

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ЗОН У ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ И РЕНТГЕНОВСКАЯ ФРАКТОДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЯ

В работе обобщены основные результаты, полученные за последние 20 лет, по изучению рентгеновским методом пластических зон под поверхностью изломов, полученных при однократных и циклических видах нагружения, а также связи данных зон с локальным напряженным состоянием материала у вершины трещины и механизмами разрушение конструкционных материалов. Приведены примеры использования данных результатов в практике диагностики разрушения для определения характеристик материала и параметров разрушения.

Введение

В связи с разработкой и использованием в машиностроении и других смежных областях высокопроизводительной техники, отличающейся малым весом и материалоемкостью, а также надежностью в работе, значительно возросли в последнее время требования, как к конструкционным материалам, так и к методам оценки их надежности и качества. При этом особое внимание уделяется разработке новых, физически обоснованных критериев конструктивной прочности материалов, основанных на глубоком изучении явлений, лежащих в основе процессов деформации и разрушения. Такая постановка вопроса предполагает расширение наших представлений о природе прочности и механизмах разрушения материалов на различных масштабных уровнях.

Решение поставленной задачи возможно на стыке физики, материаловедения и механики разрушения, т. е. в рамках нового научного направления – микромеханики разрушения. Использование идей и методов микромеханики разрушения для изучения природы прочности и разрушения материалов неразрывно связано с внедрением новых методов локального исследования строения изломов. Одним из таких методов является рентгеноструктурный анализ, позволяющий определять глубины пластических зон под поверхностью изломов и структурные изменения материала в данных зонах.

Пластические зоны, образующиеся у вершины распространяющейся трещины, являются своего рода связующим звеном между структурой и механическими свойствами материала и отражают особенности его поведения в конкретных условиях нагружения. Они могут быть использованы в практике диагностики разрушения для определения причин и параметров аварийного разрушения промышленных конструкций и деталей машин.

В настоящей работе сделана попытка обобщить основные результаты, полученные в данных областях за последние 20 лет. Большинство работ, результаты которых представлены в статье, выполнены совместно с доцентом Н.А. Клевцовой, Г.Б. Швец, А.Г. Жижериным, Р.Г. Клевцовым и Фроловой О.А. в содружестве с замечательным исследователем профессором Людмилой Рафаиловной Ботвиной. Автор благодарит своих коллег за счастье совместной творческой работы.

Материалы и методики исследования

В качестве материалов с ОЦК решеткой использовали: углеродистые сталь 15, сталь 20, сталь 40, сталь 45, Ст3 и легированную сталь 15Х2МФА; в качестве материалов с ГЦК решеткой – алюминиевые деформируемые сплавы Д16, АК6 и аустенитные стали Н32Т3, Н26Т3, Н26Х5Т3, 40Г18Ф, 40Х4Г18Ф, 03Х13АГ19, 07Х13Н4АГ20 и 110Г13Л.

Образцы различной толщины и конфигурации, изготовленные из материалов, находящихся в состоянии поставки (горячекатанное состояние) и после различных видов термической обработки, испытывали при однократных (статическом, ударном, высокоскоростном импульсном), циклических и ударно-циклических видах нагружения в интервале температур от – 196 до 150 °С.

Полученные изломы исследовали методами макро- и микрофрактографии. Глубину пластических зон под поверхностью изломов и структурные изменения материала в данных зонах (в том числе и мартенситные превращения в пластических зонах) определяли рентгеновским методом, используя усовершенствованный автором с сотрудниками метод послойного стравливания излома с последующим рентгенографированием его поверхности [1-4].

Пластические зоны, локальное напряженное состояние и механизмы разрушения материалов при однократных видах нагружения. Из положений линейной механики разрушения следует [5], что пластические зоны, образующиеся у вершины трещины в условиях плоской деформации (ПД) и плоского напряженного состояния (ПН), отличаются как по форме, так и по размерам. Это оказывает существенное влияние, как на механизм разрушения металлических материалов, так и на его сопротивлении развитию трещины. Однако, рассматривая формирование пластических зон при разрушении реальных материалов, необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства.

Во-первых, при разрушении некоторых металлических материалов, помимо выше рассмотренных предельных значений локального напряженного состояния материала: плоской деформации (ПД) и плоского напряженного состояния (ПН), у вершины трещины может реализовываться переходное состояние от ПД к ПН. Последнее имеет место, например, при смешанном разрушении материалов с ГЦК-решеткой [6, 7]. Во-вторых, как показывают многочисленные экспериментальные данные [4, 7-9], при разрушении материалов в условиях плоского напряженного состояния, а, в отдельных случаях, и в переходной области от ПД к ПН, у вершины трещины формируются две пластические зоны: слабодеформированная макрозона h_y и сильно деформированная микрозона h_{yh} , отличающиеся размерами и степенью искаженности кристаллической структуры материала в данных зонах.

