$) с номинальными растягивающими напряжениями $\sigma_n = \sigma_n^{(0)}$, соответствующими номинальным деформациям $e_n^{(0)}$, в вершине трещины возникает зона макропластических деформаций размером $r_T^{(0)}$ (заштрихована наклонными линиями); при этом края трещины (сплошные линии) у свободного конца получают перемещения $v^{(0)}$ в направлении напряжений $\sigma^{(0)}$. Перемещение в вершине начальной трещины $\delta^{(0)}$ (раскрытие трещины) при этом составит $\delta_T^{(0)}$. Деформации в вершине трещины достигают максимальной величины $e_{\max}^{(0)}$. Нагружение в нулевом полуцикле сопровождается увеличением длины трещины на размер $\Delta l^{(0)}$. В соответствии с этим перемещения $v^{(0)}$ и $\delta^{(0)}$ являются следствием не только упругопластических деформаций в вершине трещины, но и процесса разрушения в зоне с размером $\Delta l^{(0)}$.

При разгрузке образца и нагружении сжатием в первом полуцикле ($k = 1$) упругопластические деформации в вершине трещины уменьшаются до величины $e_{\max}^{(1)}$, оставаясь деформациями растяжения ($e_{\max}^{(1)} < e_{\max}^{(0)}$) при небольших нагрузках сжатия или переходя в деформации сжатия при больших нагрузках сжатия. Зона пластичности в первом случае (заштрихована наклонными в другую сторону линиями) сокращается. При этом края трещины сходятся, и перемещения у свободного края трещины v' получаются меньше, чем в первом полуцикле ($v^{(1)} < v^{(0)}$); аналогичное соотношение выполняется и для раскрытия трещины ($\delta^{(1)} < \delta^{(0)}$). В связи с неравномерным распределением деформаций в нулевом и первом полуциклах края трещины у ее вершины получают искривление.

В k -полуцикле (рис. 6.1,в) при растягивающих напряжениях $\sigma^{(k)} = \sigma^{(0)}$, когда приращение трещины $\Delta l^{(k)} < l_0$, номинальные $e_n^{(k)}$ и местные $e_{\max}^{(k)}$ упругопластические деформации, размер зоны пластичности $r_T^{(k)}$ и перемещения краев трещины $\psi^{(k)}$ и $\delta^{(k)}$ оказываются больше, чем в первом полуцикле. После увеличения трещины на длину $\Delta l^{(k)}$ края трещины у ее вершины сохраняют следы искривления от предыдущих циклов нагружения.

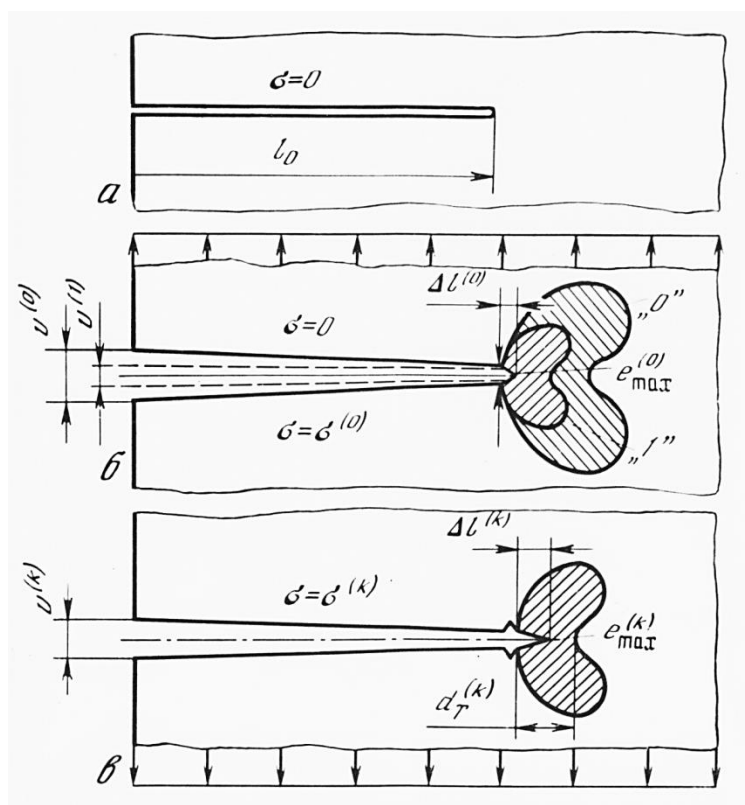


Рис.1. Схема измерения деформаций, перемещений и раскрытия трещины.

