

**Л.Р. Ботвина**

# **Основы фрактодиагностики**

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2022

*Работа подготовлена при финансовой поддержке  
Российского научного фонда (проект № 19-19-00674)*

УДК 669.15.620.178.74:669.112.227.1

ББК К206.22

Б86

*Рецензент: главный научный сотрудник*

*Института металлургии и материаловедения РАН,  
доктор технических наук, Виктор Михайлович Блинов*

**Б86 Ботвина Л.Р.**

**Основы фрактодиагностики**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2022. – 394 с. ISBN 978-5-94836-637-1**

Рассмотрены основные виды макро- и микростроения изломов и механизмы разрушения конструкционных материалов при статическом, циклическом и динамическом видах нагружения. Описаны методы фрактодиагностики, позволяющие по параметрам изломов оценивать характеристики разрушения.

Приведены примеры анализа изломов при аварийных разрушениях. Определены некоторые общие закономерности, свойственные различным материалам при разных условиях нагружения.

Для специалистов в области механики и физики разрушения, металловедения и обработки материалов, студентов и аспирантов, научных и заводских работников, занимающихся экспертизой преждевременного разрушения конструкций.

© Ботвина Л.Р., 2022

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2022

# Содержание

<b>Введение. Фрактодиагностика – задачи, методы, объекты исследования</b> .....	<b>8</b>
<b>Глава 1. Статическое разрушение</b> .....	<b>13</b>
1.1. Характеристики механики разрушения, контролирующие процесс формирования рельефа изломов.....	13
1.2. Зоны пластической деформации и взаимосвязь размера пластических зон с характеристиками разрушения.....	16
1.3. Поврежденность материала в зоне пластической деформации.....	21
1.4. Влияние моды нагружения на форму пластической зоны.....	25
1.5. Методы оценки размера пластических зон.....	27
1.5.1. Метод микротвердости.....	27
1.5.2. Рентгеноструктурный метод оценки размера зон.....	27
1.5.3. Метод реплик и прямого наблюдения пластических зон.....	31
1.5.4. Метод акустической эмиссии.....	34
1.5.5. Метод корреляции цифровых изображений.....	39
1.6. Стадийность разрушения.....	44
1.7. Виды изломов, макро- и микрорельф разрушения, качественные и количественные характеристики.....	49
1.7.1. Вязкое разрушение.....	52
1.7.2. Вязко-хрупкое разрушение.....	61
1.7.3. Хрупкое разрушение.....	62
1.7.4. Разрушение в условиях смешанных мод нагружения.....	68
Литература.....	71
<b>Глава 2. Динамическое разрушение</b> .....	<b>76</b>
2.1. Ударное разрушение.....	76
2.1.1. Стадийность разрушения ударных образцов.....	76

2.1.2. Кинетика пластических зон в интервале вязко-хрупкого перехода.....	82
2.1.3. Оценка энергоемкости материалов на различных стадиях развития трещины.....	83
2.1.4. Влияние размера образца на микрорельеф изломов.....	92
2.1.5. Фрактографический анализ ударного разрушения криогенных сталей.....	94
2.2. Фрагментация стальных цилиндров при импульсном нагружении.....	106
2.2.1. Зоны разрушения фрагментов, диаграмма динамической фрагментации.....	106
2.2.2. Микроструктура и микрорельеф изломов фрагментов.....	112
2.2.3. Стадийность фрагментации оболочек.....	116
2.2.4. Критерий фрагментации и его взаимосвязь с механическими свойствами и химическим составом материала оболочки.....	118
Литература.....	122
<b>Глава 3. Усталостное разрушение.....</b>	<b>125</b>
3.1. Зарождение усталостной трещины.....	125
3.2. Распространение усталостной трещины.....	130
3.2.1. Макрорельеф и стадийность усталостного разрушения.....	130
3.2.2. Микрорельеф усталостного разрушения.....	139
3.2.2.1. Алюминиевые сплавы.....	140
3.2.2.2. Титановые сплавы.....	146
3.2.2.3. Стали.....	161
3.3. Малые усталостные трещины в алюминиевом сплаве АК4-1Т1.....	171
3.4. О зависимости ширины усталостных бороздок от размаха коэффициента интенсивности напряжений.....	173
3.5. Диаграммы остаточной прочности.....	176
3.6. Фрактальная размерность усталостного разрушения.....	178
3.7. Кинетика зон пластической деформации.....	183

3.7.1. Две пластические зоны при циклическом нагружении.....	183
3.7.2. Каскад пластических зон при усталостном разрушении малоуглеродистой стали.....	190
3.8. Кинетика трещины при смешанных модах циклического нагружения.....	199
3.9. Влияние структуры материала на характеристики и механизмы усталостного разрушения.....	207
3.9.1. Три режима усталостного разрушения.....	207
3.9.2. Структурные эффекты при усталостном разрушении сплава ВТЗ-1.....	209
3.9.3. Связь фазовых превращений в аустенитных сталях с размахом коэффициента интенсивности напряжений.....	212
3.9.4. Влияние расслоений на циклическую прочность и механизм разрушения.....	214
3.10. Усталостное разрушение при переменной температуре.....	217
3.10.1. Термоусталость.....	218
3.10.1.1. Разрушение в условиях поверхностного нагрева.....	218
3.10.1.2. Разрушение в условиях объемного нагрева: макрорельеф и микрорельеф изломов.....	227
3.10.2. Неизотермическая усталость.....	229
3.11. О взаимосвязи механизма и вероятности усталостного разрушения.....	235
Литература.....	238
<b>Глава 4. Коррозионное разрушение.....</b>	<b>247</b>
4.1. Влияние сероводородсодержащей среды на стадийность, механизмы разрушения и механические свойства трубных сталей.....	247
4.1.1. Стадийность и механизмы разрушения трубных сталей 30Г2, L80 и стали 20.....	250
4.1.2. Изменение зоны пластической деформации в результате наводороживания стали 30Г2.....	252
4.1.3. Анализ изломов образцов из стали 30Г2.....	256

4.1.4. Анализ изломов наводороженных образцов из стали 20.....	261
4.1.5. Анализ изломов образцов из стали L80.....	264
4.1.6. Количественный анализ структуры и параметров изломов стали L80.....	272
4.1.7. Оценка зоны пластической деформации после наводороживания стали L80.....	273
4.1.8. Стадийность процесса множественного разрушения под воздействием сероводорода в сталях с различной структурой.....	274
4.1.9. Локализованное разрушение образцов из стали 30Г2 после выдержки в коррозионной сероводородсодержащей среде.....	276
4.2. Влияние сероводородсодержащей среды на механические свойства и механизм разрушения сталей 17Г1С и 09Г2С.....	281
4.3. Влияние расслоений на эксплуатационное разрушение трубопроводов.....	287
Литература.....	294

## **Глава 5. Разрушение в условиях трения-износа и контактной усталости.....**

**297**

5.1. Механизмы износа углеродистых сталей и влияние износа на механические и акустические свойства при растяжении.....	297
5.1.1. Временные изменения потери массы, коэффициента трения, толщины поврежденного слоя и микротвердости.....	299
5.1.2. Механизмы трения и износа.....	302
5.1.3. Акустическая эмиссия, регистрируемая в процессе фрикционных испытаний.....	308
5.1.4. Результаты статических испытаний образцов с регистрацией АЭ после фрикционного воздействия.....	309
5.2. Контактная усталость рельсовых перлитных сталей.....	314

5.2.1. Исследование поврежденности поверхности и поперечных сечений дорожки трения.....	317
5.2.2. Оценка критериев поврежденности и их зависимости от нагрузки и числа циклов.....	320
5.2.3. Статистический анализ поврежденности.....	323
Литература.....	325
<b>Глава 6. Разрушение горных пород.....</b>	<b>328</b>
6.1. Зоны локализации разрушения.....	328
6.2. Анализ распределений длин разломов.....	332
6.3. Механизмы деформации и разрушения.....	334
6.4. Затишье перед критическим событием.....	340
6.5. Фрактальная размерность и $k$ -параметр.....	344
Литература.....	346
<b>Глава 7. Анализ эксплуатационных разрушений.....</b>	<b>348</b>
7.1. Исследование излома пальца растяжки крепления крыши спортивного комплекса в Крылатском.....	348
7.2. Фрактографическое исследование механизмов разрушения винтовой пары стабилизатора самолета Як-42.....	354
7.3. Гигацикловая усталость зубчатого колеса турбокомпрессора.....	360
7.4. Дефекты, вызывающие аварийное разрушение элементов конструкций.....	377
Литература.....	389
<b>Заключение.....</b>	<b>392</b>

# ВВЕДЕНИЕ

## ФРАКТОДИАГНОСТИКА – ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ, ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Факторы, действующие на элемент конструкции и не учтенные в расчете, в некоторых случаях приводят к аварийному разрушению. Исследование истории таких разрушений и выявление причины аварии дает возможность оптимизировать конструкцию или структуру материала и обосновать частоту периодического контроля элементов конструкции. Важную информацию об истории разрушения несет излом. Уже в 16-м веке излом использовали для оценки качества металла. В 1722 г. Р.А. Реомюр *René Antoine de Réaumur* для изучения излома использовал микроскоп, описал макро- и микрорельеф разрушения и предложил классификацию изломов. В нашей стране первые исследования по анализу изломов связаны с именем Д. К. Чернова, который использовал излом для оценки качества термической обработки металла. Электронная микроскопия дала новый импульс развитию этих исследований. У нас в стране это случилось в начале 70-х годов, за рубежом — на несколько лет раньше. Большой вклад в изучение изломов внесли Я. Б. Фридман, Т. А. Гордеева, И. П. Жегина, А. Я. Красовский, О. Н. Романив, А. П. Гуляев и другие исследователи, в том числе М. Л. Бернштейн, под редакцией которого был издан справочник Дж. Феллоуза по фрактографии [Феллоуз, 1982], сыгравший большую роль в изучении особенностей изломов, и Е. А. Шур, который обеспечил качественный перевод.



Итогом этого, более чем 50-летнего периода интенсивного развития фрактографии было получение огромной качественной фрактографической информации, носящей в основном описательный характер и отнесенной к определенному материалу или образцу, испытанному в конкретных условиях. Были выделены основные механизмы и виды разрушения. Их немного — ямки, фасетки скола и межзеренного разрушения, усталостные бороздки, гребни, рубцы, язычки, плато и ряд частных особенностей, характерных для отдельных материалов и видов разрушения, большинство из которых связано с разрушением отдельных структурных элементов. Изучено изменение основного механизма под действием различных факторов в различных материалах и предложены модели образования особенностей рельефа излома. Такая информация важна, но ее трудно использовать при анализе разрушения того же материала в несколько иных условиях. Гораздо меньше получено количественной фрактографической информации, позволяющей связать параметры изломов с характеристиками, оцененными другими методами — рентгеноструктурным анализом, акустической эмиссией, методами механики разрушения и анализа структуры материала. Имеется небольшое число работ, в которых фрактограммы обработаны методами статистики и предложены пока немногочисленные методы, позволяющие по эксплуатационным изломам оценивать некоторые характеристики материала. Однако этих методов мало, и они требуют тщательной проверки путем статистической обработки и проведения стендовых испытаний.

