

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Российская академия естественных наук

**ВЕСТНИК
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 40

Москва
Новокузнецк
2018

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. Вып. 40 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянец (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018 – 178 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 57, табл. 16, библиогр. назв. 244.

Редакционная коллегия: Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянец М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Максимов А.А., д.т.н., проф., г. Новокузнецк; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., ИрНИТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., АО «Евраз – ЗСМК», г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

© Сибирский государственный индустриальный университет, 2018

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Галевский Г.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Деев В.Б.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Исмагилов З.Р.	д-р хим. наук, проф., чл.-кор. РАН, ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
Козырев Н.А.	д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Немчинова Н.В.	д-р техн. наук, проф., ИрНИТУ, г. Иркутск
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Соколов А.К.	д-р техн. наук, проф., ИГЭУ, г. Иваново
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Феоктистов А.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Шур Е.А.	д-р техн. наук, проф., АО «ВНИИЖТ», г. Москва

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	7
<i>А.М. Достоева, Д.У. Смагулов, Н.В. Немчинова</i>	
Исследование фазовых превращений в системе Al-Zr-Fe-Si	8
<i>И.Н. Кель, В.И. Жучков</i>	
Эффективное применение борсодержащих материалов в современных металлургических технологиях	15
<i>А.В. Настюшкина, Е.А. Шевченко, А.А. Шевченко</i>	
Анализ технологии дефосфорации стали в условиях АО «Уральская сталь»	22
<i>С.Н. Анучкин</i>	
Взаимодействие наночастиц ZrO_2 с расплавом никель-олово	25
<i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, Е.С. Прусов, С.В. Сметанюк, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, А.А. Сокорев</i>	
Определение доли твердой фазы по данным компьютерного термического анализа процесса кристаллизации расплава	34
<i>Г.Е. Левшин</i>	
Многовариантный подход к расчету параметров магнитопроводов индукционных тигельных печей	40
<i>О.В. Кузнецова, М.В. Темлянцев, Е.Н. Темлянцева</i>	
К вопросу об учете неравномерности перемещения заготовок при математическом моделировании процессов нагрева металла в методических печах	49
<i>С.А. Кондрашов, Э.М. Голубчик, Т.Ю. Мартынова</i>	
Новая технология производства холоднокатанного металла в условиях стана 2500	53
<i>Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, Р.Е. Крюков</i>	
Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов	63
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	69
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, И.В. Ноздрин</i>	
Физико-химическая аттестация железосодержащего техногенного сырья	70
<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Природные твердые углеродистые материалы в современной металлургии: виды, свойства, применение	78

<i>А.Е. Аникин, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, Н.М. Кулагин, В.В. Васильев, Г.Н. Черновский</i>	
Искусственные твердые углеродистые материалы в современной металлургии	89
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	98
<i>А.А. Иванов, Т.Н. Осколкова</i>	
Вакуумная термическая обработка стали 30ХГСА	99
<i>Е.С. Прусов, Д.А. Ткач, В.Б. Деев, Е.М. Рахуба</i>	
Количественный анализ структуры композиционных сплавов с применением программы ImageJ	106
<i>В.А. Кузнецов, Р.А. Шевченко, А.А. Усольцев, Н.А. Козырев, Р.Е. Крюков</i>	
Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали	111
<i>Е.А. Шур, В.Н. Цвигун, Р.С. Койнов</i>	
Модели образования фрактографических рельефов на усталостных трещинах	118
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ..	136
<i>А.В. Феоктистов, О.Г. Приходько, К.В. Пономарева, С.В. Морин, О.В. Гордеева</i>	
Применение подходов проектного менеджмента при производстве рельсовой продукции на АО «ЕВРАЗ ЗСМК»	137
<i>Л.Б. Павлович, З.Р.Исмагилов, К.А. Дятлова</i>	
Оценка каталитических свойств отвального силикомарганцевого шлака Кузбасса	139
<i>А.К. Соколов</i>	
Повышение эффективности энергосбережения при эксплуатации многозонных проходных печей	147
<i>А.И. Куценко, Е.Г. Лашкова</i>	
Корпоративная идентификация бизнеса как составляющая стратегического репутационного развития организации	154
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ	169
<i>Ю.К. Осипов, О.В. Матехина</i>	
Архитектурное проектирование как образовательный процесс	170
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	176

УДК 539.3.669.01

Е.А. Шур¹, В.Н. Цвигун², Р.С. Койнов²

¹ВНИИЖТ, Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

МОДЕЛИ ОБРАЗОВАНИЯ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ РЕЛЬЕФОВ НА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИНАХ

Описаны результаты прямых наблюдений за процессом разрушения различных материалов у вершины усталостной трещины сквозь прозрачный образец. Предложена модель продвижения усталостной трещины как шарнира с механической точкой вращения берегов трещины, которая у хрупких материалов совпадает с вершиной трещины, а у пластичных материалов находится на некотором расстоянии от нее в глубине образца. Эта модель позволила объяснить механизм образования основных характерных рельефов на фрактограммах при усталостном разрушении: наличие усталостных бороздок у пластичных материалов и отсутствие их у хрупких, образование траковых следов и других рельефов.

The results of direct observations of the process of destruction of various materials at the top of the fatigue crack through a transparent sample are described. A model is suggested for the motion of a fatigue crack as a hinge with a mechanical point of rotation of the crack edges, which in brittle materials coincides with the crack tip, and near the plastic material is at some distance from it at the depth of the sample. This model made it possible to explain the mechanism of formation of the main characteristic reliefs on fractograms during fatigue failure: the presence of fatigue striations in plastic materials and their absence in brittle, the formation of traces and other reliefs.

ОБОЗНАЧЕНИЯ:

УТ – усталостная трещина;

ВУТ – вершина усталостной трещины;

V_F – угол разрушения у ВУТ;

V_R – угол остаточной деформации у ВУТ;

УБ – усталостная бороздка;

Имеется множество статей, посвященных моделям и микромеханизмам роста трещин при циклическом [1-7] и однократном нагружении [8-11]. Известно, что для этих трещин частично повторяются некоторые универсальные особенности разрушения материалов у вершины трещины. В работе эти явления изучали при росте усталостной трещины (УТ) с помощью прямых экспериментов, наблюдая за вершиной усталостной трещины (ВУТ) сквозь прозрачный образец в поляризованном свете. При этом в зоне менее 0,1 мм у ВУТ можно наблюдать за образованием усталостных бороздок в полиметилметакрилате (ПММА) и полиэтилене, изучать вид ВУТ, открытие УТ, фазы роста, закрытия и микромеханизмы ротационных микросдвигов.

В работе все усталостные испытания проводили на призматических образцах 25×6×3 мм (толщина образцов иногда уменьшалась до 1 мм). Острый надрез глубиной 1 мм на образцах наносили абразивной пилой (молибденовая проволока диаметром 0,1 мм и алмазная паста). Образец промывали в толуоле в режиме кавитации и в нем выращивали УТ длиной 1-2 мм. Потом на образце с этой УТ можно было измерять скорость роста УТ, механизмы роста или определять вязкость разрушения. Исследования проводили на множестве таких образцов, изготовленных из рельсовой стали, 30ХГСА, 55ХГСФ. Все три стали подвергали термической обработке по различным режимам с получением широкой гаммы структур и твердостей. Кроме того, исследовали рост УТ в стали Гадфильда, 09Г2С, 12ХНЗА, трансформаторной стали, алюминиевых сплавах, в силикатном стекле, полиметилметакрилате, полиэтилене, полистироле, поликарбонатах и керамике.

