

Г.В. Клевцов

**Пластические зоны под поверхностью
изломов и диагностика разрушения
металлических материалов**

**Москва
Издательство Нобель Пресс**

УДК 66.0
ББК 35
Г11

Г11 **Г.В. Клевцов**
Пластические зоны под поверхностью изломов и диагностика разрушения металлических материалов / Г.В. Клевцов –
М.: Lennex Corp, — Подготовка макета: Издательство Нобель Пресс, 2024. – 124 с.

ISBN 978-5-458-60333-1

Рассмотрены закономерности разрушения металлических материалов при однократных и циклическом видах нагружения, а также закономерности формирования пластических зон у вершины распространяющихся трещин. Показана возможность использования пластических зон под поверхностью изломов для диагностики разрушения металлических материалов. Рассмотрены методические вопросы исследования изломов, в том числе и определения глубины пластических зон под поверхностью изломов и структурных изменений материала в данных зонах. Для специалистов в области физики и механики разрушения, фрактографии, металловедения, научных и заводских работников, занимающихся технической экспертизой причин разрушения конструкций и деталей машин, а также для студентов физических, металлургических, машиностроительных и других смежных специальностей. Ил. 71, табл. 4, библиогр. список 75 наименований.

ISBN 978-5-458-60333-1

© Издательство Нобель Пресс, 2024
© Г.В. Клевцов, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	7
Глава 1. РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ПРИ ОДНОКРАТНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ	9
1.1 Основные виды разрушения	9
1.1.1 Вязкое разрушение	9
1.1.2 Хрупкое разрушение	12
1.1.3 Квазихрупкое разрушение	14
1.1.4 Вязко-хрупкое разрушение	16
1.1.5 Смешанное разрушение	17
1.2 Влияние различных факторов на охрупчивание материалов	18
1.2.1 Влияние температуры испытания. Хладноломкость металлов	19
1.2.2 Влияние напряженного состояния и уровня прочности материала	22
1.2.3 Влияние скорости нагружения	23
1.2.4 Влияние окружающей среды	24
1.3 Элементы механики разрушения при однократных видах нагружения	27
1.3.1 Некоторые понятия механики разрушения	27
1.3.2 Пластические зоны и локальное напряженное состояние материала у вершины трещины	29
1.3.3 Связь локального напряженного состояния с механизмом разрушения металлических материалов и кинетикой развития пластических зон	36
Список использованных источников к главе 1	44
Глава 2. РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	46
2.1 Механизм и стадийность усталостного разрушения	46
2.1.1 Зарождение усталостной трещины	46
2.1.2 Распространение усталостной трещины	48
2.2 Характеристики условий нагружения и усталостная прочность материалов	52
2.2.1 Циклы, схемы и виды нагружения	52
2.2.2 Кривая усталости. Малоцикловая, многоцикловая и гигацикловая усталость	54
2.3 Элементы механики разрушения при циклическом нагружении	57
2.3.1 Коэффициенты интенсивности напряжения при циклическом нагружении	57

2.3.2	Кинетическая диаграмма усталостного разрушения	58
2.3.3	Пластические зоны у вершины усталостной трещины	61
2.4	Определение локального напряженного состояния материала у вершины трещины при циклическом нагружении	65
2.5	Влияние коэффициента асимметрии цикла и схемы нагружения на усталостную прочность и кинетику развития пластических зон	70
	Список использованных источников к главе 2	79
Глава 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ИЗЛОМОВ КАК МЕТОДА ДИАГНОСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ		81
3.1	Определение локального напряженного состояния материала у вершины трещины при различных видах нагружения	82
3.2	Определение характеристик материала при однократных видах нагружения	83
3.2.1	Определение статической трещиностойкости материала разрушенного объекта по глубине пластических зон под поверхностью изломов	83
3.2.2	Рентгеновский метод определения критических температур хрупкости	85
3.2.3	Определение температуры локального разогрева и фазового состава метастабильной аустенитной стали у вершины распространяющейся трещины	86
3.3	Определение характеристик разрушения материалов при циклическом нагружении	90
3.3.1	Определения критических длин трещин на поверхности усталостных изломов	90
3.3.2	Определение напряжений цикла	91
3.3.3	Определение коэффициента асимметрии цикла нагружения	91
3.3.4	Определение скорости распространения усталостной трещины	92
3.4	Исследование изломов с поврежденной поверхностью	93
3.4.1	Идентификация изломов с использованием интегральной ширины дифракционной линии	93
3.4.2	Использование послойного текстурного анализа	96
	Список использованных источников к главе 3	101
Глава 4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ		103
4.1	Методики подготовки изломов к исследованию	103
4.1.1	Хранение изломов	103
4.1.2	Очистка изломов	104