Несмотря на то что имеется огромная фрактографическая информация, относящаяся к определенным материалам и определенным видам нагружения, почти полностью отсутствуют работы, посвященные общим закономерностям формирования рельефа изломов при разных видах нагружения. Это обедняет наши представления о процессе разрушения, не позволяет использовать при его анализе общие подходы, к которым обращаются в других областях науки и техники, и требует создания научной основы для решения задач диагностики по изломам.

Необходимость создания для решения этих задач новой междисциплинарной прочностной науки — *фрактодиагностики*, предметом изучения которой должен стать излом, а целью — качественное и количественное описание истории нагружения, вызвавшего разрушение, была обоснована в книге [Ботвина, 1989]. Выделение фрактодиагностики в отдельный раздел материаловедения (подобно паталогоанатомии в медицине) должно способствовать его развитию и решению задачи обеспечения надежности материала в конструкции.

Фрактодиагностика должна сочетать в себе многие направления в прочности — микро- и макромеханику разрушения, металловедение, физику твердого тела. Она должна связать прочностные и кинетические параметры развития разрушения с характеристиками рельефа изломов и общими закономерностями разрушения в условиях статического, динамического, циклического нагружений при низких и высоких температурах, в условиях трения и износа, действия коррозионных сред, вакуума и других факторов. В рамках фрактодиагностики должны быть найдены частные и общие фрактографические закономерности развития трещин в различных материалах — металлических и полимерных, композиционных и аморфных.

Эти закономерности необходимо связать со структурой материала и прочностными параметрами, со скоростью развития трещины и пластической зоной, с параметрами, оцененными при стендовых испытаниях и полученных в эксплуатации, а также с расчетными и установленными в процессе лабораторных испытаний характеристиками. Новая область науки должна объединить специалистов, изучающих процесс формирования изломов на различных масштабных уровнях, отличающихся несколькими порядками, от микроскопического уровня — до глобального, включающего образование изломов в крупных горных массивах.

Одной из принципиальных задач фрактодиагностики должна стать оценка по виду изломов стадийности развития трещины, частично отраженная в работах [Ботвина, 1989; Клевцов и др., 2007;

Ботвина, 2008], с описанием микрорельфа на разных стадиях разрушения, и переходных значений прочностных характеристик. Такая оценка, по-видимому, необходима как для понимания природы процесса разрушения при различных видах нагружения, так и для установления взаимосвязи физических и механических подходов к его анализу, что требуется и для обеспечения надежности работы конструкции, совершенствования методов ее расчета и диагностики повреждений. Ранее, в 80-е годы, для решения этих задач при ВНИИНМАШ Госстандарта СССР была создана фрактографическая комиссия, объединившая специалистов по анализу изломов. Результатом ее работы было создание нескольких методических рекомендаций по классификации механизмов разрушения, оценке длительности роста усталостной трещины по ширине усталостных бороздок, определению критической температуры хрупкости и характеристик разрушения по виду излома, а также данным рентгеноструктурного анализа изломов, оценке трещиностойкости материала по зоне стартового развития трещины.

Описанию микрорельефа разрушения, а также случаев разрушений были посвящены многие монографии зарубежных авторов [González-Velázquez, 2018; Balan, 2018; Tawancy et al., 2004; Hull, 1999], в которых дана классификация механизмов разрушения, детально описана методология фрактографических исследований и проведения экспертиз аварийных разрушений, рассмотрены основы механики разрушения. Особый интерес представляет книга известного американского исследователя Мак-Ивили, переведенная на русский язык [Мак-Ивили, 2010] и являющаяся, по существу, учебником по анализу изломов.

Содержание предлагаемой читателю книги «Основы фрактодиагностики» несколько отличается от описанных выше, поскольку основное внимание в ней уделено количественной оценке параметров изломов, полученных в различных условиях, и взаимосвязи этих параметров с характеристиками прочности и механики разрушения. Другими словами, *цель монографии* — познакомить читателей с оценкой информативных особенностей изломов

и способствовать, таким образом, развитию умения «читать изломы» образцов и элементов конструкций.

При написании книги нельзя было избежать многих ссылок на старые работы 70–90-х годов — времени интенсивного развития науки об изломах, содержащие основные понятия об особенностях микрорельефа изломов.

Ботвина Л. Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. — М.: Наука, 1989. — 234 с.

Ботвина Л. Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.

Клевцов Г. В., Ботвина Л. Р., Клевцова Н. А., Лимарь Л. В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. — М.: МИСиС, 2007. — 264 с.

Мак-Ивили А. Дж. Анализ аварийных разрушений / Под ред. Ботвиной Л. Р. — М.: Техносфера, 2010. — 416 с.

Феллоуз Дж. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник; под ред. М. Л. Бернштейна / Перевод с англ. Е. А. Шура. — М.: Металлургия, 1982. — 489 с.

Balan K. P. Metallurgical Failure Analysis Techniques and Case Studies // Elsevier, 2018, 294 ps. eBook ISBN: 9780128143377.

González-Velázquez J. L. Fractography and Failure Analysis, Structural Integrity 3 // Springer International Publishing AG, part of Springer Nature Cham, Switzerland 2018, 165. —ps., <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76651-5>.

Hull D. Fractography: Observing, Measuring and Interpreting Fracture Surface Topography // Cambridge University Press; 1999, 386 ps. ISBN-13: 978-0521646840.

Tawancy H. M., Ul-Hamid A., Abbas N. M. Practical engineering failure analysis // New York 10016: Marcel Dekker, 2004, 595 ps.

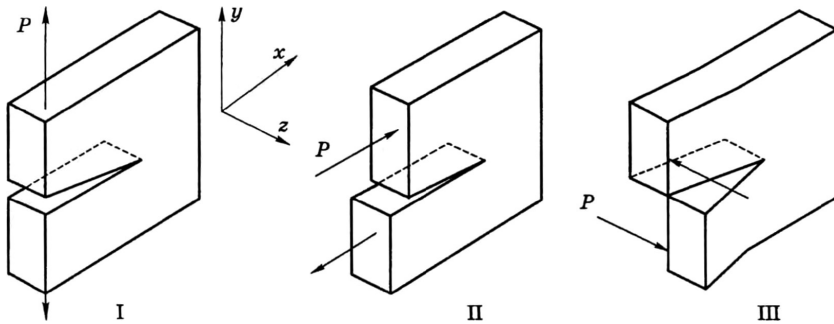
# ГЛАВА I

## СТАТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ

### 1.1. Характеристики механики разрушения, контролирующие процесс формирования рельефа изломов

Развитие идей Гриффитса и Ирвина, приведшее к становлению механики разрушения, было основным достижением наук о материалах в прошлом столетии. Еще одно следствие развития механики разрушения, не отмечаемое в литературе, связано с созданием основы для проведения **количественного анализа макро- и микрорельефа изломов**. Действительно, основной параметр механики разрушения — трещиностойкость, содержит длину трещины, что позволяет связать эту характеристику с изменением рельефа и механизма разрушения в любой точке излома, находящейся на различном расстоянии от очага появления трещины. Ранее это было невозможным, поскольку рельеф излома и механизм разрушения меняется по длине трещины и его трудно количественно связать с интегральными параметрами — напряжением или другой прочностной характеристикой, хотя во многих работах такие попытки делаются.

Развитие механики разрушения, таким образом, сделало возможным не только оценку критического размера дефекта в заданных условиях службы, но обеспечило основу для установления взаимосвязи микро- и макрохарактеристик разрушения, определяемых превалирующим механизмом развития трещины, что способствовало переходу от преимущественно качественных фрактографических исследований с описанием всевозможных видов излома, к количественному анализу истории разрушения. Механика придала значение зоне пластической деформации, формирующейся в устье надреза или трещины, зависящей от коэффициента интенсивности напряжений и определяющей механизм разрушения.



**Рис. 1.1.** Типы трещин: отрыва (I), поперечного (II) и продольного (III) сдвига

Основное влияние на рельеф изломов, помимо структуры и механических свойств материала, оказывает вид или мода разрушения, определяемая ориентацией приложенной нагрузки, в зависимости от которой разрушение сопровождается формированием трех типов трещин (рис. 1.1) [Бичем, 1973; Броек, 1980].

Трещины отрыва (тип I) формируются при нормальном напряжении вследствие перемещения берегов трещины перпендикулярно действующей нагрузке, коэффициент интенсивности напряжения, характеризующий этот тип нагружения, обозначается  $K_I$ . Поперечный сдвиг (трещины типа II) происходит в результате перемещения берегов трещины в плоскости трещины и перпендикулярно ее фронтальной линии, коэффициент интенсивности напряжения для этого типа нагружения обозначается  $K_{II}$ . Трещины продольного сдвига или среза (трещины типа III) образуются при антиплоском сдвиге путем перемещения берегов трещины в ее плоскости параллельно направляющей кромке трещины, коэффициент интенсивности напряжения для этого типа нагружения обозначается  $K_{III}$ . Соответствующие коэффициенты интенсивности напряжений оцениваются по соотношениям:

$$K_I = Y_I \sigma_{xx} \sqrt{\pi a}; \quad K_{II} = Y_{II} \tau_{xy} \sqrt{\pi a}; \quad K_{III} = Y_{III} \tau_{yz} \sqrt{\pi a},$$

где  $Y_I$ ,  $Y_{II}$ ,  $Y_{III}$  — это поправочные коэффициенты,  $\sigma_{xx}$  — номинальное растягивающее напряжение, действующее в направлении, перпендикулярном плоскости трещины,  $\tau_{xy}$  — номинальное

напряжение при сдвиге, действующее в направлении, параллельном плоскости  $xu$  и перпендикулярном фронту трещины,  $\tau_{yz}$  — номинальное напряжение при сдвиге в направлении, параллельном плоскости и фронту трещины,  $a$  — длина трещины.

В процессе службы материала в конструкции возникают различные напряженные состояния, чаще всего включающие несколько составляющих нагрузки, как нормальной, так и сдвиговой. В этом случае говорят о смешанных модах нагружения I+II, I+III, II+III или I+II+III. Несмотря на существование трещин указанных типов, механическое поведение материалов исследуется в основном в условиях действия нормальной нагрузки, например, при растяжении, при котором образуются трещины отрыва типа I, хотя даже в этих условиях, помимо трещин отрыва, в локальных областях образца или конструкционного элемента могут формироваться сдвиговые трещины.

Таким образом, при выборе материала и его структурного состояния, а также при прогнозировании поведения материала в конструкции возможность развития сдвиговых повреждений не учитывается, что не позволяет обеспечить надежность материала на различных стадиях нагружения.