Усталостные бороздки

По идее профессора Л.Т. Дворникова (СИБГИУ) работа механической системы у ВУТ похожа на шарнир. Мы предположили, что этот шарнир имеет точку вращения, различающуюся для разных материалов. Для хрупких материалов эта точка вращения шарнира (O_1) совпадает с ВТ (рисунок 1 а). Для квазихрупких материалов эта точка вращения O_2 находится правее, на пересечении линий, продолжающих берега УТ (рисунок 1 б). При этом у вершины УТ возникает небольшая пластически деформированная зона и низкая (десятки микрон) ступенька, геометрия которой чаще всего – это часть полуокружности, соединяющей стенки трещины (рисунок 2 б).

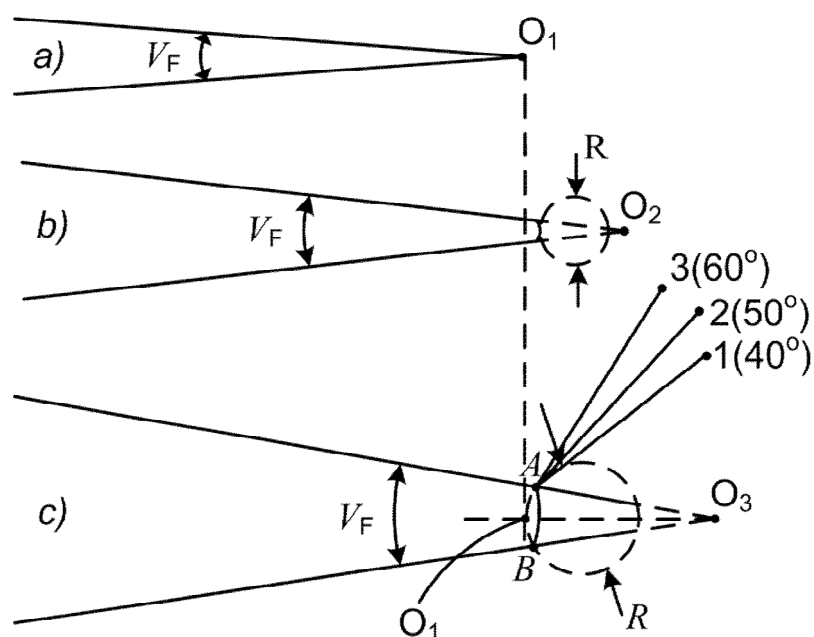
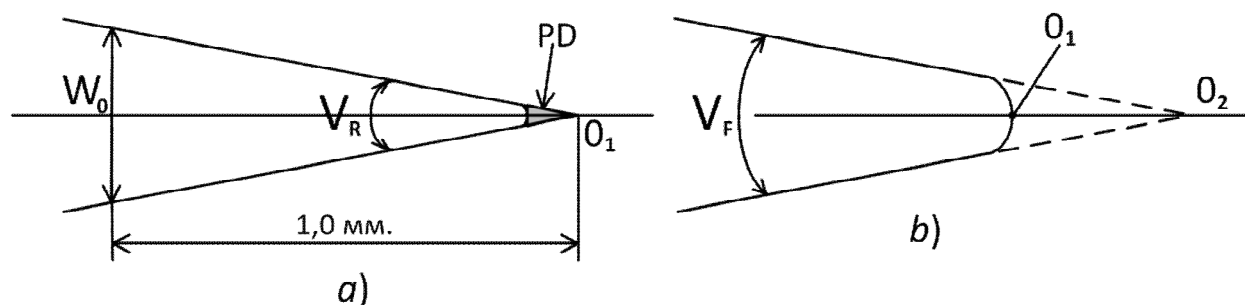


Рисунок 1 – Схема образования шарнира у ВУТ до создания разрушающего угла V_F : а) в хрупких материалах; б) в квазихрупких материалах; в) в пластичных, с образованием зоны вытяжки АВ у вершины трещины и пластически деформированной зоны $AO_2(O_3)B$. R – пластически деформированная зона. O_1 , O_2 , O_3 – точки вращения стенок трещин. 1,2,3 и градусы рядом – это линии сдвигов по краю ПД и их углы по мере нагружения образца с УТ – в)



PD – площадка контакта берегов, когда трещина закрыта; W_0 – остаточное раскрытие трещины на расстоянии 1 мм от вершины

Рисунок 2 – Схема закрытой и открытой трещин: а) шарнир трещины закрыт; б) трещина открыта, при разрушающих напряжениях трещина должна пойти по линии O_1O_2 или по краю зоны вытяжки.

По-другому выглядит случай нагружения пластичных материалов при наличии трещин. При этом еще правее и дальше от ВУТ, чем в случае 1б, находится точка вращения O_3 . Материал в микрообъеме треугольника AO_3B подвергается упруго-пластическому ротационному (есть поворот во-

круг точки O_3) сдвигу и растяжению, при этом образуется высокая ступень у ВУТ (рисунок 1 с). Изменение направления роста УТ, обходящей зону пластической деформации, и является причиной образования УБ в пластичных материалах. В пластически деформированной зоне зарождаются микротрещины, микропоры на неметаллических включениях и других дефектах. Они потом будут соединяться с магистральной трещиной. В итоге, на стенках трещины величина пластической деформации соизмерима с разрушающей.

При невысоких значениях K (коэффициента интенсивности напряжений) у ВТ, можно оценивать его величину и размах по углу V в вершине трещины. Угол удобно определять по катету на расстоянии 1 мм от ВТ (рисунок 2 а). Этот прием определения K у ВТ может быть полезен, когда УТ короткая, формулы механики разрушения для коротких трещин не работают.

В случае наличия ступеньки у ВУТ, за счет вытяжки материала, необходимо учитывать высоту ступеньки. В хрупких материалах (эпоксидная смола и т.д.) только на небольших образцах (3х6х25 мм) можно выращивать УТ (для хрупких материалов есть очень узкий и низкий диапазон размаха рабочих усталостных напряжений для стабильного роста УТ), но и здесь на зеркально-гладкой фрактограмме УТ видны следы микродеформации при росте каждой усталостной бороздки. А это – проявление влияния ОН сжатия при процессе трогания с места УТ в момент начала левой ветви нового импульса усталостного нагружения.

По экспериментальным наблюдениям более правильно считать распределение и вид зоны упруго-пластических деформаций не как зона 7 (рисунок 3), а зона 7 плюс зона 3. Таким образом, зона разрушений захватывает берега и стенки трещин шире, чем в общепринятых моделях Dugdale и Rice [9,14].

В работе [15] Jeong испытывал на четырехточечный изгиб призматический стальной образец с двумя одинаковыми острыми надрезами (рисунок 4 а,b,c). Верхний надрез был в зоне сжатия, а нижний – растяжения. Картины линий пластических сдвигов при растяжении и сжатии оказались, на первый взгляд, очень похожи, но трещины имеют много различий. Трещина со стороны сжатия зарождается очень медленно, обычно УТ быстрее зарождается в образце в зоне растяжения и быстро растет в направлении стороны сжатия.