Таким образом, при исследовании (в деформационной постановке) процессов разрушения в условиях высокотемпературного малоциклового нагружения для заданного числа полуциклов k и времени τ должны быть измерены и зарегистрированы следующие величины: $\sigma^{(k)}$, $e_n^{(k)}$, $e_{\max}^{(k)}$, $v^{(k)}$, $\delta^{(k)}$, $r^{(k)}$ и $\Delta l^{(k)}$. Величины $\sigma^{(k)}$ и $e_n^{(k)}$ в процессе нагружения измеряются с помощью динамометров и деформометров с датчиками сопротивления, деформации $e_{\max}^{(k)}$ и перемещения $v^{(k)}$ и $\delta^{(k)}$ - с помощью сеток и рисок. Приращения длин трещин $\Delta l^{(k)}$ измеряются с помощью оптических средств и сеток, а размеры зон r_T измеряются по следам пластических деформаций. Схема сеток и рисок в зоне исходного надреза и трещины для образцов с длиной зоны разрушения до 20-30 мм показана на рис. 6.2. Квадратная сетка (преимущественно с шагом 0,1 мм) наносится непосредственно у вершины трещины в зоне предполагаемого ее развития. На достаточном удалении от вершины трещины расстояние между соседними парами сеток может быть увеличено до 0,5-2 мм. Перемещения краев надреза и трещин измеряются по рискам на расстояниях от вершины трещины, равных 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1 мм и более. Указанная выше неравномерность шага сеток и рисок определяется градиентами деформаций в вершине трещины и длиной трещины.

Все измерения в зоне трещин осуществляются с помощью оптических методов как наиболее точных и используемых обычно в качестве эталонных.

Исследования распространения трещин проводили на трубчатых образцах с предварительно созданной трещиной (рис.2). В образце с наружным диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм просверливается сквозное отверстие диаметром 1 мм. Затем электроискровым методом

делается надрез шириной 0,1 мм и длиной 1 мм на каждую сторону отверстия. После этого на усталостной машине в местах надреза выращивают трещины длиной около 0,5 мм.

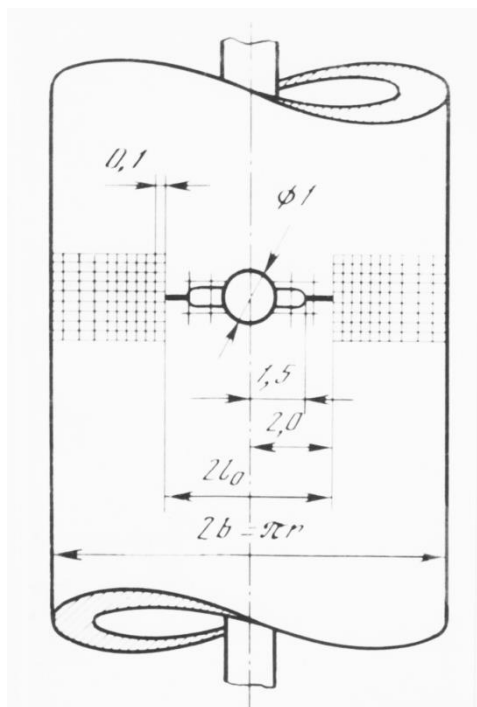


Рис.2. Рабочая зона образца с подготовленной на нем исходной трещиной

Для нанесения сетки в зоне предварительно выращенной усталостной трещины образец полируют, а затем по фронту ее будущего роста наносится сетка с шагом от 0,020 до 0,10 мм в зависимости от удаления от вершины исходной трещины. Сетка наносится на приборе ПМТ-3, к которому изготовлено специальное устройство для нанесения царапин на цилиндрический образец (рис.3). Последний закрепляется в центрах. Подвижный центр установлен на подшипниковых шариках, размещенных в прижимных планках и в корпусе подвижного центра. Круговое вращение образца осуществляется с помощью самотормозящейся червячной пары. Нанесение сетки производится алмазной пирамидой при перемещении столика прибора в продольном и поперечном направлениях. Контроль угла вращения образца осуществляется по лимбу.

Для периодического контроля раскрытия трещины (перемещения ее берегов) у краев надреза наносятся риски, и измерения перемещения краев исходной трещины проводят в местах нанесения вертикальных рисок.