4.1.3	Резка изломов	105
4.2	Рентгеноструктурный анализ как метод исследования изломов	106
4.2.1	Влияние шероховатости поверхности и дефокусировки образца на ширину рентгеновских дифракционных линий	107
4.2.2	Влияние градиентов деформации материала вблизи поверхности изломов на ширину рентгеновских дифракционных линий	108
4.2.3	Крепление изломов в держателе образца дифрактометра	111
4.2.4	Выбор условий съемки и локальность исследования	114
4.3	Определение искаженности кристаллической структуры материала на поверхности излома.....	115
4.4	Определение глубины пластических зон под поверхностью излома методом послойного стравливания	115
4.5	Измерение толщины стравленного с поверхности излома слоя металла.....	117
4.6	Метод последовательной съемки шлифа, расположенного нормально к поверхности излома	120
4.7	Погрешности определения глубины пластических зон под поверхностью разрушения	121
4.8	Определение объемного содержания мартенситных фаз	123
	Список использованных источников к главе 4	125

ВВЕДЕНИЕ

В связи с разработкой высокопроизводительной техники, отличающейся малым весом и материалоемкостью, а также надежностью в работе, значительно возросли в последнее время требования как к 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 для определения локального напряженного состояния и свойств материала у вершины трещины, а также для установления причин и параметров аварийного разрушения промышленных конструкций и деталей машин.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

T – температура испытания, (^0C);

t – толщина образца или детали, (м);

l – длина трещины или дефекта, (м);

– зона вытяжки в очаге разрушения, (м);

l_c – критическая длина вязкой зоны в очаге разрушения при однократных видах нагружения, (м);

L – длина специфической вязкой зоны в очаге разрушения ударных изломов, (м);

l_s, l_r, l_d – длина зон стабильного и ускоренного роста трещины и зоны долома при циклическом нагружении, (м);

l_f – длина зоны усталостного роста трещины при циклическом нагружении, (м);

B – процентное содержание вязкой составляющей на поверхности изломов, (%);

λ – размер губ среза на поверхности излома, (%);

T_{xp}^h, T_{xp}^b – нижняя и верхняя критические температуры хрупкости, (^0C);

σ – напряжение, (МПа);

$\sigma_{min}, \sigma_{max}$ – минимальное и максимальное напряжение при циклическом нагружении, (МПа);

$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ – размах напряжения при циклическом нагружении, (МПа);

σ_σ – предел прочности материала, (МПа);

$\sigma_m (\sigma_{0,2})$ – предел текучести материала, (МПа);

φ – относительное удлинение, (%);

ψ – относительное сужение, (%);

σ_1 – нормальное напряжение, (МПа);

σ_{otpr} – напряжение отрыва при хрупком разрушении материала, (МПа);

τ_{max} – максимальное касательное напряжение, (МПа);

α – коэффициент жесткости напряженного состояния;

σ_w – предел усталости (выносливости) материала, (МПа);

σ_{-1} – напряжение цикла при усталостном нагружении в случае симметричного цикла, (МПа);

K_{CU} , K_{CV} , K_{CT} – ударная вязкость образцов с U- и V-образным концентратором напряжения и усталостной трещиной, ($\text{МДж}/\text{м}^2$);

K – коэффициент интенсивности напряжения у вершины трещины, ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$);

K_I , K_{II} , K_{III} - коэффициенты интенсивности напряжения для случая нормального отрыва, поперечного сдвига и продольного сдвига, ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$);

K_{IC} , K_C – критические значения коэффициента интенсивности напряжения при плоской деформации (статическая трещиностойкость материала) и плоском напряженном состоянии, ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$);

K_{min} , K_{max} - минимальное и максимальное значение коэффициента интенсивности напряжения при циклическом нагружении, ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$);

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – размах коэффициента интенсивности напряжения при циклическом нагружении, ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$);

K_{th} , K_{fc} – критические значения коэффициента интенсивности напряжения при циклическом нагружении, ($\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$);

$R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ – коэффициент асимметрии цикла нагружения;

dl/dN – скорость распространения усталостной трещины, ($\text{м}/\text{цикл}$);

r_{yh} , r_y – радиус пластической микро- и макрозоны (циклической и монотонной зоны при циклическом нагружении) у вершины трещины, (м);

h – толщина стравленного с поверхности изломов слоя металла, (м);

h_{yh} , h_y – глубина пластической микро- и макрозоны (циклической и монотонной зоны при циклическом нагружении) под поверхностью изломов, (м);

h_{max} – максимальная глубина пластической зоны под поверхностью изломов, (м);

β – ширина рентгеновской дифракционной линии, (рад);

β_0 – ширина рентгеновской дифракционной линии эталона, (рад);

$\Delta\beta$ – физическое уширение рентгеновской дифракционной линии, (рад).