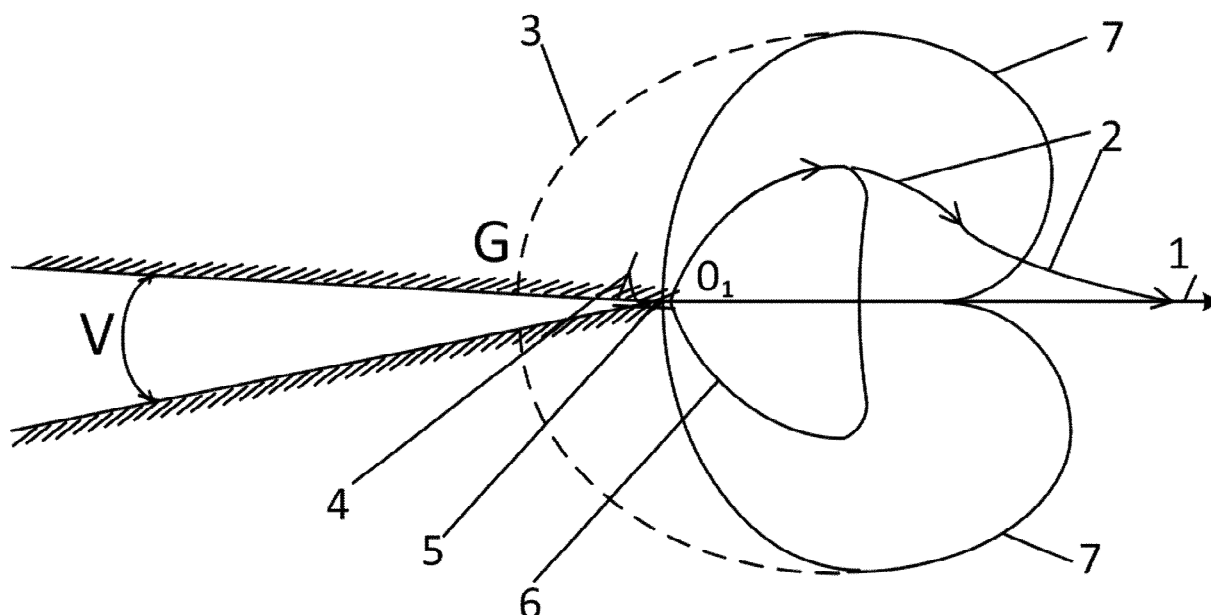


Рисунок 3 – Упругопластические зоны у вершины УТ: 1 – прямая трещина; 2 – трещина обходит пластическую зону вытяжки; 3 – расширенная зона; 4 – дочерняя трещина на стенке главной УТ; 5 – зона контакта берегов УТ; 6 – реверсивная пластическая зона; 7 – зона упруго – пластической деформации. V – угол у ВУТ, он бывает V_F и V_R – угол разрушения и угол остаточной деформации.

По нашим наблюдениям это связано с разной механикой роста УТ при растяжении и сжатии.

При каждом левом полуцикле растяжения, при раскрытии шарнира начинается рост напряжений и поворот площадок главных нормальных и касательных напряжений у ВУТ. Угол ветвей изохром начинает расти от вертикальной оси Y (рисунок 4 г), поворачивается от положения 1 до 3, примерно на 40 градусов. На перевале нагрузки цикла все разрушения у ВУТ прекращаются, трещина закрывается, угол разрушения V_F уменьшается до угла остаточных деформаций – V_R и розетки изохром вернулись до положения 1 и исчезли (рисунок 4 ф). Трещина не закроется полностью по трем причинам: - оксиды на стенках трещины, обломки, микрорельеф разрушений на стенках УТ и главное – деформации (рисунок 4 е, ф) – при закрытии ВУТ начинается небольшое расплющивание растянутой при росте УТ зоны 5. Эта зона при уменьшении напряжения цикла до нуля не дает полного закрытия ВУТ и остается воздушная полость 3 и зона 2 (смыкание стенок УТ), рисунок 4 ф.

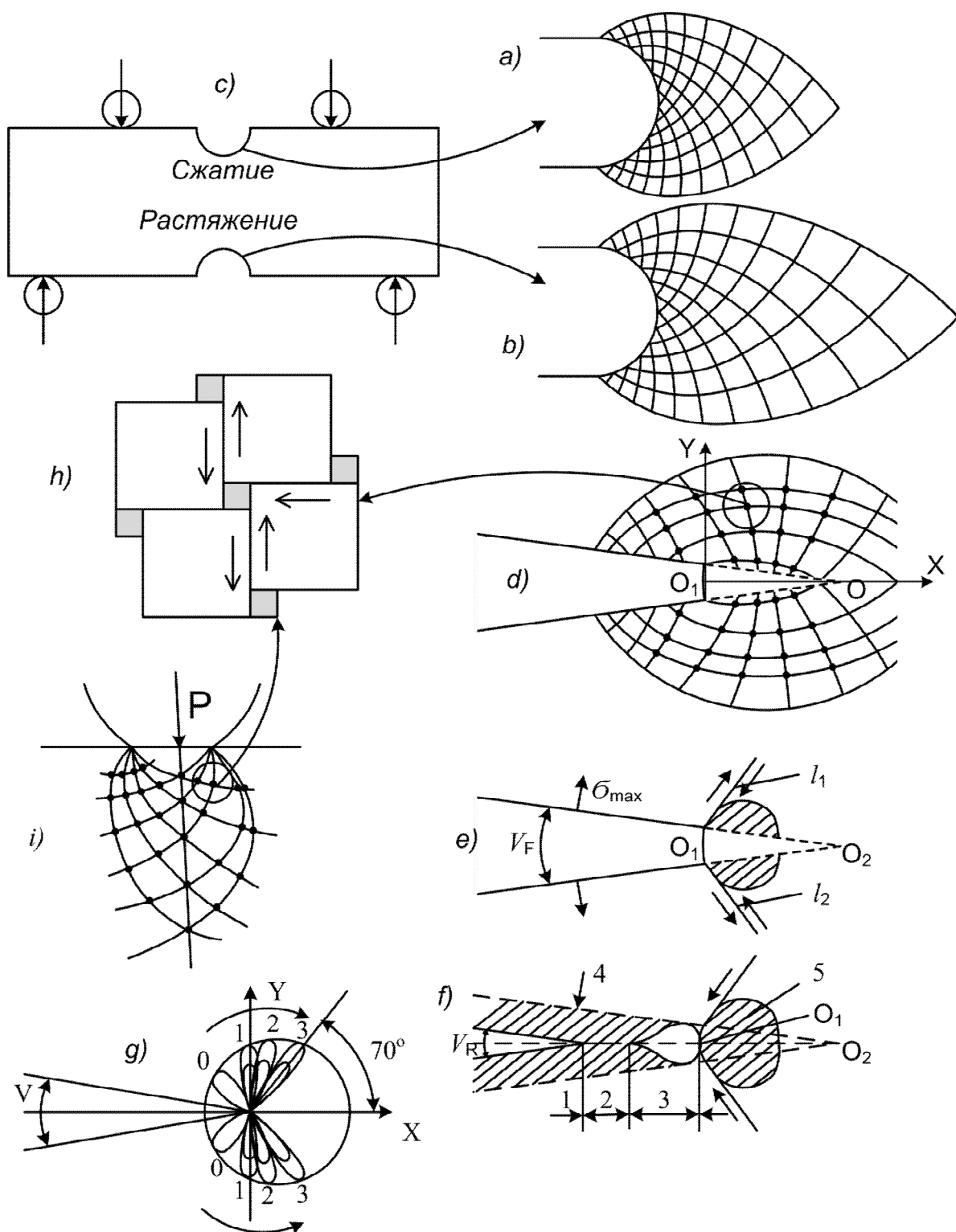


Рисунок 4 – (а) схема линий скольжения у надреза в зоне сжатия и (б) растяжения; (h) схема образования универсальных трехмерных пор-дефектов Цвигуна на пересечениях плоскостей сдвига у ВТ (d); образование ступеньки и зоны вытяжки у ВТ (е) и образование полости (зона 3) и контакта стенок (зона 2) при закрытии ВТ (f); схема ротации двух изохром напряжений у ВУТ при усталостном цикле нагружении (положения 0-ВУТ закрыта, до положения 3-ВУТ открыта (g).