С учетом вышесказанного, нами разработаны схемы формирования пластических зон у вершины трещины в случае реализации плоского напряженного состояния (ПН) и переходной области от ПД к ПН [4, 10].

Если разрушение материала происходит в условиях плоского напряженного состояния (ПН) или переходной области от ПД к ПН, то под действием возникающих напряжений, образуется слабодеформированная макрозона h_y , размер и форма которой определяются расстоянием от вершины трещины до точек, где напряжения достигнут предела текучести исходного материала σ_t . В результате пластико-

го течения металла происходит его деформационное упрочнение и повышение предела текучести до значения σ_t^* , приводящее к изменению локального напряженного состояния материала у вершины трещины от плоского напряженного состоянию, к состоянию, близкому к плоской деформации (при разрушении образца или детали в переходной области) или к переходной области от ПД к ПН (если разрушение проходит в условиях ПН) (рис. 1 а). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к формированию у вершины трещины второй пластической зоны (сильнодеформированной микрозоны h_{yh}), размеры которой теперь будут зависеть уже от предела текучести деформационно упрочненного материала σ_t^* (см. рис. 1 а). После прохождения трещины через образец или деталь, с помощью рентгеноструктурного анализа под поверхностью полученных изломов выявляются две пластические зоны, глубиной h_y и h_{yh} (рис. 1 б). Если разрушение произошло в переходной области от ПД к ПН, то, вследствие небольших размеров пластических зон, а, следовательно, больших градиентов деформации материала в данных зонах, не всегда представляется возможность, как отмечено в работах [6, 7, 10], четко разграничить макро- и микрозону под поверхностью изломов при исследовании их рентгеновским методом.

Указать четкую границу перехода локального напряженного состояния материала от плоской деформации в переходную область и от переходной области в плоское напряженное состояние невозможно из-за непрерывности процесса эволюции размера и количества пластических зон. Сформулируем основные зако-

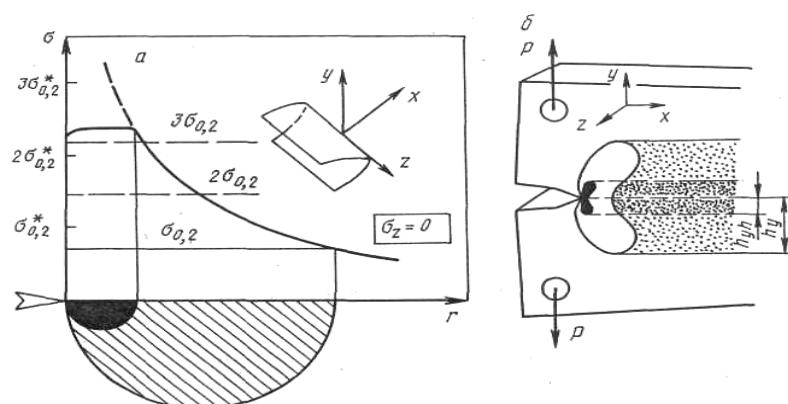


Рисунок 1. Схема формирования пластических зон у вершины трещины (а) и под поверхностью изломов при ее распространении (б) в условиях плоского напряженного состояния (h_y – глубина слабодеформированной макрозоны, h_{yh} – глубина сильно деформированной микрозоны)

номерности разрушения металлических материалов в каждой из вышеуказанных областей локального напряженного состояния.

Критерием оценки локального напряженного состояния материала у вершины трещины при различных видах нагружения служит предложенное автором с сотрудниками [6, 7, 11] отношение максимальной глубины пластической зоны под поверхностью изломов к толщине образца (h_{\max}/t). На рисунке 2 представлена температурная зависимость h_{\max}/t для однократных видов нагружения (статического, ударного, высокоскоростного импульсного) материалов с ОЦК– и ГЦК решеткой. На данном графике хорошо прослеживаются три области локального напряженного состояния материала: плоской деформации (ПД), плоского напряженного состояния (ПН) и переходной области от ПД к ПН.

Разрушение материалов в условиях плоской деформации (ПД) сопровождается образованием у вершины трещины только одной пластической зоны. При этом отношение максимальной глубины пластической зоны под поверхностью изломов к толщине образца или детали определяется выражением $h_{\max}/t < 10^{-2}$ (см. рис. 2 а). Материалы с ОЦК решеткой разрушаются при плоской деформации всегда хрупко по ме-

ханизму скола (транскристаллитное хрупкое разрушение) или по механизму межзеренного хрупкого разрушения (см. рис. 2 б); материалы с ГЦК-решеткой – по механизму межзеренного хрупкого разрушения, либо по смешанному механизму, но с доминированием межзеренного хрупкого разрушения или квазискола. Такие механизмы разрушения обусловливают низкий, по сравнению с вязким разрушением, уровень искаженности кристаллической структуры материала в пластической зоне, оцененной по ширине рентгеновской дифракционной линии.