Подготовленный образец устанавливается затем в захваты испытательной машины; в нашем случае испытания проводили при растяжении-сжатии на машине для малоцикловых испытаний типа УМЭ-10т с размещенной на ней вакуумной камерой [15]. При этом нагрев образца осуществляли радиационным способом за счет размещения стержневого нагревателя из жаропрочного или тугоплавкого материала внутри трубчатого образца (рис.4).

Данный метод нагрева оказывается наиболее пригодным при проведении такого рода исследований, поскольку значительно облегчается доступ к внешней поверхности образца, на которой также может быть размещен деформометр для определения изменений номинальных деформаций в процессе нагружения. Кроме того, при этом способе нагрева возможны изучение структурных изменений по фронту распространяющейся трещины и

пластических зон в ее вершине (поскольку испытания осуществляются в вакуумной камере), а также упрощается наблюдение за сеткой и рисками и их измерение.

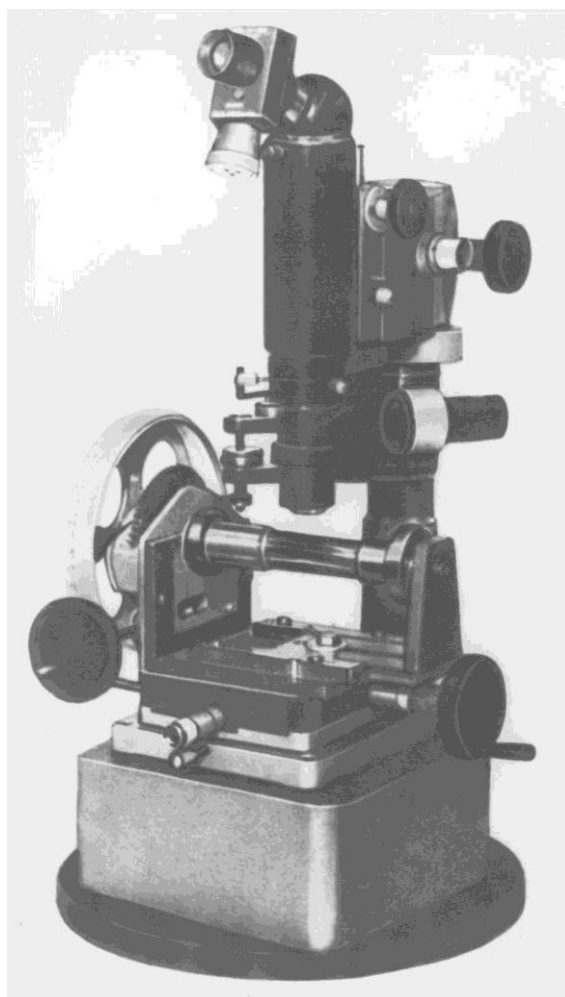


Рис.3. Устройство для нанесения сетки на трубчатом (цилиндрическом) образце с использованием микротвердомера ПМТ-3

Для наблюдения за структурой и измерения сетки на крышке вакуумной камеры размещен металлографический микроскоп типа МВТ. Измерение сетки осуществляется с помощью микрометрической оптической головки типа МОВ-1-15. Фотографирование структуры или сетки осуществляется с помощью микрофотонасадок типа МФН-12 при увеличениях до 100 крат при рабочем расстоянии объектива около 80 мм.

На рис.5 приведены отдельные моменты развития деформаций в вершине трещины. Для наблюдения за развитием трещины, а также для измерения раскрытия трещины и деформаций в ее вершине при больших увеличениях используется также промышленная телевизионная установка, присоединяемая непосредственно к металлографическому микроскопу. Изображение зоны развития трещины может быть подано на телеэкран.

В связи с тем, что при высоких температурах частота нагружения и форма цикла могут существенно влиять на сопротивление развитию трещины, указанные установки модернизированы для проведения на них программных испытаний, в том числе при двухчастотной нагружении [15-17], нагружении с временными выдержками на экстремальных уровнях нагрузки в полувциклах (либо в одном из них – в полувцикле растяжения или сжатия), при длительном статическом нагружении.