Если есть контакт берегов у ВУТ (при нулевом усилии усталостного цикла), то картина изохром (распределение максимальных касательных напряжений) выглядит немного по-другому (рисунок 4 g) – добавляется при закрытии ВУТ еще одна пара изохром, под номером 0. И получается, при каждом цикле усталостного нагружения изохромы совершают колебательное движение вперед-назад (как крылья бабочки) не (1-3), а как (0-3). Чем больше прочность и вязкость материала, тем больше колец изохром в петле и больше угол поворота изохром. Так, хрупкие материалы начинают разрушаться при угле поворота изохром до номера 2, а при изохроме 3 угол ее наклона вблизи ВУТ около 60 градусов, наблюдается большая степень пластической деформации у поверхности излома и более высокая вязкость разрушения материала. Розетка изохром это компаратор для поиска конкурентного пути роста трещины, т.к. в этом процессе участвуют (алгебраически) рабочие, термические и остаточные напряжения.

Рост УТ содержит минимум 3 стадии: зарождение коротких трещин, их сепарация, выделение и рост магистральной УТ и разрушение от нее. Чем выше уровень напряжений на стадии зарождения УТ, тем большее их число появляется. Они ориентированы вдоль местных максимальных касательных напряжений. Достаточно быстро остается одна УТ - лидер и ее рост будет происходить уже не под острым углом к направлению растяжения, а почти под 90 градусов к этому направлению. Рост УТ это непрерывное рыскание ВУТ при каждом усталостном цикле нагружения, реакция на концентратор напряжений или дефекты. Например, царапина, глубиной 3 мкм, нанесенная алмазной иглой профилографа на поверхность трехмиллиметрового образца способна отклонить рост УТ на 0,5 мм в сторону с одной стороны образца.

Определенное экспериментально на прозрачных образцах 25×6×3 мм из ПММА явление образования микрополости (рисунок 4 f), у вершины УТ (при ее неполном закрытии) и зона вытяжки, ступенька мешает закрытию, нам помогло точное изучение ротации розеток изохром при росте УТ.

УТ в хрупких материалах растут практически без пластической ступени у ВУТ, Такая трещина скола образуется при очень низких напряжениях, когда нет еще значительных касательных напряжений, а усилия нормального отрыва, судя по изохромам, направлены не вперед, а нормально к плоскости трещины.

Но есть уникальные полимеры (ПММА), в которых УТ растет с образованием классических усталостных бороздок. При определенном угле наклона изохром в материале проходят определенные последовательности микродеформаций и разрушений, когда за один усталостный цикл образуется одна усталостная бороздка, что хорошо видно на частоте 1 Гц с помощью стереомикроскопа. В поляризованном свете, в момент начала усталостного полуцикла нагружения, возле ВУТ становится видна идеальная розетка изохром, рисунок 5 b. В зоне начала оси Y начинается одновре-

менный рост их количества (обычно до двух изохром) и ротация изохром вперед, рисунок 5 с – это на 50% нагрузки цикла. А при 100% нагрузки цикла, рисунок 5 d, изохромы изогнуты вперед, совпадая с полями линий скольжения, рисунок 4 d.

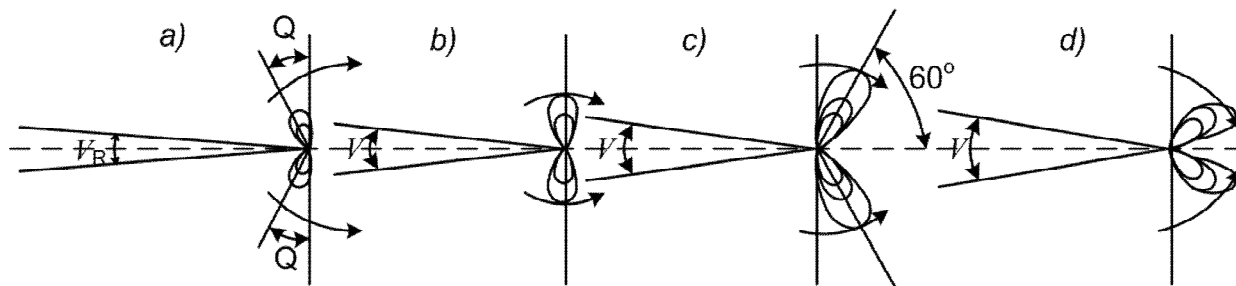


Рисунок 5 – Схема ротации, изменения изохром у ВУТ при разном уровне напряжений: а) – ВУТ закрыта, напряжения ноль; но есть напряжения от контакта стенок трещины; б) – напряжения 30% от максимальной нагрузки цикла; с) – напряжения 60%; d) – напряжения 100% и края розеток направлены как линии скольжения вперед, сдвиги идут вдоль трещины, наклеп материала – тонкие слои на стенках, вдоль УТ

В случае, когда испытания проходят при размахе усилия ноль – максимум, трещина имеет контакт стенок (берегов) и это является причиной появления изохром 0 (рисунки 4 г, 5 а) – петли изохром отклоняются назад. Когда идет процесс роста УТ, то колебания (поворот) изохром составляет около 40 градусов, от схемы (рисунок 5 а) до схемы (рисунок 5 d). На образцах с надрезом нулевой изохромы нет.

При однократном доломе образца с УТ сначала образуются два уса деформаций, изогнутых вперед. При детальном рассмотрении эти полосы сдвигов состоят из сотен игольчатых трещин, составленных цепочками. Далее по ним проходит магистральная трещина долома, она обходит зону вытяжки, ее зону с остаточными напряжениями сжатия и следует выход на прямой путь продолжения магистральной трещины (см. рис. 3). Размер этой петли менее 1 мм на поверхности образца, а внутри образца эта петля в 10 раз меньше из-за плоско-деформированного состояния. На прозрачных полимерах это хорошо видно, поскольку меняется цвет материала у ВУТ (большое количество пор и микротрещин окрашивает микрообъемы, где превышены упругие напряжения).

При стабильном росте УТ в ее вершине редко бывают симметричные условия деформации, поскольку на пути роста УТ встречаются микротрещины, поры, включения, другие факторы, наличие которых приводит к угловому сдвигу, сколу у ВУТ. Если деформация мала, то стенки трещины – хрупкие ступени, а при процессах пластической деформации у ВУТ образуются несимметричные усталостные бороздки, на стенках трещины остаются боковые трещины, которые будут длиннее в одну сторону. Эти боко-

вые трещины обычно наклонены под углом около 45° (иногда до 90°) к плоскости трещины (рисунок 6 с).