Согласно рекомендациям стандарта ASTM E399 [Стандарт ASTM E399] для соблюдения условий линейно-упругого анализа и корректной оценки трещиностойкости  $K_{IC}$  в условиях плоскодеформированного состояния требуется, чтобы толщина образца ( $t$ ) превышала размер пластической зоны  $r_p$ , т. е.

$$t \geq 2,5(K^2/\sigma_Y^2).$$

В том случае, если условия корректной оценки трещиностойкости не соблюдаются из-за высокой пластичности материала, оценивается раскрытие в вершине трещины (crack tip opening displacement — CTOD) в соответствии со стандартом (Стандарт ASTM E 1290; ГОСТ 25.506-85) при испытании образцов с надрезом и предварительно нанесенной усталостной трещиной.

Значения раскрытия CTOD ( $\delta_c$ ) определяются по смещению в вершине трещины, регистрируемому датчиком смещения в устье надреза. В случае хрупкого разрушения значение раскрытия вершины

трещины соответствует критическому значению ( $\delta_c$ ), связанному с трещиностойкостью следующим соотношением [ГОСТ 25.506-85] :

$$CTOD_c = \delta_c = 4(K_{Ic})^2 / \pi \sigma_{0,2} E.$$

Для оценки трещиностойкости материала с высокой пластичностью используют еще один критерий нелинейной механики разрушения ( $J$ -интеграл) и его критическое значение ( $J_c$ ), оцениваемое по соотношению:

$$J_c = \eta A_c / t(b - l),$$

где  $\eta$  — коэффициент, зависящий от геометрии образца,  $A_c$  — работа пластической деформации, оцениваемая по площади под диаграммой деформации,  $t$ ,  $b$  — толщина и ширина образца,  $l$  — длина трещины.

Условие корректности оценки этого параметра при плоской деформации следующее:

$$t \geq 0,635 (J_{Ic} / \sigma_{0,2}^2).$$

При оценке  $J_{Ic}$  наблюдается значительная пластическая деформация у вершины трещины, поэтому график зависимости нагрузки от смещения не является линейным.

## 1.2. Зоны пластической деформации и взаимосвязь размера пластических зон с характеристиками разрушения

Пластическая зона, формирующаяся в устье надреза, несет информацию о виде нагружения, о приложенной нагрузке и коэффициенте интенсивности напряжения, т. е. о напряженном состоянии, которое реализуется в вершине надреза образца. В зависимости от условий испытания меняется стесненность деформации, обусловленная составляющей деформации в направлении толщины образца. При уменьшении температуры испытания и увеличении толщины образца или приложении циклической нагрузки стесненность пластической деформации возрастает, поскольку составляющая деформации в направлении толщины  $\epsilon_z$  становится близкой к нулю ( $\epsilon_z = 0$ ), что приводит к уменьшению размера пластической зоны и приближению



к условию, необходимому для корректной оценки характеристики трещиностойкости материала  $K_{Ic}$ . Эта характеристика не зависит от толщины образца, считается константой материала и соответствует плоскодеформированному линейно-упругому состоянию, реализующемуся в условиях отрыва при нагружении типа I (рис. 1.2). При меньшей толщине стесненность деформации снижается, растет вклад поверхности образца, обусловленный ростом деформации в направлении толщины образца, пластическая зона увеличивается и реализуется плосконапряженное состояние, которое характеризуется составляющей напряжения  $\sigma_z$  в направлении толщины, близком к нулевому значению ( $\sigma_z = 0$ ) и коэффициентом  $K_c$  [Irwin, 1948].

Теоретические оценки показали [Irwin, 1948], что размер пластической зоны  $r_y$  в условиях плоскодеформированного состояния равен:

$$r_y = 1/6\pi(K_I/\sigma_{0,2})^2,$$

а в условиях плосконапряженного:

$$r_y = 1/2\pi(K_I/\sigma_{0,2})^2.$$

Интенсивные исследования пластической зоны в металлах в конце 60-х — начале 70-х годов прошлого столетия [Hahn and Rosenfield, 1965; Hahn et al., 1972; Broek, 1968; Broberg, 1968; Екобори, 1978] привели к установлению зависимостей между размером, формой пластических зон и напряженным состоянием материала при статическом и циклическом нагружении. Были введены понятия зоны пластического шарнира (*hinge-type zone*), перпендикулярной направлению

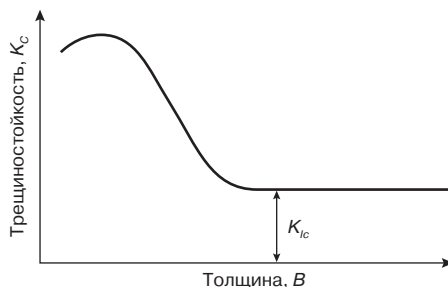


Рис. 1.2. Схема зависимости трещиностойкости от толщины образца

плоскости трещины и образующейся при низких напряжениях, сдвиговой пластической зоны (*45-degree shear zone*), формирующейся при более высоких напряжениях, и зоны предразрушения, или *зоны процесса (fracture process zone)*, сопровождающей развитие макротрещины. Форма этих зон определяется напряженным состоянием, реализующимся в вершине трещины. Для описания локализованной деформации в устье трещины были предложены известные модели Г. И. Баренблатта [Баренблатт, 1961], Д. С. Дагдейла [Dugdale, 1960], М. Я. Леонова — В. В. Панасюка [Панасюк, 1968].

Авторы первых экспериментальных работ по пластической зоне в металлах [Hahn and Rosenfield, 1965; Hahn et al., 1972] обнаружили важную особенность формирования зоны при вязком разрушении металлических материалов в условиях статического и циклического нагружения, связанную с образованием в вершине развивающейся трещины двух пластических зон с разной степенью упрочнения материала. Эта особенность обнаруживается и при разрушении полимеров, аморфных и квазихрупких материалов, хотя вид повреждений, характеризующих две зоны в этих материалах, различен и определяется структурой материала.

Зоны локализации разрушения наблюдают и вблизи разломов земной коры. В вершинах сдвиговых разломов развивается зона предразрушения [Scholz et al., 1993; Vermilye, Scholz, 1998; Scholz, 2002], область фрагментации пород (*cataclasis zone*) и зона сдвига. В вершинах разломов, развивающихся путем отрыва, выделяют когезивную зону (*cohesion zone*), которая эквивалентна зоне процесса разрушения и содержит трещины отрыва. За этой внутренней зоной следует область меньшей поврежденности.

Из многочисленных ранних работ следует, что пластическая зона зависит от многих факторов, перечисленных ниже и определяющих взаимосвязь механических свойств со структурой и геометрией образца.

1. Понижение температуры испытания и увеличение скорости нагружения уменьшают размер пластических зон [Георгиев и др., 1977, 1980], причем в области хрупкого разрушения

- он может быть меньше расчетного значения зоны и близок к размеру структурного элемента [Taira et al., 1973].
2. На форму и размер пластической зоны сильно влияет коэффициент деформационного упрочнения [Hahn, Rosenfield., 1965]; с его понижением зона уменьшается и вытягивается в направлении развития трещины.
  3. Размер пластической зоны существенно зависит от толщины образца и вида напряженного состояния [Vosikovsky, 1970; Findley, Drucker, 1965]; с уменьшением толщины реализуется плосконапряженное, состояние и зона увеличивается.
  4. Зависимость степени пластической деформации в зоне от температуры испытания аналогична температурной зависимости сопротивления материала развитию трещины [Георгиев и др., 1977, 1980], поэтому она может быть использована для оценки критических температур хрупкости. Имеется три температурно-скоростных интервала, отличающихся характером и величиной локальной пластической деформации в вершине трещины; при вязком разрушении характер распределения пластической деформации перед трещиной почти не меняется с увеличением напряжения или с понижением температуры.
  5. Структурные изменения в зоне могут быть использованы для сравнительной оценки энергоемкости процесса разрушения материалов, близких по прочности [Георгиев и др., 1977, 1980].
  6. Размер пластической зоны связан с трещиностойкостью соотношением  $r_y = A(K/\sigma_{0,2})^2$  с коэффициентом  $A$ , зависящим от напряженного состояния и определяющим корректность оценки трещиностойкости.
  7. Характер излома зависит от отношения размера пластической зоны к размеру зерна и толщине образца, с уменьшением этого отношения в интервале вязкохрупкого разрушения возрастает доля участков хрупкого разрушения [Екобори, 1978; Yasunaka, Araki, 1975].

Полученные результаты свидетельствуют о связи зоны пластической деформации с напряженным состоянием, возникающим в вершине трещины. Исследование кинетики зоны и степени пластической деформации в ней в интервале вязкохрупкого перехода позволяет изучить закономерности их изменения при плоской деформации, плосконапряженном состоянии и в области перехода одного состояния в другое.

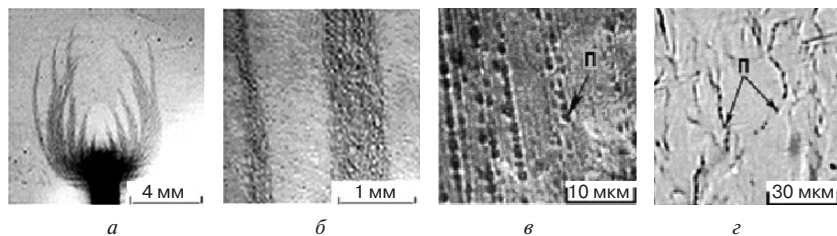
Размер пластической зоны определяет механизм разрушения, поэтому его оценка важна и для установления причины разрушения. Имеется целый ряд методов оценки размера зон, включающих прямое наблюдение зоны на поверхности образца, термическое окрашивание зоны или ее травление, метод делительных сеток, электронной и световой микроскопии, рентгеновский метод (микро- и макропучков), метод снятия реплик на различных стадиях развития разрушения, который часто используют для изучения кинетики накопления усталостных микротрещин или развития поврежденности материала в процессе ползучести. Обзор этих методов приведен в [Ботвина, 1989]. Рентгеновский метод исследования с использованием рентгеновских макропучков, диаметр которых значительно больше размера зерен материала, делает необходимым послойное травление материала с поверхности образца или излома. Метод микропучков, соизмеримых с размером зерна, можно использовать для непосредственного измерения пластической зоны на боковой поверхности образца. Поскольку в этом случае диаметр пучка близок размеру зерна, дифракционную картину регистрируют в виде отдельных пятен-рефлексов, несущих информацию о параметрах тонкой кристаллической структуры материала. Применение макропучков дает интегральную картину структурных изменений материала в облучаемой области [Клевцов, 1999]. Метод микропучков, несмотря на свои преимущества, требует большого времени экспозиции и использования прецизионных рентгеновских микропучковых камер.

В последние годы для оценки размера и формы пластической зоны приобрел популярность метод корреляции цифровых

изображений [González et al., 2019; Hosdez et al., 2019], связанный с фотографированием окрашенной поверхности образца в процессе испытаний и последующей компьютерной обработкой данных. Этот метод позволяет получать поля распределений компонент деформаций на разных стадиях деформирования, фиксировать форму пластической зоны и ее размеры. Оценка зоны может быть выполнена и методом акустической эмиссии, если при его применении используется несколько датчиков, позволяющих определять расположение очага разрушения.