Разрушение материалов как с ОЦК, так и с ГЦК решеткой в условиях плоского напряженного состояния (ПН) сопровождается образованием под поверхностью изломов двух пластических зон: сильнодеформированной микрозоны h_{yh} и слабодеформированной макрозоны h_y . При этом отношение $h_{\max}/t > 10^{-1}$ (см. рис. 2 а). Большие пластические деформации предопределяют вязкий характер разрушения материалов в условиях плоского напряженного состояния. Чаще всего такое разрушение происходит с образованием ямочного микрорельефа (см. рис. 2 б).

В том случае, когда разрушение материалов происходит в переходной области от ПД к

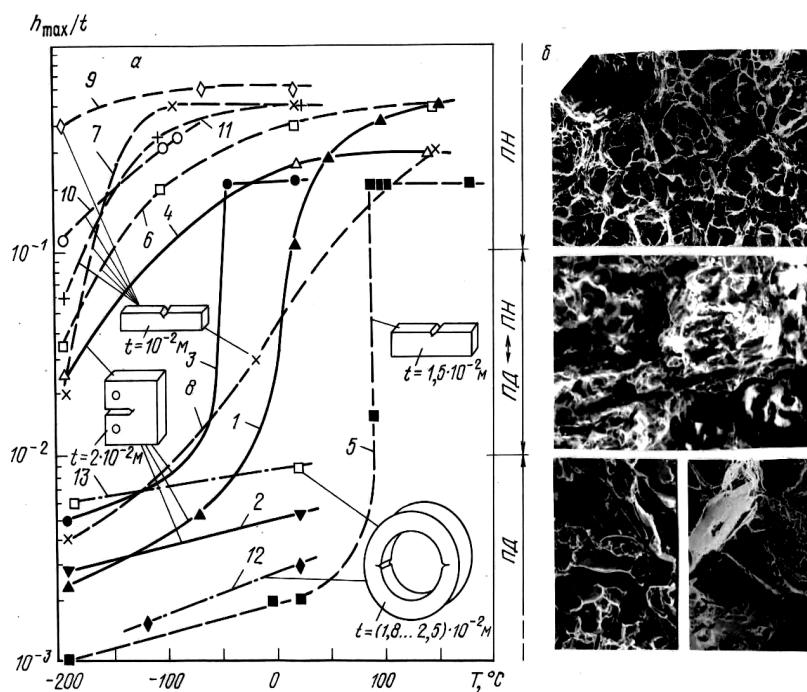


Рисунок 2. Температурная зависимость отношения h_{\max}/t для материалов с ОЦК решеткой (темные точки) и ГЦК решеткой (светлые точки) при статическом (1–4), ударном (5–11) и высокоскоростном импульсном (12, 13) нагружениях (а), а также характерные микрорельефы изломов при ПД, ПН и переходной области от ПД к ПН (б): 1–сталь 20; 2–сталь 40; 3–15Х2МФА; 4–03Х13АГ19; 5–сталь 45; 6, 13–40Г18Ф (закалка); 7–40Х4Г18Ф (закалка); 8–40Х4Г18Ф (закалка+старение), 9–Н26Т3 (закалка), 10–Н32Т3 (закалка), 11–Н26Х5Т3 (закалка+старение), 12–Ст3

ПН, глубина слабодеформированной макрозоны h_y под поверхностью изломов будет гораздо меньше, чем при плоском напряженном состоянии. Поэтому соотношение: $10^{-2} < h_{\max}/t < 10^{-1}$ (см. рис. 2 а). В этом случае, как уже отмечалось ранее, не всегда представляется возможным, четко разграничить макро- и микрозону. В переходной области от ПД к ПН разрушаются преимущественно материалы с ГЦК-решеткой, как правило, по смешанному механизму (см. рис. 2 б). При смешанном механизме разрушения степень искаженности кристаллической структуры материала на поверхности изломов соизмерима с искаженностью кристаллической структуры в сильно деформированной микрозоне при вязком разрушении. Относительно низкая энергоемкость разрушения материалов при смешанном механизме обусловлена, по-видимому, малым размером микрозоны пластической деформации.