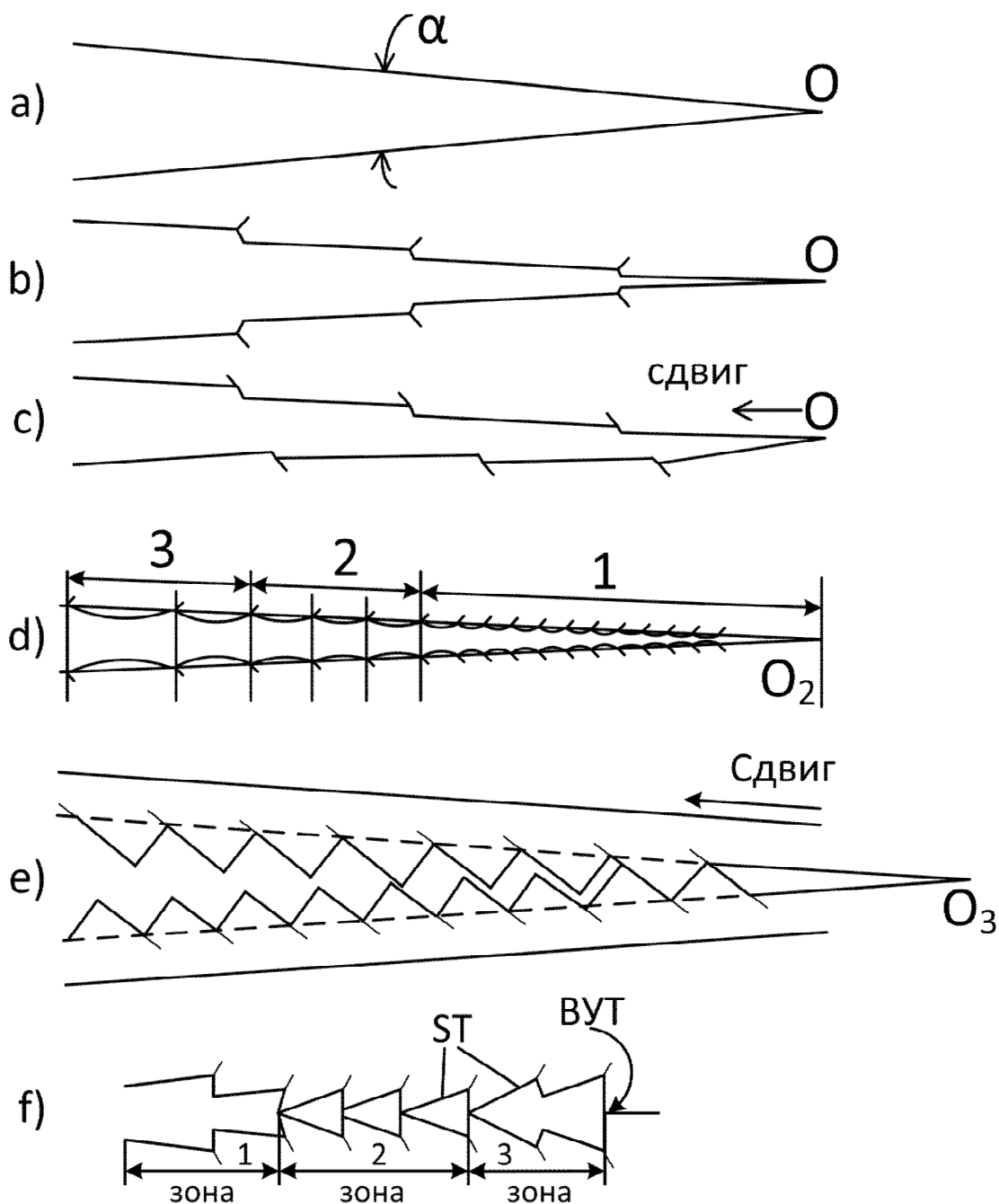


Рисунок 6 – Типы усталостных бороздок (УБ), сдвиги и микротрещины у их основания: а) хрупкие УБ; б) квазихрупкие УБ, длина шага УБ – функция длины левой части импульса растяжения; асимметричный сдвиг у ВУТ – несовпадение вершин УБ – с) при сколе – е); длина шага вязких УБ контролируется размахом напряжений цикла – высокий уровень напряжений слева – d); контакт стенок УТ по выступам УБ в зоне 2 – f) и воздушная полость у ВУТ в зоне 3 – f).

В очень хрупких материалах (стекла, эпоксиды) только в отраженных лучах видны остановки УТ при одном цикле роста, в каждой плоской усталостной ступеньке – бороздке (рисунок 6 а). В менее хрупких материалах усталостные бороздки растут в виде ступенек (рисунок 6 б), длина ступени – бороздки по нашим прямым экспериментам зависит от длины левого (а не правого) ската импульса растяжения, т.к. после начала снижения уровня растягивающих напряжений шарнир трещины начинает закрываться.

2. Траковые следы

Впервые траковые следы на поверхности усталостной трещины обнаружили более 80 лет назад, но до сих пор их загадочный переменный шаг, по мере удаления ВУТ от тракового следа и сам механизм остается неясен [21-23]. При прямом наблюдении с помощью оптического микроскопа за ростом УТ в органическом стекле (ПММА) на стадии роста напряжения в отнулевом цикле ($R=0$) видно, что наряду с образованием за один цикл при малоцикловой усталости одной УБ у ее основания возникают две микротрещины и две полосы сдвига. Бороздка в вязком материале или трещина в хрупком образуются в момент роста напряжения. Когда напряжения в каждом цикле нагружения достигают максимального значения и начинается их снижение, процесс разрушения (деформации) заканчивается. Трещина закрывается как шарнир и берега УТ недалеко от вершины упираются друг в друга так, что иногда остаются на них вмятины (материал у острия трещины был вытянут и занимает большую высоту), отсюда трещина вдали от ВУТ открыта, а вблизи – закрыта. Это упругопластическое растяжение – причина появления остаточных сжимающих напряжений. При новом цикле нагружения эти напряжения алгебраически вычитаются из растягивающих напряжений цикла и трещина теперь раскрывается при более высоких нагружениях цикла. Усталостная трещина при каждом цикле усталостного нагружения формирует два уса упруго-пластических деформаций сдвига из вершины УТ под углом от 45° до 60° к линии роста УТ. Угол связан с пластичностью и хрупкостью материала у ВУТ. На этом факте основан принцип торможения роста УТ одним циклом перегрузки (рис. 7а).