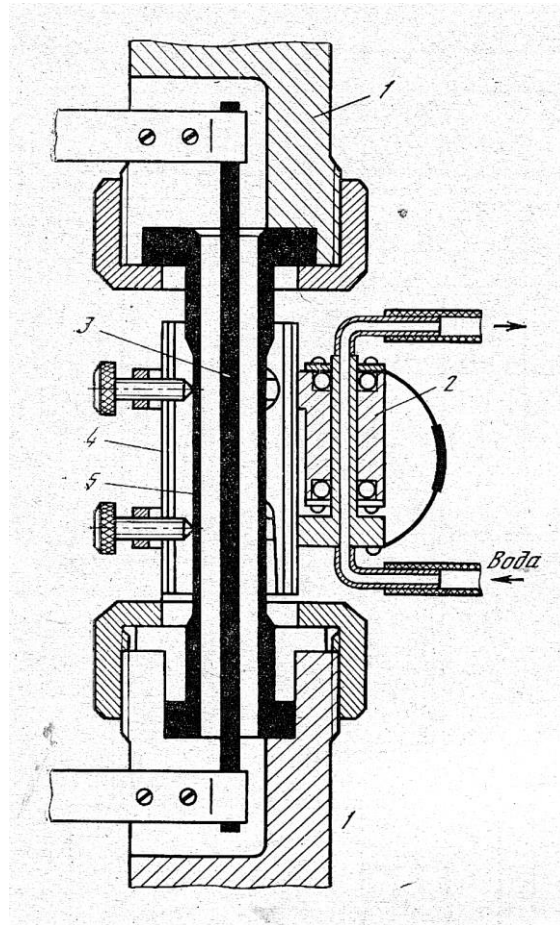


Рис. 4. Система нагрева трубчатого образца при малоцикловых испытаниях: 1 – захват; 2 – деформометр; 3 – нагреватель; 4 – экран; 5 – образец

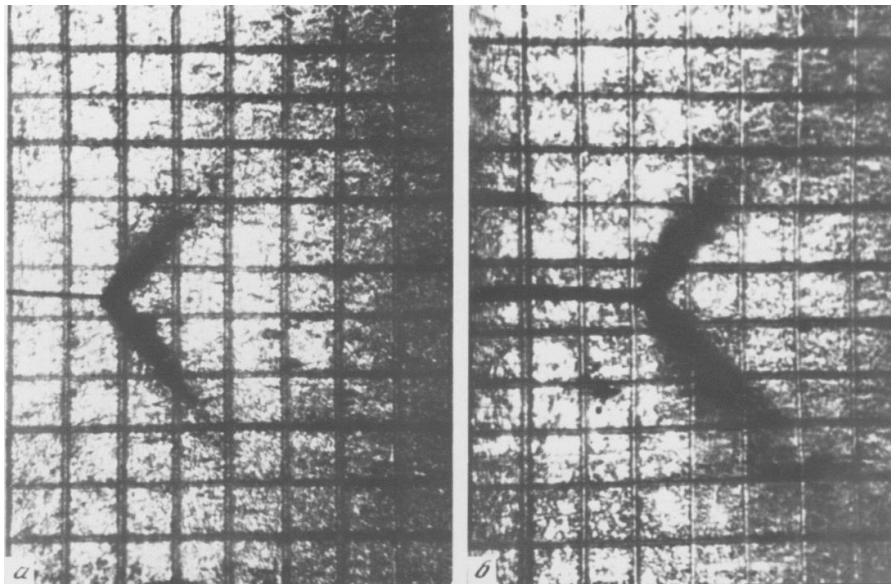


Рис.5. Развитие деформаций в вершине трещины и перемещение ее берегов после очередного цикла и последующего полуцикла при 650°C .

На рис. 6 представлены графики изменения перемещений $v^{(k)}$ и размаха перемещений $\Delta v^{(k)}$, величины раскрытия трещин $\delta^{(k)}$ и $\Delta \delta^{(k)}$, размах ее раскрытия, размера пластической зоны r_T , деформаций в вершине трещины $e_{\max}^{(k)}$ и размаха деформаций в вершине $\Delta e_{\max}^{(k)}$. Видно, что изменение указанных характеристик с увеличением числа циклов нагружения на разных стадиях нагружения различно, что может быть объяснено, как будет показано ниже, рядом причин, связанных с особенностями образования пластических зон и направлением развития трещин.