Изменение локального напряженного состояния материала у вершины трещины влияет не только на глубину пластических зон под поверхностью изломом, но и на степень искаженности кристаллической структуры материала в данных зонах, которая может быть оценена, как отмечалось выше, по ширине рентгеновской дифракционной линии. Воспользуемся для этого безразмерной величиной β/β_0 – отношением ширины дифракционной линии, полученной при рентгенографировании пластических зон β , к ширине линии, полученной при съемке эталона β_0 [4, 10, 11]. Зависимости, связывающие отношения h_{\max}/t и β/β_0 , для различных материалов представлены на рисунке 3. В том случае, когда разрушение метастабильных аустенитных сталей сопровождалось протеканием фазовых превращений в пластических зонах (стали 03Х13АГ19, 40Г18Ф, 40Х4Г18Ф), точки на рисунке 3 обведены двойными линиями.

Из приведенного рисунка видно, что для материалов, разрушение которых не сопровождалось фазовыми превращениями в пластических зонах, зависимости $h_{\max}/t - \beta/\beta_0$ описываются едиными кривыми, независимо от класса материалов и вида однократных нагрузений. При плоской деформации (ПД) отношение $\beta/\beta_0 = 2,0$; в переходной области от ПД к ПН – $\beta/\beta_0 = 2,0...2,1$; при плоском напряженном состоянии (ПН) – $\beta/\beta_0 = 2,1$. Если на поверхности изломов аустенитных сталей образуются

марктенитные фазы или деформационные двойники [4, 10, 11], то установить такую связь не представляется возможным (см. рис. 3).

Пластические зоны при циклическом нагружении. Согласно теоретической модели Райса [12] в условиях циклического деформирования у вершины усталостной трещины образуются две пластические зоны: монотонная зона (зона текучести) h_y и циклическая зона (зона обратной пластической деформации) h_{yh} . Образование циклической пластической зоны связано с тем, что в вершине распространяющейся трещины возникают значительные по величине напряжения сжатия, в то время как впереди трещины имеют место растягивающие напряжения. Для большинства размеры циклической зоны под поверхностью изломов лучше-

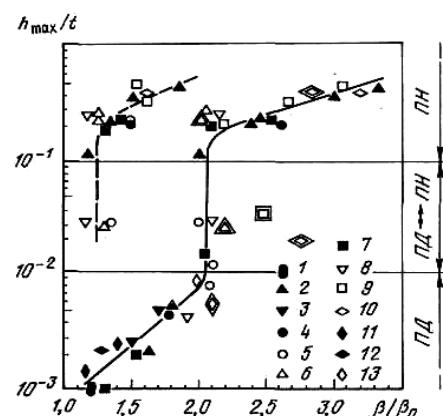


Рисунок 3. Взаимосвязь отношений h_{\max}/t и v/b_0 при съемке статических (1-6), ударных (7-10) и импульсных (11-13) изломов материалов с ОЦК решеткой (темные точки) и ГЦК решеткой (светлые точки) с поверхности излома (сплошная линия) и слабодеформированной макрозоне (пунктирная линия):

- 1 – сталь 15; 2 – сталь 20; 3 – сталь 40; 4 – 15Х2МФА;
5 – Д16; 6 – 03Х13АГ19; 7 – сталь 45; 8 – 40Х4Г18Ф
(закалка+старение); 9 – 40Г18Ф (закалка);
10 – 40Х4Г18Ф (закалка); 11 – Ст3; 12 – сталь 45;
13 – 40Г18Ф

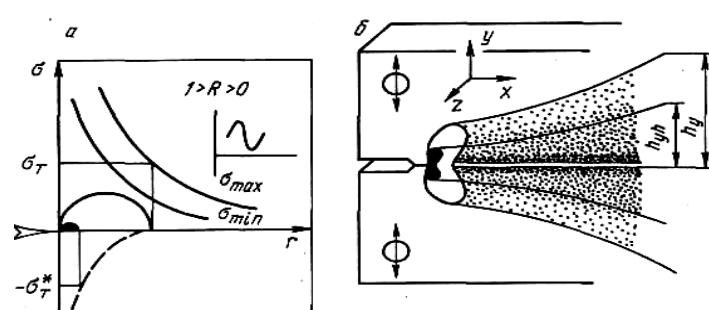


Рисунок 4. Схема образования у вершины усталостной трещины (а) и под поверхностью изломов при ее распространении (б) монотонной h_y (светлое поле) и циклической h_{yh} (темное поле) пластических зон при растягивающих циклах нагружения

ше коррелируют с ΔK , а монотонной – с K_{max}^2 [4, 8, 10, 13].

Рассмотрим, предложенные автором с сотрудниками [4], схемы образования пластических зон при различных значениях коэффициента асимметрии цикла нагружения R . На рисунках 4 и 5 пластические зоны, образующиеся при напряжениях растяжения, обозначены светлым полем; при напряжениях сжатия – темным полем.