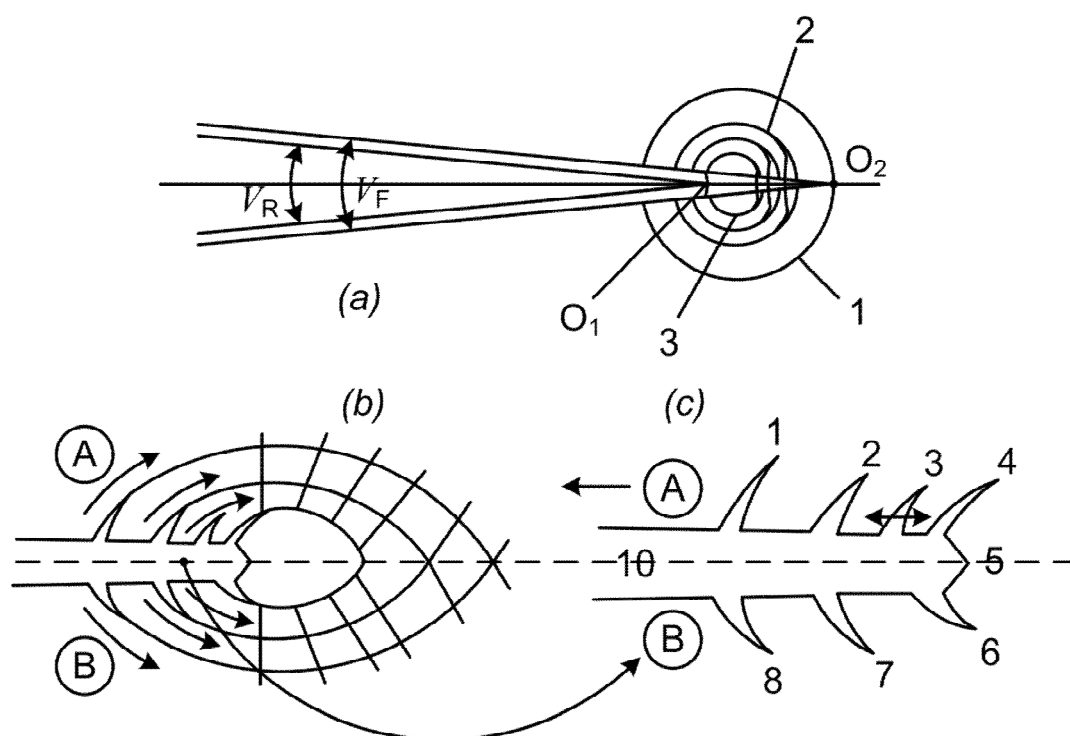


Рисунок 7 – Схема упругой зоны вокруг ВУТ(1), упруго – пластической зоны (2,3) – (а); микросдвиги и микротрещины у ВУТ (b); образование случайного дефекта (трещины) – 3 (с) на стенке УТ и его открытие – закрытие и перемещения при каждом усталостном цикле и создание отпечатков этой трещины при контакте стенок А и В трещины (с).

Поскольку деформации и разрушения охватывают почти 360° вокруг ВУТ, с преимущественным направлением роста УТ вперед в секторе $\pm 60^\circ$ к плоскости трещины (что связано с тем что два уса упругих деформаций сдвига, исходят из ВУТ) под углом от 45° до 60° постоянно за цикл совершают вперед колебательное движение (поворот на угол около 50° каждый) за каждый цикл пульсирующей нагрузки (от 0 до максимума). Как только появляются условия для растрескивания (дефекты, сдвиги в полосах, охрупчивание материала), образуется микротрещина, которая может образоваться: а) в полосах сдвига, исходящих из ВУТ, от включений впереди ВУТ (образуется перпендикулярная первичной плоскости УТ, подобная крыльям бабочки), а также, стенки УТ под большим углом (почти под 90°). В этом случае устойчиво растут одновременно две УТ: первая, обычная, продолжает свой рост вперед, с образованием чуть искаженных усталостных бороздок, и перпендикулярная растет всего несколько циклов, около двадцати, а далее – вершина главной УТ уходит дальше от этой поперечной трещины, уровень напряжения оказывается недостаточным для роста этой дочерней трещины, рисунок 5. Почему меняется ширина и расстояние между трабовыми отпечатками? Сначала, когда напряжения у ВУТ большие, 90° -ая трещина как клише в типографии печатает свой след на другой

стенке УТ как растянутый у ВУТ материал, а когда магистральная УТ удаляется, уровень упругопластических деформаций падает, материал уже меньше смещается и растягивается по горизонтали (рис. 8) и расстояние между траковыми следами уменьшается, а потом и они (берега трещины выходят из зацепления) еле видны, потом исчезают. Так, смятие, схватывание берегов при испытаниях в вакууме; берега УТ полностью лишены оксидных пленок, и рост УТ в вакууме при нулевых циклах ($R=0$) не сопровождается образованием усталостных бороздок.

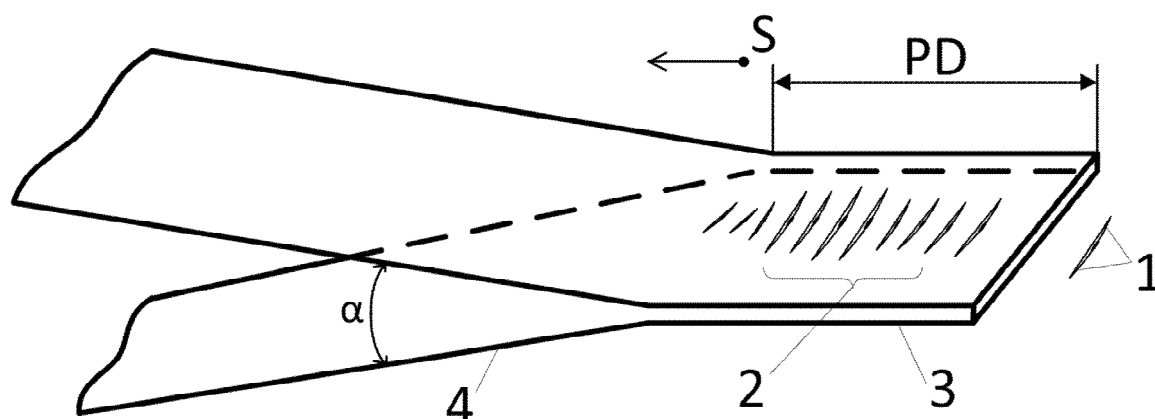


Рисунок 8 – Траковые следы на поверхности усталостной трещины. Процесс начинается с образования трещины 1 на включении, впереди УТ или на ее фронте. 2 – траковые следы с переменным шагом, далее они пропадают, т.к. контактная зона берегов УТ уходит вперед от трещины – пуансона. Процесс возможен благодаря сдвигу S вдоль поверхности УТ. Сдвиги S имеют величину всего несколько микрон за цикл и из-за неравных условий пластической деформации выше и ниже вершины УТ.

3. Влияние формы и асимметрии цикла нагружения

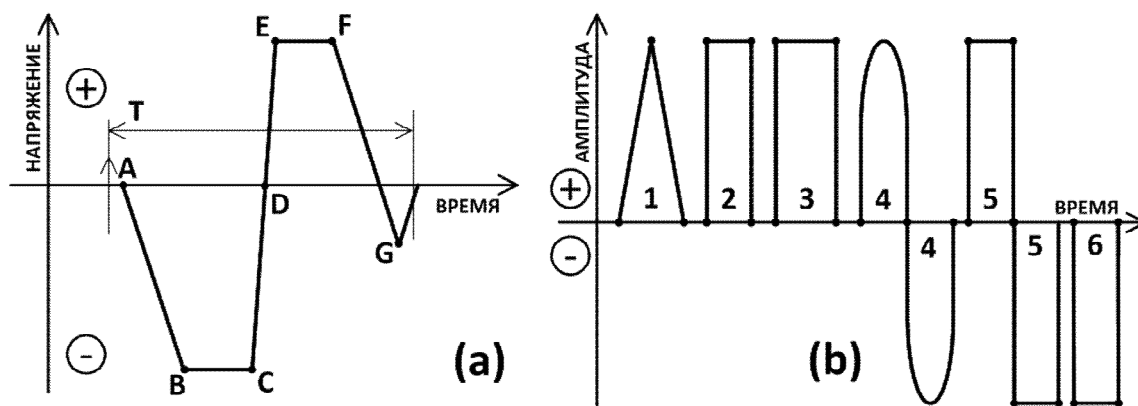


Рисунок 9 – Влияние формы цикла нагружения на разрушение (a); влияние формы цикла и асимметрии цикла (b).