### 1.3. Поврежденность материала в зоне пластической деформации

Использование метода реплик, или прямого наблюдения полированной поверхности образцов позволило получить информацию о форме и размере пластической зоны, а также о поврежденности материала в ее пределах. Эти данные, полученные для образцов из малоуглеродистой стали, представлены на рис. 1.3. Зона, образующаяся в вершине надреза, имеет вид «тюльпана» с лепестками — локализованными полосами деформации (рис. 1.3*а, б*). Внутри полос наблюдаются многочисленные поры, располагающиеся в местах концентрации напряжений — на царапинах, оставшихся после механической обработки, и на границах зерен (рис. 1.3*в, г*).

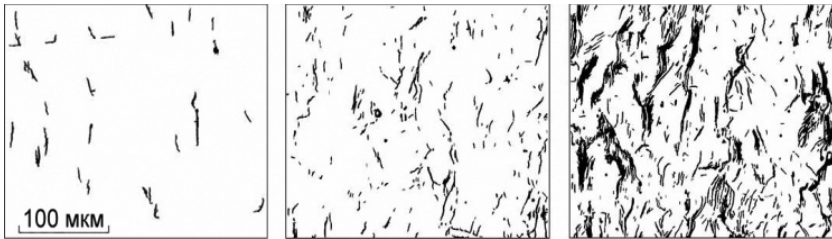


**Рис. 1.3.** Пластическая зона в вершине надреза образца из малоуглеродистой стали на начальной стадии растяжения (*а*), локализованные полосы деформации в пластической зоне (*б*), поры в полосах деформации в местах механических (*в*) и структурных дефектов (*г*)

На ранних стадиях нагружения степень деформации в полосах незначительна и полосы чередуются с недеформированными областями. Внутренняя часть пластической зоны, примыкающая к вершине предварительной трещины, сильно деформирована, что свидетельствует о том, что в вершине надреза развиваются две зоны — сильно- и слабдеформированная. В устье пластической зоны даже на ранней стадии нагружения образуются микротрещины, инициирующие развитие полос деформации. С повышением нагрузки размер зон увеличивается, на ее лепестках появляются боковые «побеги», их число растет, что приводит к росту количества самих лепестков и увеличению площади пластического деформирования. Затем полосы локализованной деформации начинают сливаться, и пластическая зона становится сплошной. При этом увеличивался радиус внутренней сильно-деформированной зоны, возникшей на ранних стадиях нагружения.

Микротрещины в зоне появляются при нагрузке, близкой к нагрузке общей текучести в результате слияния пор в полосах механического повреждения (царапинах на полированной поверхности образца) (рис. 1.4), а на более поздней стадии — в результате слияния пор по границам зерен.

Картины поврежденности материала в пластической зоне можно характеризовать данными по длине ( $l$ ), раскрытию ( $\delta$ ) и плотности ( $\rho$ ) микротрещин, либо по  $k$ -критерию концентрации микротрещин, предложенному в работе [Журков, Куксенко, 1969], характеризующему процесс накопления повреждений и равному отношению плотности микротрещин ( $n$ ) к их средней длине ( $L_{cp}$ ):  $k = n^{-1/2}/L_{cp}$ .



**Рис. 1.4.** Микротрещины на различных стадиях нагружения в образце толщиной 4 мм из малоуглеродистой стали с размером зерна  $d = 97$  мкм: а)  $P/P_{0,2} = 1,19$ ; б)  $P/P_{0,2} = 1,38$ ; в)  $P/P_{0,2} = 1,52$

Для оценки этого критерия эти авторы использовали результаты расчета характеристик взаимодействия трещин [Панасюк, Лозовий, 1962; Панасюк, 1968], согласно которым взаимодействие двух плоских коллинеарно расположенных трещин в упругой среде начинается в тот момент, когда отношение  $a/L$  расстояния между трещинами к их длине становится меньше 3. Экспериментальные оценки критерия  $a/L$  в полимерных образцах совпали с прогнозируемыми значениями. Таким образом, при  $a/L > 3$  трещины изолированы и не влияют друг на друга, а при  $a/L < 3$  — взаимодействуют и сливаются.

Оценка перечисленных параметров поврежденности выполняется с использованием компьютерной программы анализа изображений. Результат такой оценки длины  $L$  и накопленного числа микротрещин  $\Sigma N$  в образцах разной толщины и на разных стадиях нагружения приведен на рис. 1.5.

Из данных, представленных на рис. 1.5а–в, следует, что с увеличением относительной нагрузки при растяжении образцов из малоуглеродистой стали меняется вид функции, описывающей распределение микротрещин по длине: экспоненциальное распределение дефектов, отвечающее соотношению

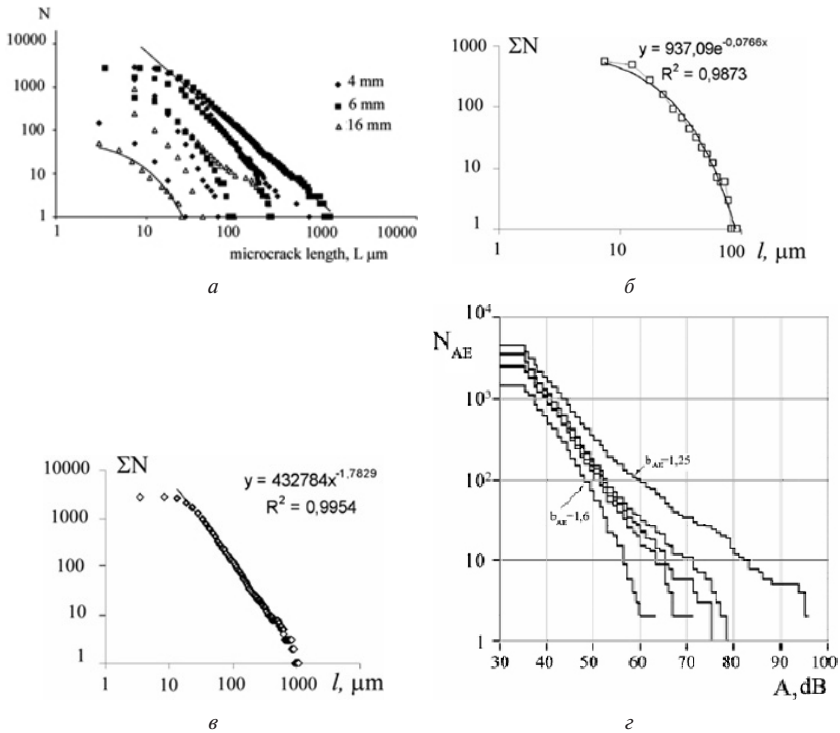
$$\Sigma N_c = A \exp(-cl),$$

меняется степенным соотношением:

$$\lg N_c = B - b_c \lg l,$$

что происходит в результате слияния более мелких дефектов. Сравнение распределений образцов разной толщины при одинаковой относительной нагрузке [Ботвина, 2008] показывает, что с увеличением толщины образца показатель  $b_c$  в степенном соотношении, описывающем распределение, снижается. В ряде случаев экспоненциальное распределение сохраняется и на финальных стадиях нагружения, при этом показатель экспоненциального соотношения также уменьшается с увеличением нагрузки.

Подобная смена экспоненциальной функции на степенную наблюдается и при анализе кумулятивных распределений числа событий акустической эмиссии по амплитуде, регистрируемых в процессе испытаний (рис. 1.5г) и описываемых подобными



**Рис. 1.5.** Кривые накопленной поврежденности в образцах из малоуглеродистой стали различной толщины и на разных стадиях растяжения (а), и в образцах толщиной 6 мм при относительной нагрузке  $P/P_{0,2} = 1,7$ , смещении  $\delta = 2,8$  (б) и  $P/P_{0,2} = 2,1$ , смещении  $\delta = 5,2$  (в), а также амплитудные распределения сигналов акустической эмиссии на различных стадиях нагружения (г) при  $P < P_{0,2}$  (кривая 1),  $P > P_{0,2}$  (кривые 2, 3),  $P = P_{max}$  (4),  $P > P_{max}$  (кривая 5) [Ботвина и др., 2013]

соотношениями. В начале нагружения эти распределения описывались экспоненциальной функцией:

$$\lg N_{AE} = D - \exp(-c_{AE} l),$$

а затем приближались к степенной функции

$$\lg N_{AE} = B - b_{AE} \lg A_{AE}.$$

(Здесь и в дальнейшем параметры приведенных уравнений, характеризующие развитие микротрещин и акустическую активность, отмечены нами индексами  $c$ ,  $AE$  соответственно).



#### 1.4. Влияние моды нагружения на форму пластической зоны

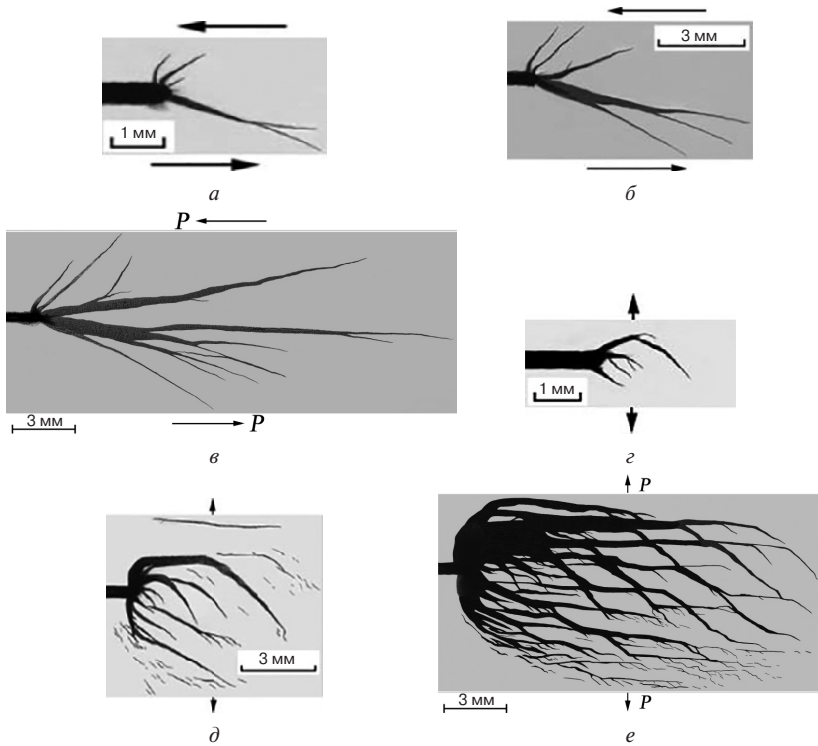
Анализ литературных данных по смешанным модам нагружения показывает, что большинство исследований по этому вопросу посвящены либо моделям роста трещины, либо оценке трещиностойкости материала в условиях смешанного нагружения. Влияние сдвиговых нагрузок на геометрию зон пластической деформации почти совсем не отражены в литературе, хотя подобная информация необходима для прогнозирования работоспособности материала при различных видах нагружения. Результаты таких оценок [Ботвина и др., 2011, 2013, 2016] показывают (рис. 1.6), что в результате сдвига кардинально меняется форма пластической зоны, что влечет за собой такое же резкое изменение картин микротрещин в этих зонах и рельефа изломов.