Как уже отмечалось, образование монотонной пластической зоны связано с максимальными растягивающими напряжениями, возникающими у вершины усталостной трещины. При изменении знака нагрузки, в случае одноименно растягивающих циклов нагружения ($1 > R > 0$), в пределах монотонной пластической зоны возникают сжимающие напряжения (на рис. 4 а показаны пунктирными линиями). При достижении предела текучести деформационно упрочненного материала σ_t^* эти сжимающие

напряжения формируют циклическую пластическую зону. Поэтому циклическая пластическая зона образуется даже в случае одноименных растягивающих циклов нагружения, а размеры её лучше коррелируют с ΔK .

Поскольку с увеличением длины усталостной трещины коэффициенты интенсивности напряжения K_{max} и ΔK увеличиваются, возрастает и глубина как монотонной, так и циклической пластических зон под поверхностью изломов (рис. 4), а, следовательно, локальное напряженное состояние материала у вершины трещины изменяется в сторону плоского напряженного состояния.

Аналогичным образом формируются монотонная и циклическая пластические зоны у вершины усталостной зоны при отнулевом ($R=0$), преимущественно растягивающих ($-1 < R < 0$), симметричном ($R=-1$) и преимущественно сжимающих ($-1 > R > -\infty$) циклов нагружения (рис. 5).

Анализируя распределение напряжений у вершины усталостной трещины в случаях отнулевого сжимающего ($R = -\infty$) и полностью сжимающих циклов нагружения ($1 < R$) (рис. 5 д, е), можно предположить, что размеры пластической зоны, вызванной напряжениями сжатия (данную зону можно назвать монотонной зоной сжатия) всегда превышают размеры зоны, вызванной напряжениями растяжения (циклической зоны).

Исходя из рассмотренных схем, можно представить обобщенные схемы образования пластических зон у вершины усталостной трещины в зависимости от коэффициента асимметрии цикла нагружения R . На рисунке 6 представлена схема для случая $\Delta \sigma = const$.

Рассмотрим некоторые закономерности образования пластических зон под поверхностью усталостных изломов образцов, исследуемых материалов. Изучение усталостных изломов исследуемых материалов показало [4, 10, 11], что связь глубины монотонной пластической зоны h_y под поверхностью изломов с величиной $(K_{max}/\sigma_{0,2})^2$ не зависит ни от класса материалов, ни от схемы нагружения, ни от коэффициента асимметрии цикла нагружения R и описывается единой кривой, которая хорошо аппроксимируется уравнением [4, 11]:

$$h_y = 0,0354(K_{max}/\sigma_{0,2})^2. \quad (1)$$

Аналогичным образом, связь глубины циклической пластической зоны h_{yh} с величиной $(\Delta K/\sigma_{0,2})$ аппроксимируется уравнением [4]:

$$h_{yh} = 0,0012(\Delta K/\sigma_{0,2}). \quad (2)$$

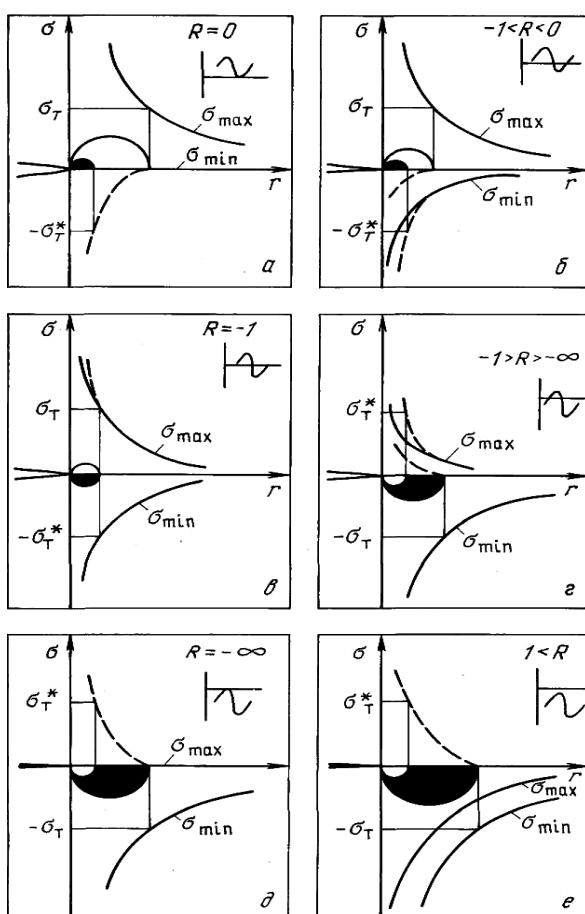


Рисунок 5. Схемы образования пластических зон у вершины усталостной трещины при отнулевом (а), преимущественно растягивающих (б), симметричном (в), преимущественно сжимающих (г), отнулевого сжимающему (д) и полностью сжимающим (е) циклах нагружения