Глава 1.

РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ПРИ ОДНОКРАТНЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

1.1 Основные виды разрушения

К основным видам разрушения металлических материалов при однократных видах нагружения относят вязкое, квазихрупкое, хрупкое, вязко-хрупкое и смешанное разрушения. Несмотря на многообразие механизмов разрушения, а также особенностей макро- и микростроения изломов, свойственных каждому из видов разрушения, можно выделить некоторые общие признаки.

1.1.1 Вязкое разрушение

Характерной особенностью вязкого разрушения металлических материалов является медленное развитие трещины и высокая энергоемкость как на стадии зарождения, так и на стадии распространения трещины. Последнее обусловлено необходимостью затраты значительной работы пластической деформации у вершины вязкой трещины. Это определяет макрофрактографическое строение вязких изломов. Вязкий излом (*рис. 1.1*) имеет волокнистое строение и большую шероховатость. Металлический блеск отсутствует. Он состоит из относительно плоской центральной части излома; в периферийной части образуются губы среза. Вблизи поверхности излома имеет место утяжка, отражающая макропластическую деформацию образца или детали при вязком разрушении.

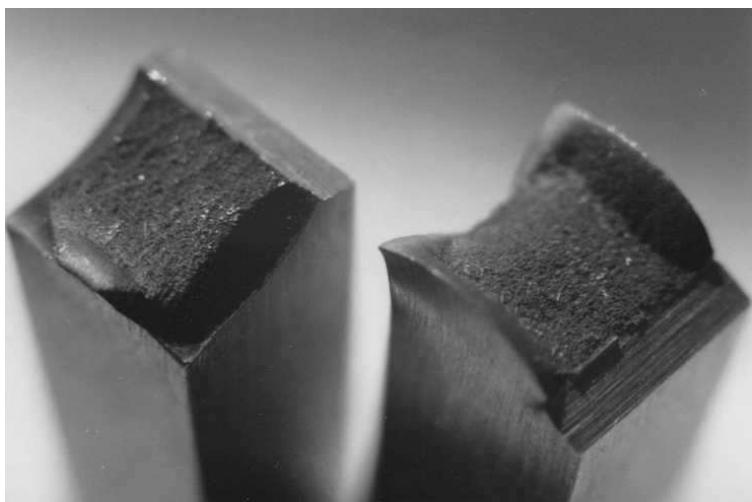


Рисунок 1.1 – Внешний вид вязкого излома аустенитной стали

Зарождение вязкого разрушения в технических металлических материалах связано с образованием пористости материала в области локализованной пласти-

ческой деформации (утяжки) [1, 2]. Микропоры обычно зарождаются в процессе пластического течения на включениях, нерастворенных частицах вторых фаз, (например, карбидах), границах зерен, в полосах деформации или в любых других местах, где наличие несплошности приводит к концентрации пластического течения. Декогезия материала в месте зарождения микропоры может происходить через частицу второй фазы или вдоль границы раздела частица-матрица. По мере увеличения пластической деформации микропоры растут, зарождаются новые; расстояние между крупными микропорами уменьшается; тонкие гребни, разделяющие микропоры, разрываются, и происходит разрушение (*рис. 1.2*).

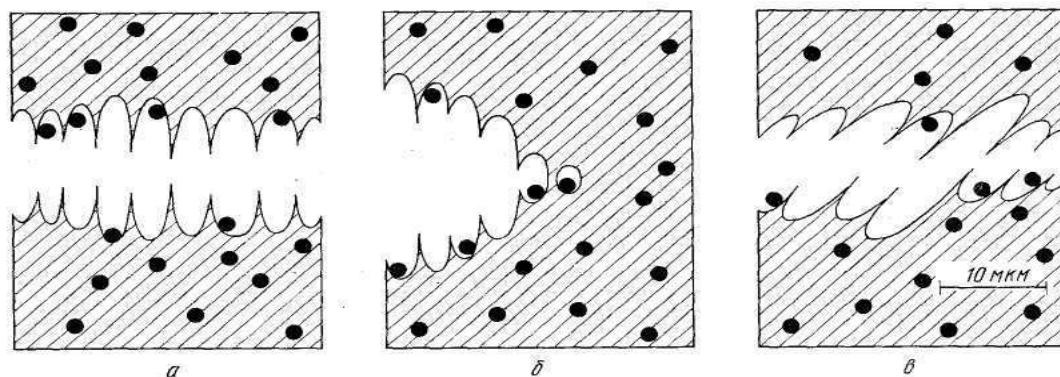


Рисунок 1.2 – Схема вязкого разрушения с образованием ямочного микрорельефа [3]. а- одноосное растяжение, б- внерадиальное растяжение, в- ямки, возникшие при срезе