Как видно из рисунков, в условиях сдвига снижается площадь пластических зон и их ширина, а протяженность зон становится больше. Это свидетельствует о большей локализации пластической деформации в условиях сдвига и, по-видимому, является причиной развития трещины без значительной пластической деформации в сравнении с образцами, испытанными на отрыв.

Как показано в [Ботвина, Ильченко, 2008; Ботвина и др., 2022], сдвиговое нагружение может привести и к смене вязкого механизма разрушения хрупким, то есть вызвать повышение критической температуры хрупкости и, как следствие, преждевременное разрушение.

Сравнение геометрии пластических зон при отрыве и сдвиге обнаруживает еще одну особенность зон, развитие которых, подобно росту кристаллов, сопровождается появлением ветвей второго и третьего порядка, причем процесс такого ветвления более интенсивно протекает в условиях отрыва (рис. 1.6).

Кроме того, при переходе к сдвиговому разрушению уменьшается радиус пластической зоны в вершине трещины. Это означает уменьшение «зоны вытягивания» (*stretched zone*), которая наблюдается на поверхности изломов в области зарождения трещины от надреза (или предварительно нанесенной усталостной трещины), или в области затупления трещины при смене механизма или стадии



**Рис. 1.6.** Пластические зоны у вершины надреза в плоских образцах из малоуглеродистой стали толщиной 4 мм в условиях сдвига (*а, б, в*) и отрыва (*г, д, е*) на различных стадиях нагружения при относительной нагрузке  $P/P_{\max}$ , равной 0,2 (*а, г*), 0,4 (*б, д*) и 0,6 (*в, е*); стрелками отмечено направление действия нагрузки [Ботвина и др., 2013]

разрушения. Геометрические размеры зоны пластической деформации и зоны вытягивания определяются параметрами линейной и нелинейной механики разрушения.

Известно, что подобную взаимосвязь с характеристиками механики разрушения проявляет шаг усталостных бороздок, наблюдаемых на поверхности усталостных изломов, а также площадь хрупкого излома ударных образцов. Эти результаты количественного анализа изломов будут обсуждаться далее наряду с качественными характеристиками поверхности разрушения при различных видах нагружения.

## 1.5. Методы оценки размера пластических зон

### 1.5.1. Метод микротвердости

При оценке размера пластической зоны *методом микротвердости* зону деформации можно наблюдать визуально на боковой поверхности полированного образца (рис. 1.7а).

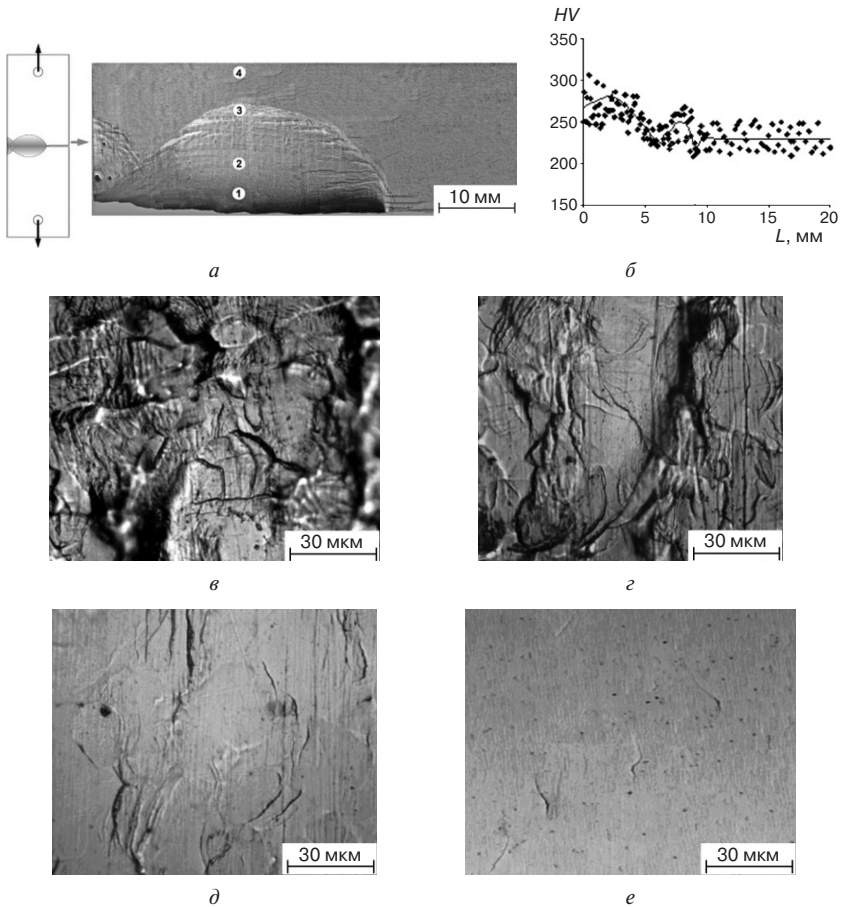
При этом изменение структуры зоны характеризуют значения микротвердости (рис. 1.7б), которые уменьшаются с увеличением расстояния от поверхности излома, что сопровождается снижением плотности микротрещин, развивающихся по полосам скольжения и по границам зерен, а также их длины и раскрытия (рис. 1.7б, в–е).

При оценке зоны таким методом состояние материала внутри зоны определяют значения микротвердости, которые снижаются и достигают значений микротвердости недеформированного материала. Соответственно этой характеристике, меняется и микро-рельеф боковой поверхности образца (рис. 1.7в–г), вблизи излома наблюдаются многочисленные полосы скольжения с микротрещинами внутри них.

### 1.5.2. Рентгеноструктурный метод оценки размера зон

Кинетика пластических зон в металлических материалах с разной структурой, оцененная методом рентгеноструктурного анализа, и детали этого метода отражены в работах Г. В. Клевцова с коллегами [Клевцов, 1999; Клевцов и др., 2007; Ботвина и др., 1982].

Размер пластической зоны рентгеновским методом определяется согласно методике [Р 50-54-52/2-94] путем многократного чередования оценки на дифрактометре ширины дифракционной линии ( $\beta$ ), характеризующей искаженность кристаллической структуры металла, и сравнения слоя металла с поверхности излома. Измерения выполняются до тех пор, пока ширина дифракционной линии не достигает значения  $\beta_0$ , соответствующего недеформированному материалу. Толщина сравненного слоя, соответствующая достижению  $\beta_0$ , принимается за глубину пластической



**Рис. 1.7.** Зона локализованной деформации в устье надреза (а), зависимость микротвердости  $HV$  от расстояния от надреза  $L$  (б) и микро рельеф поверхности образца с надрезом из малоуглеродистой стали в точках 1–4 (а) на расстояниях 3 (б), 8 (в), 13 (з) и 20 мм (д) от поверхности излома; [Ботвина и др., 2016]

зоны  $h_y$ . Построение зависимостей  $\beta-h$  (рис. 1.8) показало, что при вязком разрушении вблизи поверхности излома формируется сильнодеформированная пластическая зона  $h_{yh}$ , искаженность кристаллической решетки в которой более высокая, чем в слабодеформированной зоне, граничащей с недеформированным материалом.

Выделение двух пластических зон имеет принципиальное значение, потому как их размер характеризует влияние толщины образца и температуры испытания на характеристики прочности, и в частности, на трещиностойкость, что следует из рис. 1.2. Увеличение толщины образца (рис. 1.8а), как и снижение температуры испытания (рис. 1.8б), приводит к уменьшению или полному

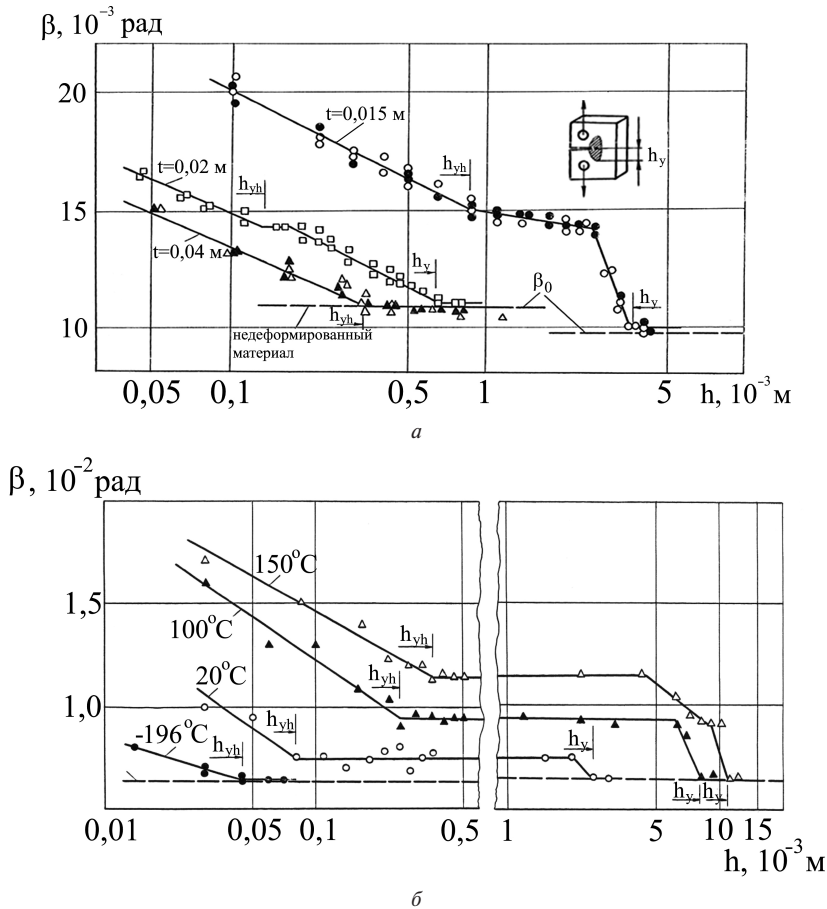
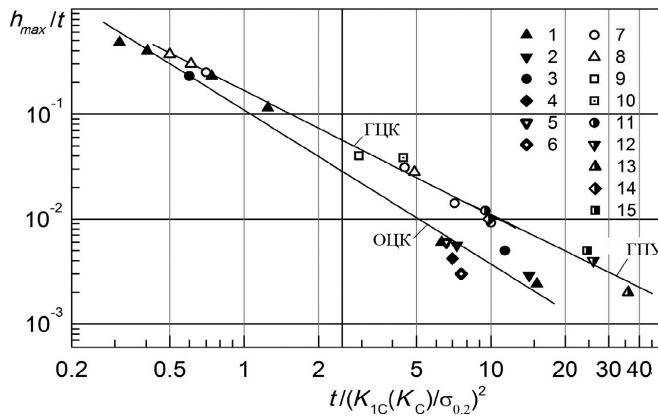


Рис. 1.8. Ширина дифракционной линии ( $\beta$ ) в функции расстояния от излома для образцов из алюминиевого сплава Д16Т различной толщины (а) и образцов из стали 20, испытанных на растяжение при различной температуре

исчезновению слабдеформированной зоны. Это позволяет использовать глубину пластической зоны, или ее отношение к толщине образца ( $h_{\max}/t$ ) в качестве условия корректности оценки трещиностойкости.