Причем разрушение исследуемых материалов произошло в подавляющем большинстве случаев в переходной области от ПД к ПН ($10^{-2} < h_{\max}/t < 10^{-1}$) или в области плоского напряженного состояния ($h_{\max}/t > 10^{-1}$). Поскольку, в случае усталостного разрушения, обнаружить единую зависимость, связывающую отношение h_{\max}/t с β/β_0 , не удалось [4], следует констатировать, что использование отношения β/β_0 как критерия локального напряженного состояния материала у вершины трещины при циклическом нагружении не представляется возможным.

Рентгеновская фрактодиагностика разрушения. Рассмотрим примеры определения по глубине пластических зон под поверхностью изломов и структурных изменений материала в данных зонах параметров нагружения, вызвавших разрушение объекта (конструкции или детали машин) [4, 11, 14].

Определение статической трещиностойкости материала разрушающегося объекта по глубине пластической зоны под поверхностью излома. Сущность предложенного способа заключается в следующем [15]. Для определения статической трещиностойкости материала используют известное отношение в виде: $h_{\max} = 1/n\pi [K_{IC}(K_C)^2/\sigma_{0.2}]$. Коэффициент n отражает локальное напряженное состояние материала в момент разрушения и может быть определен графически (рис. 7).

Для нахождения статической трещиностойкости материала разрушающегося объекта экспериментально определяют максимальную глубину пластической зоны h_{\max} под поверхностью инспектируемого излома в области страгивания трещины. Взяв отношение глубины пластической зоны к толщине детали в месте разрушения, находят отношение h_{\max}/t . Затем, по графику (рис. 7 а или б) определяют значение коэффициента n . После чего, по формуле рассчитывают критическое значение коэффициента интенсивности напряжения K_{IC} или K_C .

Определение критических длин трещин на поверхности усталостных изломов. Рентгеновский метод определения критических длин трещин l_s и l_f на поверхности усталостных изломов основан на том, что в пределах зоны стабильного роста трещины l_s ширина дифракционной линии, полученная с поверхности изломов, остается практически постоянной и увеличивается при переходе в зону ускоренного развития трещины. При переходе в зону долома ширина

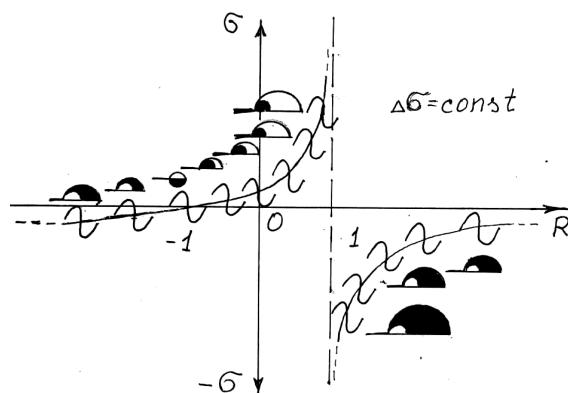
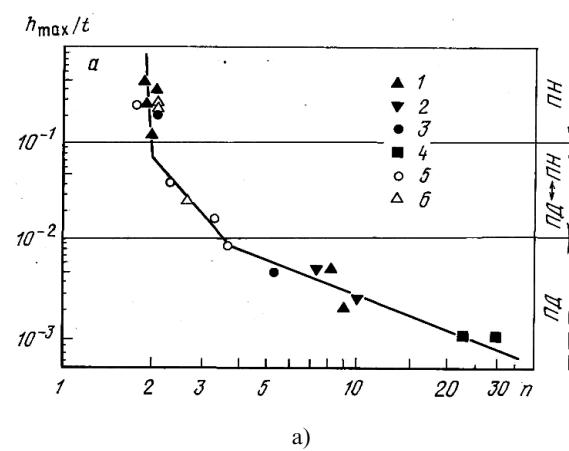
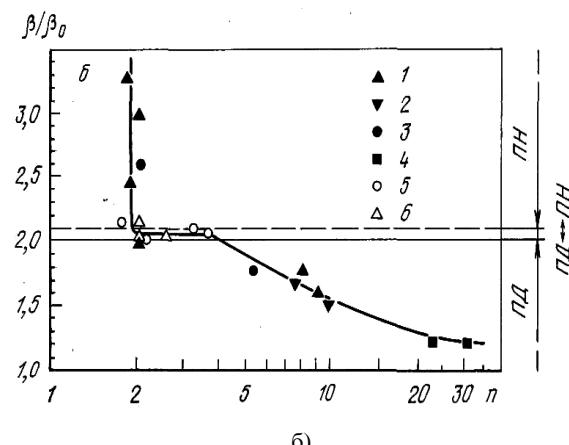