Рассмотрим симметричный цикл нагружения с низкой частотой и отсутствием ударов прозрачного образца с УТ на трехточечный изгиб. При сжатии ABCD (рис. 9а) закрывается трещина и плющится материал перед ВУТ. При этом снижаются почти все существовавшие остаточные напряжения и наводятся новые. При начинающемся растяжении на участке DE в стереомикроскопе видно, что трещина чуть позже точки D или одновременно начинает удлиняться. Процесс идет до точки E. Если есть площадка EF, то трещина удлиняется, но медленно. Если площадка EF отсутствует, трещина сразу после точки F начинает закрываться и вскоре она полностью закрыта (ее берега упираются вблизи вершины за счет пластической вытяжки материала).

Теперь рассмотрим влияние формы и асимметрии цикла нагружения (рис.9 б). Быстрее всего УТ будет расти при схеме 5. Вертикальный фронт нарастания импульса растяжения очень опасен, т.к. охрупчивает материал перед трещиной. Площадка на вершине импульса 3 или 5 также увеличивает длину трещины (расстояние между бороздками). У импульса 1 работает только левая сторона «пилы», правая – спад не влияет на разрушение.

Чем длиннее импульс нагружения, чем круче его передний фронт и чем больше амплитуда, тем длиннее шаг трещины за цикл (расстояние между бороздками). Зона пластической деформации мала по сравнению с длиной трещины (даже для коротких усталостных трещин). Вытягивание материала в виде зоны вытяжки создает зону остаточных сжимающих напряжений, на чем основано торможение УТ однократной перегрузкой. С другой стороны, плющение материала при изгибе приводит к тому, что при $R=+1 \div 3$ трещина не образуется из надреза, а образуется на другой стороне образца, там, где нет надреза, но есть небольшие растягивающие напряжения.

4. Влияние программируемого нагружения и перегрузки

При программируемом нагружении получаем фрактограмму с усталостными бороздками с различным шагом (рис. 10 а). На прозрачном образе усталостные бороздки хорошо видны в момент образования в обычный световой микроскоп. Видно, что трещина идет вперед только тогда, когда она еще раскрывается (нарастает угол раскрытия). Если в точке 20, 21 или 22 начинается снижение усилия цикла, трещина начинает закрываться. Когда усилие цикла еще не минимальное, она уже закрыта и верхние углы бороздок могут упираться друг в друга (возле вершины трещины, только для $R=0$ (цикл 28 и 29)). Таким образом, если нагружающий цикл (а) имеет длинный отрезок (с $\div 22$ на рис. 10), растяжения, то и усталостная бороздка будет длинная (t).

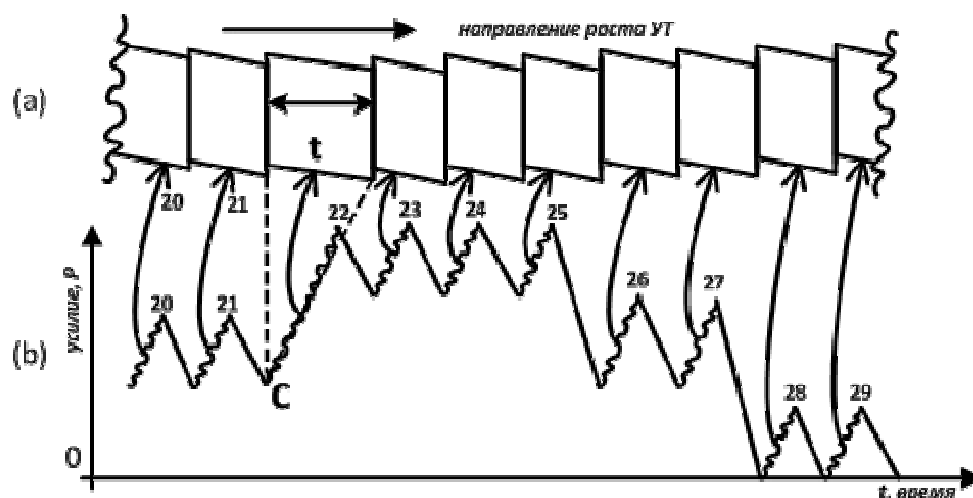


Рисунок 10 – Вид усталостных бороздок (а) и соответствующие ей циклы нагружения (б). Длина усталостной бороздки (ее шаг) строго пропорционален длине левого ската импульса растяжения (длина правого ската не влияет на шаг). При импульсах 28 и 29 длина шага чуть меньше, т.к. трещина закрыта уже чуть выше точки О из-за вытяжки и остаточных напряжений

При однократной перегрузке вокруг ВУТ формируется зона пластической деформации около 0,3 мм. Это область остаточных напряжений сжатия, они вычитаются из рабочих растягивающих напряжений цикла, тем самым более чем на 15 % возрастает усталостная долговечность.

На прозрачных образцах из ПММА наблюдали механизм усталостного растрескивания вблизи вершины усталостной трещины. Найдено, что цикл растяжения (рис.11) начинается с точки (а) и сразу трещина начинает удлиняться до точки (б). Если в точке (б) начнем разгрузку (не будет участка bc), то на участке (cd) трещина закроется, как шарнир и новый цикл растяжения вновь (ab) -трещина раскроется с фиксированным углом разрушения при вершине. Чем круче участок (ab), тем сильнее подавляется пластическая деформация и хрупче характер разрушения. Когда есть площадка растяжения на цикле – (bc), то трещина здесь также продолжает удлиняться.

Из вершин надрезов (см. рис. 4) начинаются линии сдвигов, с образованием блоков. При этом клинообразные полосы сдвигов создают искривленные блоки. Растяжение и сжатие у вершины трещины разделяет материал на блоки, которые снижают общую прочность металлической матрицы. При дальнейшем увеличении нагружающего усилия начнется образование на продолжении старых полос новых полос сдвига и новых микротрещин. Такое агрегатное состояние материала с трехмерными мозаичными трещинами не способно оказывать сопротивление растяжению, но достаточно хорошо сопротивляется сжатию.

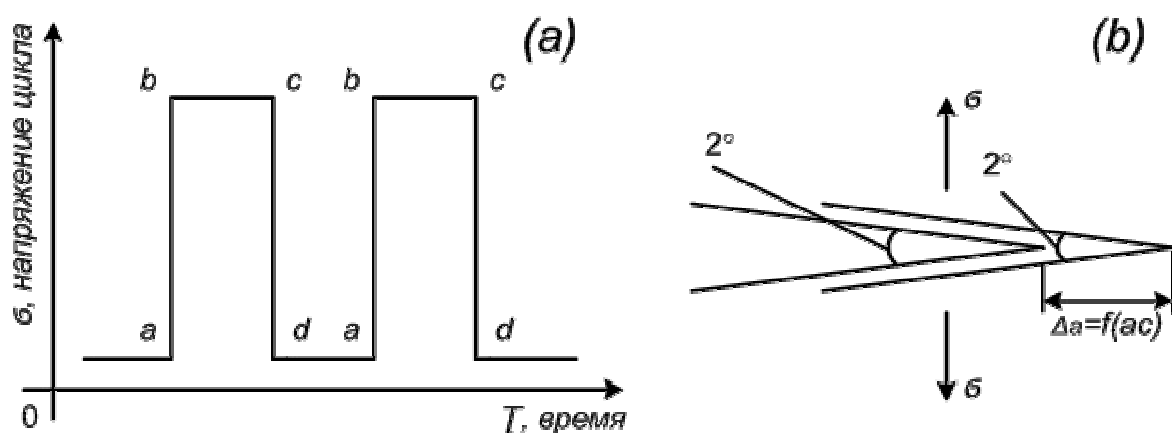


Рисунок 11 – Циклическое растяжение (прямоугольные импульсы) образца с трещиной (а); удлинение трещины на шаг (ас) за каждый импульс нагружения; (b) – приращение длины трещины за один цикл.