Появление слабдеформированной макрзоны связано с началом общей текучести материала образца, сильнодеформированная микрizona образуется в результате упрочнения материала и локализации деформации на стадии предразрушения [Клевцов, Ботвина, 1984; Klevtsov et al., 1996; Ботвина и др., 1982].

Развитие рентгеновского метода с использованием образцов, имеющих различную кристаллографическую и зеренную структуру, подтвердило существование двух пластических зон и привело



**Рис. 1.9.** Связь критериев  $t/(K_{IC}/\sigma_{0,2})^2$  и  $h_{\max}/t$  для материалов с ОЦК решеткой (темные точки), ГЦК решеткой (светлые точки) и ГПУ решеткой (комбинированные точки) в крупнозернистом состоянии (1–4, 7–9, 11, 14) и в ультрамелкозернистом состоянии (5, 6, 10, 12, 13, 15). Вертикальная линия соответствует принятому критерию корректности оценки трещиностойкости:  $t/(K_{IC}/\sigma_{0,2})^2 \geq 2,5$ . 1 — сталь 20; 2 — сталь 40; 3 — сплав Fe-0.15C-2Cr-1Mo-1V; 4 — сталь 9MnSi5; 5 — сталь 45 (РКУП); 6 — сталь 9MnSi5 (РКУП); 7 — алюминиевый сплав ENAW-2024; 8 — сталь Fe-0.03C-13Cr-0.1N-19Mn; 9 — алюминиевый сплав ENAW-2618A; 10 — алюминиевый сплав ENAW-2618A (РКУП); 11 — сплав Ti-6Al-4V; 12 — сплав Ti-6Al-4V (РКУП); 13 — сплав Ti-6Al-4V (РКУП + ИЗТО); 14 — сплав Ti-6Al-4Mo; 15 — сплав Ti-6Al-4Mo (ротационная ковка) [Klevtsov et al., 2020]

к установлению количественной взаимосвязи параметров корректности оценки трещиностойкости путем механических испытаний и с использованием рентгеновского метода [Клевцов, Ботвина, 1984; Ботвина, 1989; Klevtsov et al., 2020].

Как видно из рис. 1.9, на котором жирной линией обозначена вертикальная граница условия корректности оценки трещиностойкости ( $t/K^2/\sigma_Y^2 \geq 2,5$ ), ряд материалов с различной кристаллографической структурой располагаются правее этой границы. Это означает, что для корректной оценки трещиностойкости этих материалов требуется более жесткое условие, т. е. проведение испытаний образцов большей толщины.

Кроме того, из рисунка следует, что установленная взаимосвязь параметров, близкая линейной, характерна для материалов с обычным и ультрамелким зерном. Оценка критерия  $h_{\max}/t$  имеет преимущество перед «механическим» критерием правомерности определения трещиностойкости, поскольку его можно использовать при анализе аварийного разрушения деталей и элементов конструкций.

Как следует из рис. 1.8, при использовании рентгеновского метода оценки размера пластической зоны структуру материала внутри зоны характеризует ширина дифракционной линии  $\beta$ .

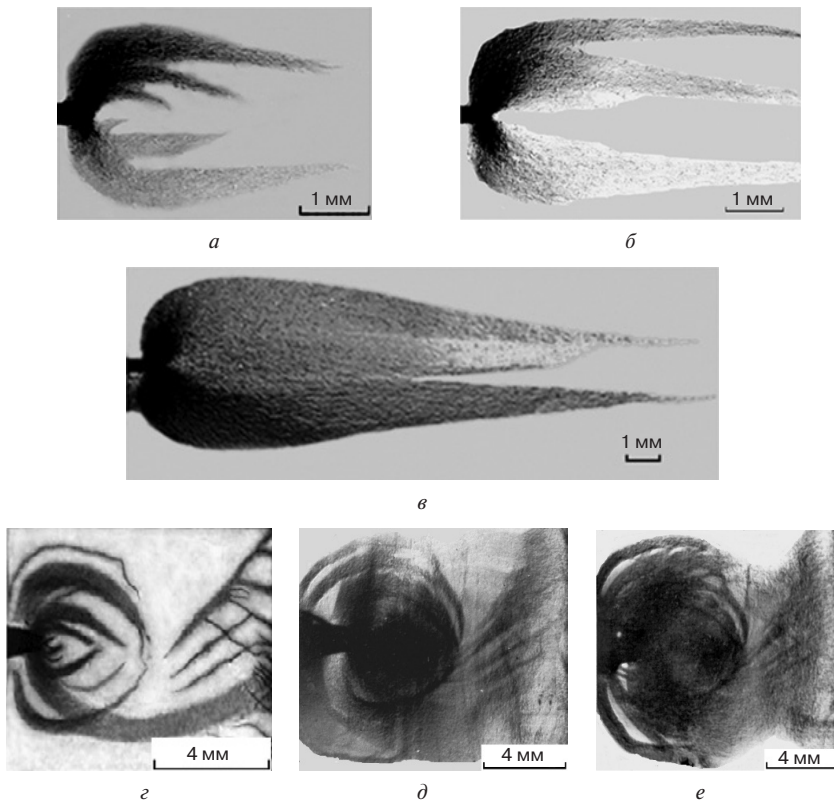
### 1.5.3. Метод реплик и прямого наблюдения пластических зон

Для наблюдения и оценки размера пластических зон используется метод реплик, позволяющий определять размер пластической зоны в процессе испытаний, а также метод прямого изучения поверхности полированных образцов под микроскопом.

Метод реплик, в отличие от метода микротвердости и рентгеноструктурного анализа, позволяет проследить кинетику формирования пластической зоны в процессе нагружения, поскольку он предполагает снятие реплик с боковой поверхности полированного образца на различных стадиях нагружения. Наблюдение реплик на оптическом микроскопе позволяет оценивать размеры пластической зоны, ее ширину ( $w$ ), длину ( $L$ ) и радиус ( $r_y$ ) на разных

стадиях нагружения, а также длину ( $l$ ) и число ( $N$ ) микротрещин в зоне. Стадию нагружения можно характеризовать смещением образца в захватах машины ( $\delta$ ), отношением текущей нагрузки к максимальной ( $P/P_{\max}$ ) или к нагрузке общей текучести материала ( $P/P_{0,2}$ ) [Ботвина и др., 2005; Tyutin et al., 2005; Тютин, 2006].

На рис. 1.10 показаны наблюдаемые пластические зоны, сформировавшиеся в вершине надрезов образцов из малоуглеродистой стали различной толщины на различных стадиях растяжения.



**Рис. 1.10.** Пластические зоны в вершине надреза образцов из малоуглеродистой стали толщиной  $t = 2,5$  (а–в) и 16 мм (з–е) на различных стадиях растяжения, соответствующих относительным значениям максимальной нагрузки  $P/P_{\max} = 0,6$  (а, з),  $P/P_{\max} = 0,8$  (б, д) и  $P/P_{\max} = 0,9$  (в, е) [Ботвина и др., 2005; Ботвина и др., 2013]



Они имеют сложную структуру, которая претерпевает изменения в процессе нагружения. На начальном этапе деформации, отвечающем линейному участку диаграммы деформирования, в устье электроискрового надреза (его углах и вблизи дефектов) формировалась зона пластического шарнира в виде двух «усов», расположенных под прямым углом к направлению нагружения и под углом  $\sim 45^\circ$  по отношению к толщине образца. Достижение нагрузки развитой текучести ( $P_{0,2}$ ), соответствующей концу линейного участка диаграммы, и ее превышение приводило к дальнейшему развитию пластических зон.

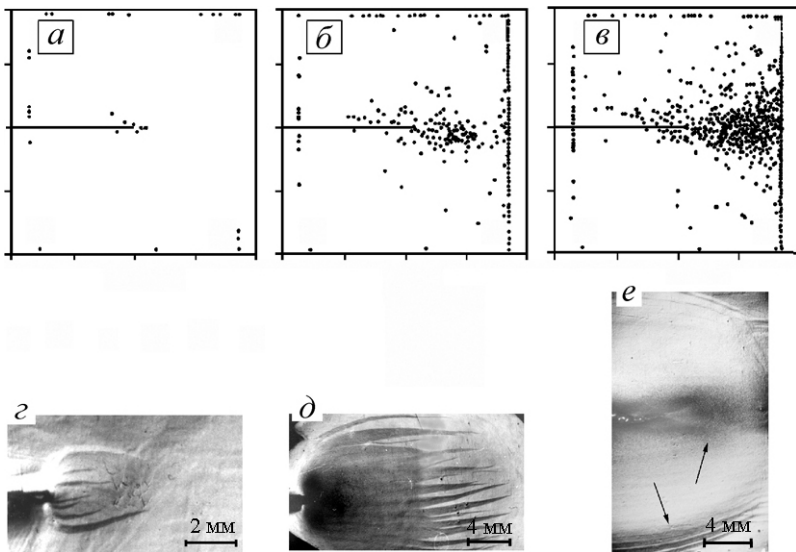
Пластические зоны имеют вид «тюльпана» (рис. 1.10). На ранних стадиях деформации внешние полосы слабой пластической деформации — лепестки «тюльпана» (рис. 1.10а, б, г) — чередуются с недеформированными областями. Внутренняя часть пластической зоны, примыкающая к вершине предварительной трещины в области «усов», сильно деформирована, т.е. в надрезе развиваются две зоны — сильно- и слабodeформированная. В устье пластической зоны видны микротрещины, развивающиеся из надреза и инициирующие развитие полос деформации. Таким образом, на ранней стадии деформирования пластическая зона состоит из полос деформированного и недеформированного материала. С повышением нагрузки размер зон увеличивается, полосы локализованной деформации сливаются, и пластическая зона становится сплошной (рис. 1.10д, е). При этом увеличивается радиус внутренней сильнодеформированной зоны, возникшей на ранних стадиях нагружения. При максимальной нагрузке формируется макротрещина, и вторичная зона пластической деформации в ее вершине. При достижении пластической зоной противоположной стороны образца появляются ответные ветви полос деформации (рис. 1.10г—е).

Итак, измерение зон показывает, что их форма и размер меняются с увеличением нагрузки и толщины образца. Во всех этих случаях наблюдаемые изменения формы и размера пластических зон приводят к изменению характеристик разрушения.

Структуру и поврежденность пластических зон можно характеризовать количественно путем прямого наблюдения под микроскопом картины поврежденности в зонах, формирующихся в образцах или репликах на разных стадиях нагружения.