Рисунок 6. Обобщенная схема образования пластических зон у вершины усталостной трещины в зависимости от R для случая $\Delta\sigma=\text{const}$ при локальном напряженном состоянии, соответствующем границе между плоской деформацией и переходной областью от ПД к ПН



a)



б)

Рисунок 7. Зависимость значения коэффициента n от отношений h_{\max}/t (а) и β/β_0 (б) при испытании на статическую трещиностойкость материалов с ОЦК решеткой (темные точки) и ГЦК решеткой (светлые точки):
1 – сталь 20; 2 – сталь 40; 3 – 15Х2МФА; 4 – сталь 15;
5 – Д16; 6 – 03Х13АГ19

линии снова становится постоянной [4, 11]. В двойных логарифмических координатах зависимость ширины дифракционной линии от длины трещины (величины ΔK и K_{\max}) представляется собой ломаную S-образную кривую, перегибы на которой соответствуют критическим длинам трещины l_s и l_f на поверхности усталостного излома.

Определение напряжений цикла при усталостном разрушении. Для нахождения максимального напряжения цикла нагружения σ_{\max} и его размаха $\Delta\sigma$, необходимо знать значения коэффициента интенсивности напряжения K_{\max} и ΔK при заданной длине усталостной трещины l . Для этого экспериментально определяют глубину монотонной h_y и циклической h_{yh} пластических зон под поверхностью инспектируемого излома на расстоянии l от очага разрушения. Затем, по формулам (1) и (2) рассчитывают значение K_{\max} и ΔK . Зная K_{\max} , ΔK и длину трещины l , по формулам механики разрушения можно рассчитать максимальное значения напряжения цикла σ_{\max} и размах напряжения цикла $\Delta\sigma$, приведшие к разрушению конструкции или детали.

Определение коэффициента асимметрии цикла нагружения R. В основу предложенного метода положена связь коэффициента R с отношением (h_y/h_{yh}) при некоторой фиксированной длине трещины l . В качестве такой фиксированной длины трещины на поверхности усталостных изломов можно использовать длину зоны стабильного роста трещины l_s [4, 11].

Таким образом, для нахождения коэффициента асимметрии цикла нагружения R на поверхности инспектируемого излома фрактографическим или рентгеновским методом определяют длину зоны стабильного роста трещины l_s . Затем, при длине трещины $l = l_s$ экспериментально определяют глубину монотонной h_y и циклической h_{yh} пластических зон и, рассчитав от-

ношение h_y/h_{yh} . По графику (рис. 8) находят коэффициент асимметрии цикла нагружения R .

Определение скорости распространения усталостной трещины. К сожалению, единой зависимости между скоростью роста трещины dl/dN и глубиной пластических зон под поверхностью изломов различного класса материалов обнаружить не удалось [4, 11]. Поэтому для оценки скорости распространения трещины по глубине пластических зон под поверхностью изломов, необходимо предварительно для исследуемого материала построить градиуровочные кривые « $dl/dN - h_y, h_{yh}$ ». При этом необходимо соблюдать тот же коэффициент асимметрии цикла нагружения, а также одинаковое локальное напряженное состояние материала у вершины трещины.

Определение температуры локального разогрева и фазового состава аустенитной стали у вершины распространяющейся трещины. Известно, что распространение трещины в метастабильных аустенитных сталях сопровождается мартенситными $\gamma > \alpha$ или $\gamma > \epsilon > \alpha$ превращениями, протекающими в пластических зонах у ее вершины [7]. Если требуется определить локальную температуру разогрева материала у вершины трещины, вызвавшей разрушение образца или детали из метастабильной аустенитной стали при температуре T_1 , то необходимо провести нижеследующие операции [16]:

1. Определить количество мартенситной фазы на поверхности излома исследуемого образца или детали.

2. Изготовить серию контрольных образцов из данной стали и, если разрушение детали произошло при пониженной температуре ($T_1 < 20^{\circ}\text{C}$) и в исследуемой стали при низких температурах возможно образование мартенсита охлаждения, то охладить образцы до температуры T_1 .

3. Произвести статическое нагружение контрольных образцов до их разрушения при различных температурах T_2, T_3, \dots, T_n выше температуры T_1 и достаточно низкой скорости нагружения, исключающей локальный разогрев стали. Для большинства сталей такой скоростью нагружения является $V_{\text{nагр.}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$

4. Определить количество мартенситной фазы на поверхности всех полученных изломов контрольных образцов, охладить эти изломы до температуры T_1 и повторно определить количество мартенситной фазы на поверхности изломов.