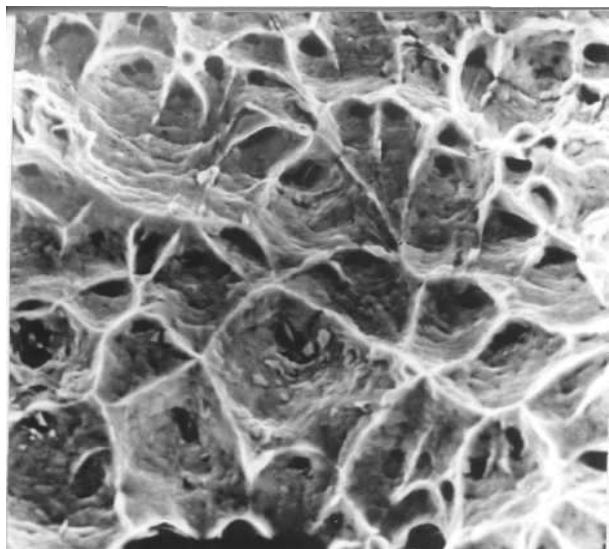
Образованные таким образом поверхности излома содержат многочисленные чашеподобные углубления (ямки). Размеры и форма ямок вязких изломов редко бывают однородными. В технических материалах с характерными для них заметными колебаниями размеров и распределений дисперсных частиц может наблюдаться широкий диапазон размеров и форм ямок [4]. По данным Бичема [5] имеется 14 вариантов формирования ямок в зависимости от напряженного состояния вблизи вершины трещины, что позволяет путем детального анализа их формы реконструировать возможные условия нагружения.

На форму ямок влияет относительное направление максимального напряжения, вызвавшего разрушение. Различают (*рис. 1.3*): равноосные ямки (ямки растяжения), ямки сдвига, ямки отрыва [4-6].

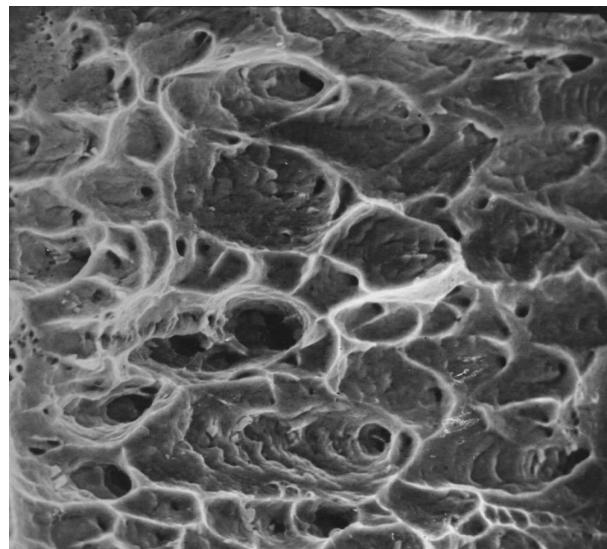
Равноосные ямки (*рис. 1.3 а*) образуются, например, в центральной части излома образца, испытанного при одноосном растяжении. На поверхности губ среза можно наблюдать ямки, вытянутые в одном направлении. Такие ямки называют ямками сдвига (*рис. 1.2 б*). Ямки сдвига на поверхности разрушения вытянуты в одном направлении, а на сопряженной поверхности разрушения – в противоположном. Для ямок сдвига трудно идентифицировать место зарождения микропоры, т.к. карбидная частица или ответственное за нее включение могут быть спрятаны

под ее поверхностью, которая может быть деформирована или сглажена в результате сдвигового смещения в процессе разрушения.