#### 1.5.4. Метод акустической эмиссии

Другим способом оценки пластической зоны является метод акустической эмиссии (АЭ). На рис. 1.11 в качестве примера представлены результаты [Ботвина и др., 2005; Ботвина, 2008] измерения сигналов АЭ при растяжении плоских образцов с надрезом из малоуглеродистой стали с применением нескольких датчиков, обеспечивающих локацию акустических событий. Видно, что число сигналов растет



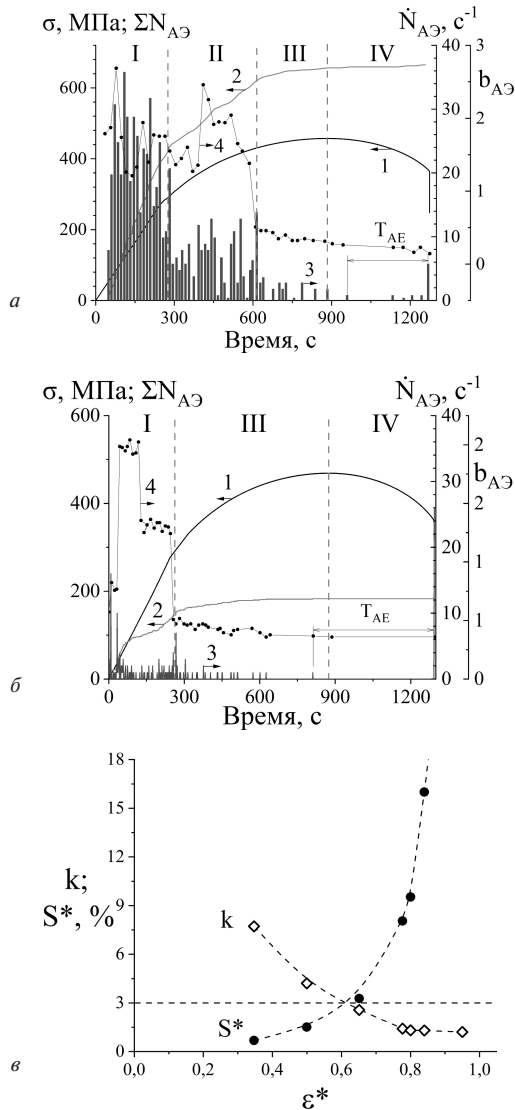
**Рис. 1.11.** Результаты локации сигналов акустической эмиссии (*a*, *б*, *в*) на различных стадиях нагружения образца из малоуглеродистой стали толщиной 4 мм и соответствующие этим стадиям зоны пластической деформации в вершине надреза, полученные методом реплик (*z*, *д*, *e*): *a* — смещение  $\delta = 0,78$  мм,  $P/P_{0,2} = 0,6$ ; *б* —  $\delta = 1,84$  мм,  $P/P_{0,2} = 1,21$ ; *в* —  $\delta = 13,35$  мм,  $P/P_{0,2} = 0,45$ . Стрелками отмечены границы двух пластических зон перед разрушением образца [Ботвина, 2008; Ботвина и др., 2005, 2016]

в области концентратора и «акустическая картина» накопления поврежденности соответствует форме пластической зоны, выявленной методом реплик на разных стадиях нагружения. Возрастание нагрузки (и смещения  $\delta$  образца в захватах машины) выше величины, соответствующей началу макроскопической текучести по диаграмме нагружения ( $P_{0,2}$ ), приводит к увеличению размера пластической зоны, что соответствует изменению распределения сигналов АЭ. Сопоставление локационных карт источников сигналов и соответствующих фотографий пластической зоны показало, что наибольшая плотность сигналов АЭ (рис. 1.11б) проецируется на траекторию макротрещины, точнее, в области вторичной пластической зоны, которая формируется в вершине трещины в пределах первоначальной зоны. (показана стрелками на рис. 1.11е).

Важно отметить, что начало локализации пластической деформации у вершины трещины перед разрушением отражается на временных зависимостях характеристик акустической эмиссии (рис. 1.12), оцененных при растяжении образцов из малоуглеродистой стали: суммарном числе сигналов ( $N_{АЭ}$ ), активности эмиссии ( $\dot{N}_{АЭ}$ ) и  $b_{АЭ}$ -парамetre акустической эмиссии, характеризующем долю высокоамплитудных сигналов [Ботвина и др., 2013]:

$$20 \cdot \log N_{АЭ} = \text{const} - b_{АЭ} \cdot A_{АЭ}.$$

Из рисунка следует, что изменения характеристик акустической эмиссии малоуглеродистой стали следуют определенной стадийности, включающей: стадию I интенсивной акустической эмиссии и роста суммарного числа акустических сигналов на участке упругой деформации до достижения предела текучести; стадию II резкого снижения активности эмиссии и  $b_{АЭ}$ -параметра в области деформационного упрочнения; стадию III снижения активности эмиссии и достижения плато на зависимостях суммарного числа акустических сигналов и  $b_{АЭ}$ -параметра; стадию IV, начинающуюся при достижении максимальной нагрузки и характеризующую малым количеством акустических событий в ее начале, а затем — почти полным их отсутствием (область акустического затишья), в конце которой появляются высокоамплитудные акустические



**Рис. 1.12.** Диаграммы деформации (1), временные зависимости накопленного числа (2), активности (3) и  $b_{AЭ}$ -параметра (4) акустической эмиссии для образцов из малоуглеродистой в исходном состоянии (а); после циклического нагружения при  $\sigma_f = 330$  МПа до  $N_f/N_f = 0,3$  (б) [Ботвина и др., 2013, 2018]; деформационные зависимости  $k$ -параметра и площади поврежденной поверхности  $S^*$  (в)

сигналы, предшествующие разрушению. При испытании других материалов «акустические особенности» на разных стадиях деформирования изменяются, хотя влияние стадийности остается определяющим [Башков, 2004, 2012].

С увеличением нагрузки и при ее приближении к максимальной на кривой суммарного числа сигналов (кривая 2) появляется плато, свидетельствующее об уменьшении числа сигналов вследствие локализации разрушения и образовании зоны пластической деформации. Этому моменту соответствует снижение интенсивности эмиссии, резкое падение  $b_{AЭ}$ -параметра и появление акустического затишья ( $T_{AЭ}$ ) до окончательного разрушения образца. При приложении предварительной циклической нагрузки до растяжения (рис. 1.12б) локализация процесса разрушения, т. е. плато на временной зависимости числа сигналов АЭ, начинается раньше, как и резкое снижение  $b_{AЭ}$ -параметра. Это означает, что эти акустические параметры могут служить критериями диагностики разрушения. Рис. 1.12в это подтверждает, так как показывает, что с увеличением деформации растет площадь поврежденной поверхности и снижается  $k$ -параметр концентрации микротрещин, характеризующий расстояние между ними [Журков, Куксенко, 1969].

Более того, распределения кумулятивного числа акустических сигналов по амплитуде, описываемые соотношением:

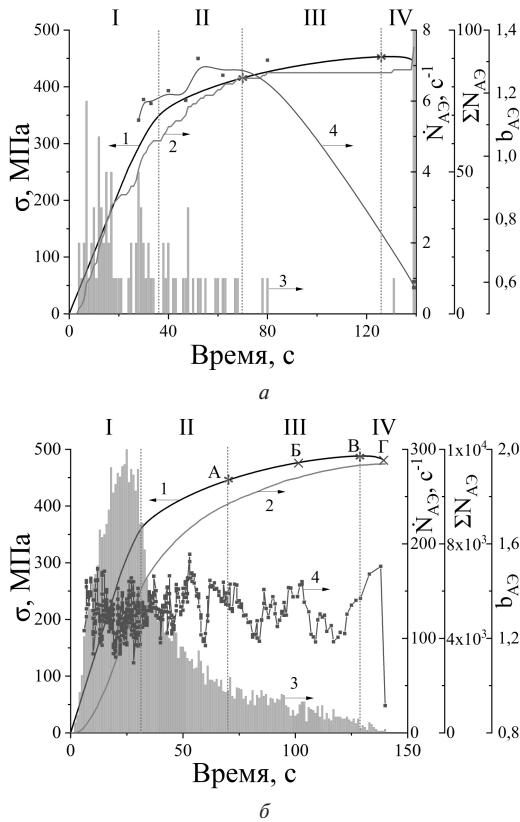
$$20 \cdot \log \sum N_{AЭ} = \text{const} - b_{AЭ} \cdot A_{AЭ},$$

оказываются подобными распределениям кумулятивного числа микротрещин в пластической зоне  $\sum N_C$  по их длине  $l_C$

$$\log \sum N_C = \text{const} - b_C \cdot l_C.$$

При приближении к моменту разрушения характер этих распределений меняется от экспоненциального к степенному и оба параметра ( $b_{AЭ}$  и  $b_C$ ) снижаются.

На рис. 1.13 представлены результаты оценки параметров акустической эмиссии при растяжении алюминиевого сплава Д16ч в исходном состоянии и после длительной эксплуатации в качестве



**Рис. 1.13.** Временные зависимости напряжения  $\sigma$  (1), скорости счета  $\dot{N}_{AЭ}$  (2), суммарного числа  $\Sigma N_{AЭ}$  (3) сигналов АЭ и  $b_{AЭ}$ -параметра (4), [Ботвина и др., 2022], полученные при испытании образцов из сплава Д16ч до (а) и после (б) эксплуатации. Звездочками отмечена точка деструкции материала [Рыбакова, 1998] и предел прочности материала. Точки А, Б, В соответствуют времени, при котором были оценены картины деформаций, представленные на рис. 1.14

материала обшивки фюзеляжа самолета Ил-62М со сроком службы более 28 лет. На представленных графиках наблюдаются те же особенности и стадии, которые были обнаружены при растяжении малоуглеродистой стали (рис. 1.12). Но после эксплуатации возрастает интенсивность (или скорость счета сигналов акустической эмиссии)  $\dot{N}_{AЭ}$ , накопленное число акустических сигналов  $\Sigma N_{AЭ}$

и значения  $b_{AЭ}$ -параметра, уменьшается период акустического затишья, а «полка» на временной зависимости суммарного счета становится более пологой.