5. Сопоставить количество мартенситной фазы на поверхности изломов разрушенного

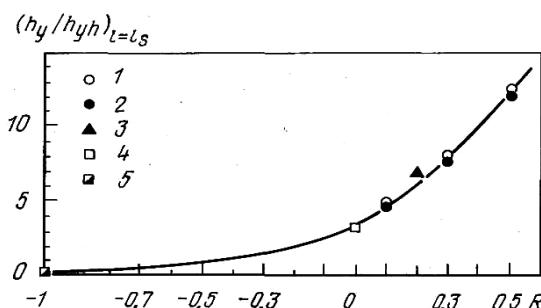


Рисунок 8. Зависимость отношения h_y/h_{yh} при $l = l_s$ от коэффициента асимметрии цикла нагружения R . 1 – Д16 ($\Delta P = \text{const}$); 2 – Д16 ($P_{\max} = \text{const}$); 3 – сталь 20; 4 – сталь 45; 5 – 07Х13Н4АГ20

образца или детали с количеством мартенсита в охлажденных изломах контрольных образцов, выделив среди последних такой излом, в котором количество мартенситной фазы будет равно количеству данной фазы на поверхности излома разрушенной детали.

В этом случае можно считать, что количество мартенситной фазы на поверхности излома выбранного контрольного образца до охлаждения было равно количеству данной фазы у вершины трещины, разрушившей образец

или деталь, так как после охлаждения поверхности изломов как исследуемой детали (уже после распространения трещины, т. е. разрушения), так и выбранного контрольного образца до температуры T_1 , количество мартенситной фазы в них оказалось одинаковым. Соответственно и температура разрушения выбранного контрольного образца будет равна локальной температуре у вершины распространяющейся трещины, разрушившей образец или деталь.

Список использованной литературы:

1. Клевцов Г. В., Швец Г. Б. Рентгенографический анализ как метод исследования изломов.– Л.: Машиностроение, 1986.– Вып. 35.– С. 3-11.
2. Клевцов Г. В., Клевцов Р. Г., Жижерин А. Г. Способ измерения толщины стравленного слоя металла. – Авт. св. № 1458696 (СССР).– Б. И., 1989.– № 6.
3. Р 50-54-52-88. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение глубины зон пластической деформации под поверхностью разрушения.– М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1988.– 24 с.
4. Клевцов Г. В. Пластические зоны и диагностика разрушения металлических материалов.– М: МИСИС, 1999.– 112 с.
5. Хеллан К. Введение в механику разрушения: Пер. с англ.– М.: Мир, 1988.– 364 с.
6. Клевцов Г. В., Ботвина Л. Р. Макро- и микрозона пластической деформации как критерий предельного состояния материала при разрушении // Проблемы прочности, 1984.– № 4.– С. 24-28.
7. Клевцова Н. А., Фролова О. А., Клевцов Г. В. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах.– М.: Изд-во Академии Естествознания, 2005.– 155 с.
8. Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов.– М: Наука, 1989.-230 с.
9. Викулин А. В., Веселов В. А., Георгиев М. Н., Межова Н. Я. Применение рентгеновской фрактографии для оценки трещиностойкости конструкционных материалов // Физико-химическая механика материалов, 1984.– Т. 20.– № 5.– С. 98-100.
10. Klevtsov G. V., Botvina L. R., Klevtsova N. A. Plastic Zones Formation under Different Types of Loading Conditions // ISIJ International, 1996.– Vol. 36.– № 2.– P. 215-221.
11. Klevtsov G. V., Botvina L. R., Klevtsova N. A. X-ray Diffraction Technique for Analysing Failed Components // ISIJ International, 1996.– Vol. 36.– № 2.– P. 222-228.
12. Rice J. R. Mechanics of Crack Tip Deformation and Extension by Fatigue // ASTM, Special Technical Publication, 1966.– № 415.– P. 247-311.
13. Clavel M., Fournier D., Pineau A. Plastic Zone Sizes in Fatigued Specimens of INCO 718 // Met. Trans., 1975.– A 6.– № 12.– P. 2305-2307.
14. Р 50-54-52/2-94. Расчеты и испытания на прочность. Метод рентгеноструктурного анализа изломов. Определение характеристик разрушения металлических материалов рентгеновским методом.– М.: ВНИИНМАШ Госстандарта России, 1994.– 28 с.
15. Клевцов Г. В. Способ определения статической трещиностойкости материала объекта.– Авт. свид. (СССР) № 1672269 // Б.И., 1991.– № 31.
16. Клевцов Г. В., Горбатенко [Клевцова] Н. А. Способ определения температуры локального разогрева метастабильной аустенитной стали. Авт. свид. (СССР) № 303574 // Б.И., 1992, № 11.