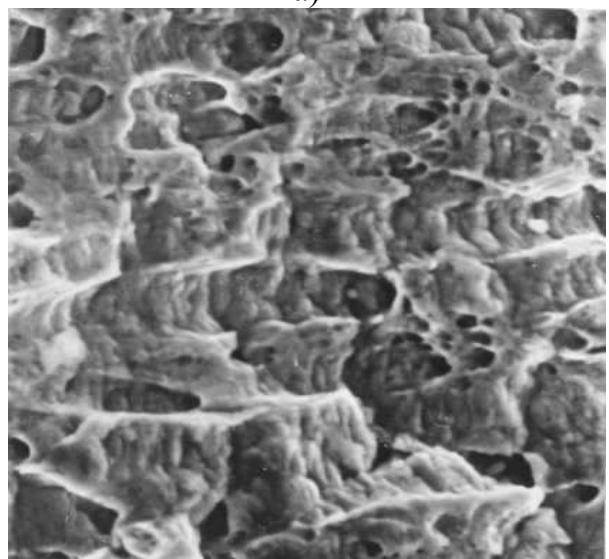
Ямки отрыва (*рис. 1.3 в*) образуются в результате внецентренного напряженного состояния, присущего, например, образцам с надрезом, испытанным на вязкость разрушения или на ударную вязкость. Сильно вытянутые микропоры, которые превращаются в ямки отрыва, как правило, формируются в начальной области роста трещины (в очаге разрушения).



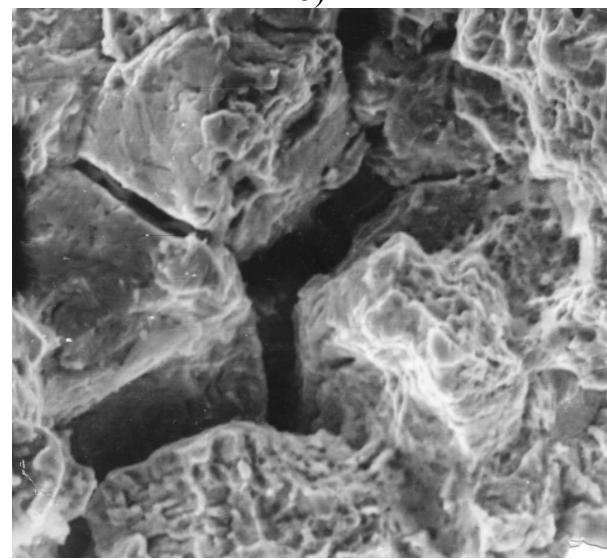
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.3 – Ямочный микрорельеф поверхности излома аустенитных сталей [6, 7]. а– равноосные ямки (сталь H26T3); б– ямки сдвига (сталь H32T3); в– ямки отрыва (сталь 40Х4Г18Н8Ф); г– межзеренное вязкое разрушение (сталь 40Г18Ф). а-г– x1000

Размер ямок зависит от числа мест зарождения микропор и относительной пластичности матрицы. На поверхности ямок видны признаки деформации: скольжение, волнистость, зоны вытяжки. Скольжение происходит по нескольким почти параллельным благоприятно ориентированным плоскостям. По мере развития деформации отдельные плоскости скольжения сглаживаются и образуют волнистую поверхность ямки. Дальнейшая деформация иногда «стирает» детали рельефа и возникает безрельефная поверхность боковой стенки ямки. Вязкое разрушение является преимущественно внутрезеренным, хотя, может быть и межзеренным (*рис. 1.3 г*).

Как правило, вязко разрушаются материалы с ГЦК решеткой (за исключением случая межзеренного хрупкого разрушения), а также материалы с ОЦК решеткой при температурах выше верхней критической температуры хрупкости (см. ниже). Наличие вязкого излома всегда свидетельствует о высокой энергоемкости разрушения (высоких разрушающих напряжениях) и хорошем сопротивлении материала развитию трещины.

1.1.2 Хрупкое разрушение

Хрупкое разрушение - это быстро протекающий, неуправляемый процесс, который часто является причиной аварийного разрушения деталей и элементов конструкций. Зарождение и развитие хрупкой трещины может произойти вследствие понижения температуры эксплуатации изделия, увеличения скорости нагружения, большой толщины детали, наличия в изделии трещины или трещиноподобных дефектов, присутствия в структуре материала вредных примесей и некоторых других причин [2, 6, 8]. Большинство из перечисленных факторов увеличивают стесненность пластической деформации, вызывая снижение пластических характеристик материала. Особое место занимают водородное охрупчивание, коррозия под напряжением, жидкometаллическое охрупчивание. В этом случае, независимо от структуры материала, разрушение происходит по межзеренному хрупкому механизму [2].

Хрупкие изломы обычно имеют кристаллическое строение. Они блестящие или имеют цвет фаз, расположенных по границам зерен. Как правило, изломы прямые, без видимых признаков пластической деформации (отсутствие скосов и зон среза, связанных с пластической деформацией). Утяжка материала вблизи излома отсутствует (*рис. 1.4*).