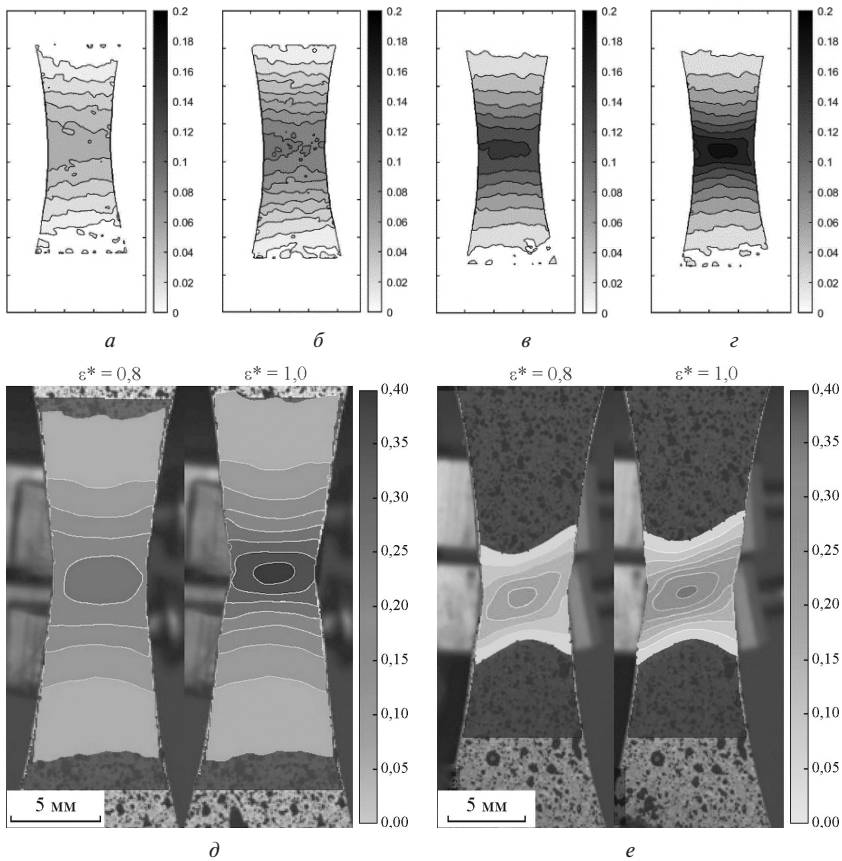
### 1.5.5. Метод корреляции цифровых изображений

В последние годы появился и интенсивно развивается метод корреляции цифровых изображений (КЦИ), позволяющий в процессе нагружения оценить локальное деформированное состояние материала и площадь пластической зоны [Blaber et al., 2015]. При его применении на поверхность рабочей части образцов наносится контрастное покрытие, и в процессе нагружения с некоторой периодичностью снимаются фотографии окрашенной поверхности образца, которые затем обрабатываются с использованием компьютерной программы. Это дает возможность получить поля распределений компонент деформаций  $e_x$ ,  $e_y$  и  $e_{xy}$ , а также главных деформаций  $e_1$ ,  $e_2$  на разных стадиях деформирования образца.

На рис. 1.14 представлены картины распределений главных деформаций  $e_1$  на различных стадиях растяжения того же образца из обшивки самолета, акустические параметры которого показаны на рис. 1.13б. Рис. 1.14а соответствует началу локализации и образования слабodeформированной зоны пластической деформации (точка А на рис. 1.13). При дальнейшем деформировании площадь слабodeформированной зоны пластической деформации растет (рис. 1.14б), и при достижении предела прочности образца образуется сильнодеформированная зона (рис. 1.14в, точка В на рис. 1.13), в которой происходит локализация деформации на поздней стадии разрушения (рис. 1.14г).

На рис. 1.14д, е представлены картины полей главной деформации  $e_1$  в образцах из стали 20 с крупнозернистой (д) и субмикроструктурной (е) структурой на стадии зарождения сильнодеформированной пластической зоны (при относительной деформации  $\epsilon^* \approx 0,8$ ) и непосредственно перед разрушением образца ( $\epsilon^* \approx 1$ ).

Как видно, зона пластической деформации образца из стали с субмикроструктурной структурой (рис. 1.14е) значительно



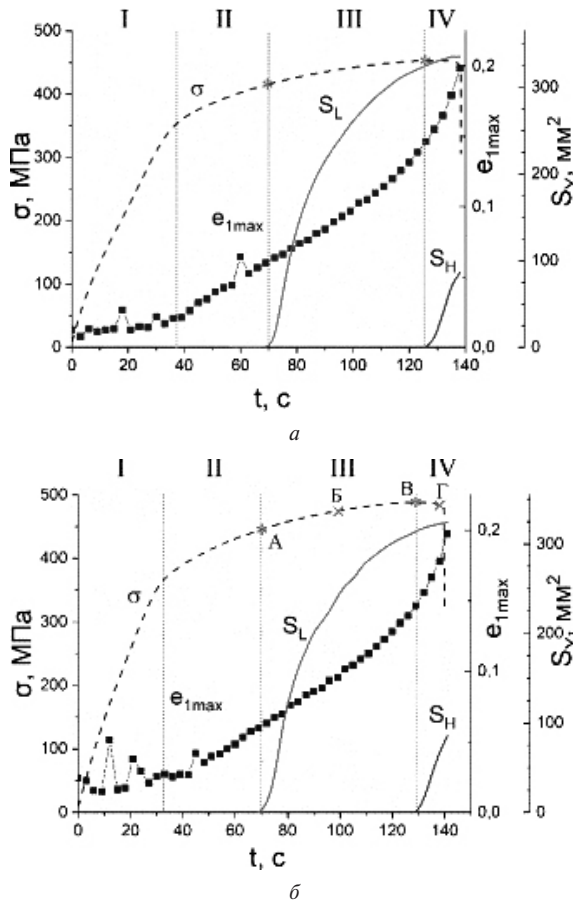
**Рис. 1.14.** Картины главных деформаций  $\epsilon_1$  на различных стадиях растяжения, полученные методом КЦИ для образцов из сплава Д16с после испытаний в течение 70 секунд (а), 100 с (б), 129 с (в) и 138 с (г) и образцов из стали 20 с крупнозернистой (д) и субмикроструктурной (е) структурой [Ботвина, Тютин и др., 2022]

меньше по площади, чем у образца с крупнозернистой структурой (рис. 1.14д), и в отличие от образца с крупнозернистой структурой, наклонена к оси нагружения, что вызвано сдвиговой неустойчивостью материала с субмикроструктурной структурой.

Для количественной оценки слабо- и сильнодеформированных пластических зон выбраны значения главных деформаций  $\epsilon_1$ ,



отвечающие значениям деформации  $e_1 > 0,01$  и  $e_1 > 0,35$  соответственно, и построены деформационные зависимости площадей оцененных пластических зон и максимальных главных деформаций (рис. 1.15). Как видно из полученных зависимостей, резкий рост площади слабodeформированной пластической зоны  $S_L$  начинается после достижения предела текучести образца. При пределе



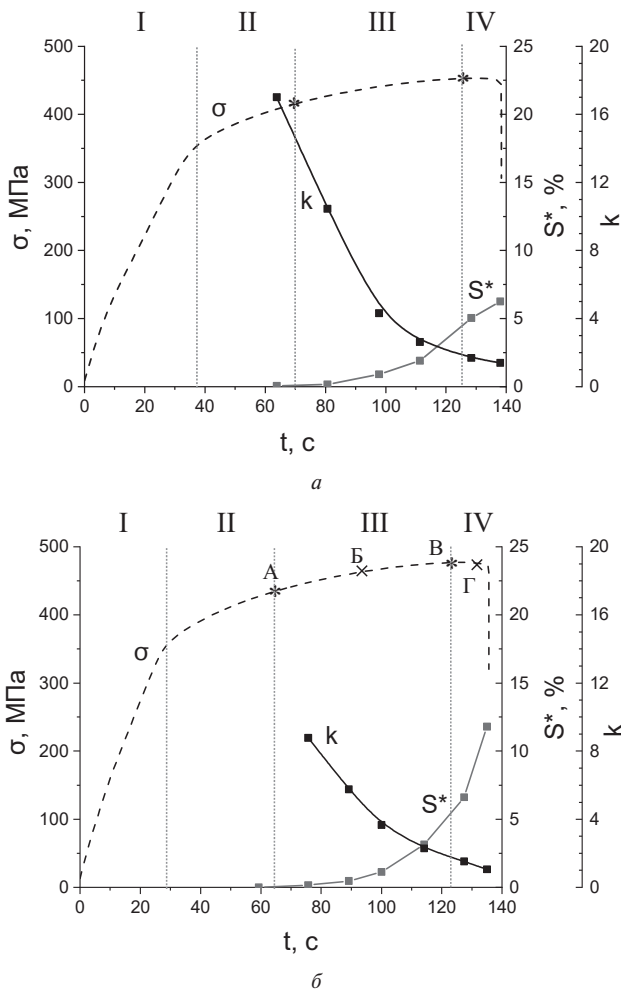
**Рис. 1.15.** Временные зависимости напряжения  $\sigma$ , площади слабodeформированной  $S_L$  и сильnodeформированной зоны  $S_H$ , а также максимальной главной деформации  $e_{1max}$ , полученные при испытании образцов из сплава Д164 до (а) и после (б) эксплуатации

прочности деформационные зависимости площади этой зоны выходят на плато, которое сохраняется до разрушения образца. Сильнодеформированная пластическая зона с площадью  $S_H$  формируется в центре рабочей части образца после достижения относительной деформации около 0,9 (рис. 1.15з) и линейно увеличивается вплоть до разрушения. Значения максимальных главных деформаций  $\epsilon_{1\max}$  начинают расти после достижения предела текучести на стадии II.

Итак, анализ экспериментальных результатов показал, что резкое снижение активности акустической эмиссии совпадает с началом роста слабо- и сильнодеформированных зон пластической деформации (точки А и В на рис. 1.13 и 1.15). Наблюдаемый эффект можно объяснить локализацией пластической деформации и связанным с этим уменьшением деформируемого объема образца, в котором регистрируются сигналы АЭ. Кроме того, полученные методом КЦИ данные позволяют заключить, что время появления слабodeформированной зоны коррелирует с началом периода акустического затишья. Время, соответствующее началу формирования сильнодеформированной зоны, связано с резким снижением  $b_{AЭ}$ -параметра.

Таким образом, результаты, полученные методом корреляции цифровых изображений КЦИ (*DIC — Digital Image Correlation*), подтверждают данные акустической эмиссии, и его использование облегчает задачу установления взаимосвязи размеров зон и деформации в зонах со стадийностью разрушения, кинетикой поврежденности и физическими характеристиками.

Измерение площади поврежденной микротрещинами поверхности образцов ( $S^*$ ) дополнило картину развития разрушения алюминиевого сплава (рис. 1.16) и показало, что зарождение и начало роста поврежденности совпадает с точкой деструкции материала, т.е. переходом от стадии II к стадии III. А увеличение доли поврежденной поверхности и снижение  $k$ -параметра на стадии III, коррелирует с началом периода «акустического затишья», ускоренный рост поврежденности на стадии IV соответствует началу формирования сильнодеформированной зоны и резкому снижению  $b_{AЭ}$ -параметра. Достижение  $k$ -параметром значения 3,



**Рис. 1.16.** Временные зависимости напряжения  $\sigma$ , относительной площади поврежденной поверхности  $S^*$  и концентрационного  $k$ -параметра при испытании образцов из сплава Д16ч до (а), после (б) эксплуатации. Звездочками отмечены точка разрушения (А) [Рыбакова, 1998] и предел прочности (В)

соответствующего согласно [Панасюк, Лозовий, 1962] слиянию микротрещин, происходит непосредственно перед переходом к финальной стадии IV.