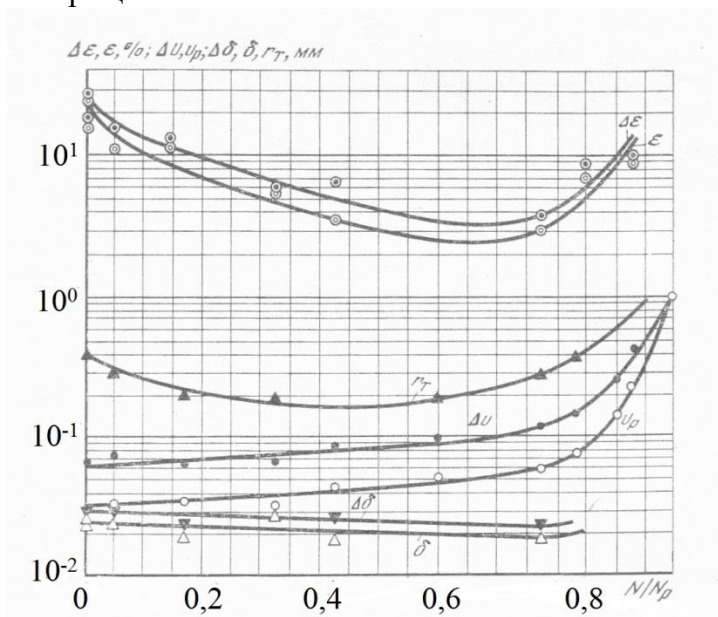


Рис.6. Зависимость характеристик деформирования и разрушения от числа циклов нагружения для заданного уровня номинальных напряжений

Для трубчатого образца, представленного на рис.2, коэффициент интенсивности напряжений подсчитывался по соответствующим зависимостям для плоского образца шириной b с центральной трещиной (где r – средний диаметр цилиндрического образца) или для плоского образца с периодическими трещинами (шаг расположения трещин равен $2b = \pi r$):

$$\Delta K_I = \Delta \sigma_n \sqrt{\pi l} f(l/b). \quad (1)$$

Для указанных случаев схематизации цилиндрического образца поправочная функция $f(l/b)$ в виде:

$$f(l/b) = \sqrt{(2b/\pi d) \operatorname{tg}(\pi/2b)} \quad (2)$$

или в полиномиальной форме

$$f(l/b) = \sqrt{b/c} [1 - 0,5(l/b) + 0,326(l/b)^2], \quad (3)$$

где c – расстояние от вершины исходной трещины до края образца (рис.2)

Принято, скорости распространения трещины описываются в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений.

Список литературы

1. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 1//Вестник научно-технического развития. - 2013. - №11. - С.38-49.
2. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 2. Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование//Вестник научно-технического развития. – 2014. - №1. - С.37-54.
3. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 3. Микроструктурные особенности развития деформаций в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур транскристаллитного разрушения//Вестник научно-технического развития. - 2014. - № 2. - С.36-50.
4. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 4. Основные типы микроструктурных деформационных рельефов, образующихся в конструкционных материалах при циклическом нагружении в интервале температур интеркристаллитного разрушения// Вестник научно-технического развития. – 2014. - №3. - С.31-58.
5. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 5. Энергия статического и циклического разрушения конструкционных металлических материалов//Вестник научно-технического развития. - 2014. - №9. - С.10-30.
6. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 6. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути пластической деформации при малоцикловом нагружении конструкционных материалов//Вестник научно-технического развития. - 2015. - № 3. - С. 32-41.
7. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 7. Накопление повреждений при малоцикловом нагружении// Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 5. - С.15-24.
8. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 8. Критерии разрушения с учетом работы микронапряжений на пути упругой деформации при усталостном нагружении конструкционных материалов//Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 6. - С.31-39.
9. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 9. Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов//Вестник научно-технического развития. – 2015. - № 12. - С.42-62.
10. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 10. Сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению в связи с формой цикла и деформационным старением материала//Вестник научно-технического развития. – 2016. - № 1. - С.34-41.
11. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 11. Структурные параметры деформационного

- старения при высокотемпературном малоцикловом разрушении//Вестник научно-технического развития. – 2016. - №3. - С.27-37.
12. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 12. Кинетика истинных напряжений и деформаций при малоцикловом нагружении//Вестник научно-технического развития. – 2016. - №2. - С.16-22.
 13. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 13. Критерии разрушения при неоднородном напряженном состоянии//Вестник научно-технического развития. – 2016. - №9. - С.29-36.
 14. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: Часть 14. Связь статических и циклических свойств конструкционных материалов// Вестник научно-технического развития. – 2017. - № 4 (116). – С. 31-43. (www.vntr.ru)
 15. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин: часть 15. Методы и аппаратура для проведения исследований при высокотемпературном циклическом нагружении //Вестник научно-технического развития. - 2018. - № 7 (131). - С. 27-40. DOI: 10.18411/vntr2018-131-4. (www.vntr.ru).
 16. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. - М.: Наука, 1988. - 280 с.
 17. Романов А.Н. Критерии усталостного разрушения// Инженерный журнал «Справочник», Приложение. – 2007. - №6. - 36 с.

Дата поступления: 8 июня 2019 г.