5. Зарождение краевых усталостных трещин.

Из исследований, проведенных ранее [22], известно, что на поверхности образца краевая УТ зарождается и вначале растет не нормально к поверхности, а под углом к боковой грани образца. Обычно это угол, равный $45 - 60^\circ$. Достигнув некоторой длины УТ, продолжает свой рост почти перпендикулярно максимальным растягивающим напряжениям. Схематическое изображение этого процесса роста УТ на трех стадиях ее роста в плоском образце представлено на рис. 12.

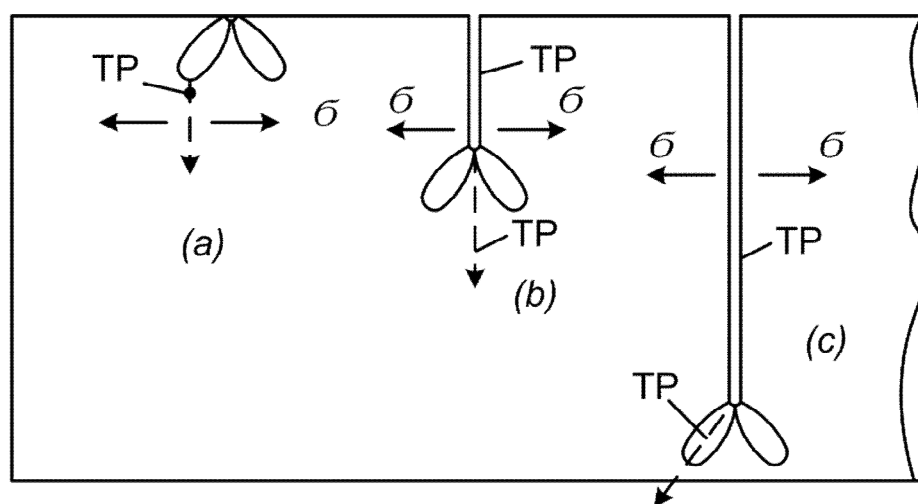


Рисунок 12 – Сдвиговые трещины растут вблизи поверхности образца (а) и у длинной трещины (с) по направлению максимальных касательных напряжений (изохромам), а длинные трещины растут по биссектрисе угла между двумя изохромами у ВУТ (b). Это связано с тем, что многие материалы легче деформируются на сдвиг, чем на растяжение.

На первой стадии – зарождения УТ [18], возникают всего две изохромы у вершины короткого острого надреза (длиной 0,6 мм, радиус 0,05

мм), за время цикла нагружения эти изохромы поворачиваются всего на угол около 30° от направления их стартового появления до максимальных значений цикла усталостного нагружения. Главная причина роста УТ вдоль петли изохромы с максимальными касательными напряжениями в том, что уровень прочности матрицы на растяжение еще высокий (это потому, через тысячи усталостных циклов материал разупрочнится), и даже концентратор напряжений – надрез или включение не приводит к нормальному разрыву по типу K_1 . А поскольку перед нормальным разрывом всегда проходит затупление ВУТ, с микросдвигами у ее вершины, по одному из микросдвигов у вершины надреза, плоскость сдвига вскрывается как цепочка первых пунктирных микротрещин и стартует уже УТ, длиной десятки микрон. Она очень острая и на ее рост надо в 2-5 раз меньше подвода энергии. Остальные десятки усталостных трещин, (которые все вместе составлены, как звенья, в одну цепь, которая нагружается на растяжение с постоянной величиной деформации цикла, например), вдруг оказывается, что, на них почти не падает деформация цикла. Продолжается только рост лидирующей трещины, остальные не открываются, но залечиваться не смогут, т.к. их стенки уже за миллисекунды покрываются окисными пленками, которые не дают трещине закрыться полностью. Дальше эти капиллярные трещины наполняются влагой из воздуха – на это уходит порядка 60 минут.

При росте УТ вдали от краев образца, УТ растет по типу K_1 нормально растяжению, но при подходе УТ к краю образца опять начинает меняться механизм роста, рис.12(с). Это связано, возможно с тем, что первые изохромы выходят на свободную поверхность, шарнир трещины начинает вращение, а опоры шарниру впереди точки вращения (О) уже нет, там просто нет материальной опоры и идет срез по линии изохромы.

Выводы.

1. Образование усталостных бороздок связано с протеканием процессов пластической деформации при раскрытии трещины по типу шарнира. При этом в хрупких материалах вершина шарнира совпадает с вершиной усталостной трещины, а в пластичных – находится в глубине материала на некотором расстоянии от вершины трещины. Образование перед вершиной трещины зоны вытяжки за счет остаточных напряжений сжатия является препятствием прямого роста усталостных трещин, которые, продолжая свой рост, обходят её. Усталостная трещина временно отклоняется от своей плоскости роста с образованием микровалика на плоской поверхности, который и наблюдается нами как усталостная бороздка.

2. Длина шага продвижения хрупких усталостных трещин за цикл пропорционален длине левой нарастающей части цикла растяжения.

3. При росте усталостных трещин скорость нарастания импульса растяжения играет важную роль. Увеличение скорости нарастания им-

пульса растяжения максимально охрупчивает материал, ускоряя рост усталостных трещин.

4. Удлинение верхней части импульса растяжения приводит к ускорению роста усталостных трещин, т.к. при коротком импульсе вершина усталостной трещины сразу начинает закрываться после начала снижения напряжений цикла, а при длинном продолжает удлиняться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suresh S. - Fatigue of materials. – Cambridge, 1991, 683 С.
2. Ritchie R., Knott J., Rice J. – On relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel – IMPS, 1973, v.21, 395-410.
3. Ritchie R. –Mechanisms of fatigue cracks propagations in ductile and brittle solids – Int. J. of Fracture – 1999, 100, 55-83.
4. Pippan R., Stuwe H., - Fatigue growth behaviour in constant load amplitude and constant K tests – ECFG Proceeding, Warley, UK, 1986, p.1269-1277.
5. Pippan R., Berger M., Stuwe H.- Metallurgical Transactions,1987, p.429-435.
6. Pippan R.- Modelling of fatigue cracks growth – dislocation models=book – Comprehensive structural Integrity in cyclic loading and fatigue-2003,p.191-206.
7. Pippan R., Grosinger W. – Fatigue crack closure – from LCF to small scale yielding – Forni di Sopra, Italy, 2011, p. 208-215.
8. Barenblatt G.- The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fractures – Advances in applied mechanics-1962, 7,p. 55-129.
9. Dugdale D. – Yielding steel sheets containing slits –JMPS-1960,p.100-108.
10. Hillerborg A., Modeer M., Petersson P. – Analysis of crack formation and crack growth in concrete= Cement and Concrete Research- 1976,6,p.773-782.
11. Shet C.,Chandra N. – Analysis of energy balance when cohesive zone models simulate fracture processes –J of Eng. Mater. Technology, 2002,124,440-450.
12. Pacey M. –On the use of photoelasticity to study crack growth .- Congress on Exper. Mech., Orlando, 2000, 375-378.
13. Pacey M., Janos M.- A new photoetlastic model studying Fatigue cracks closure – Exp. Mech., 2005, v.45, 1, 42 -45.
14. Rice J., Johnson M. – The role of large crack tip Geometry changes in plane strain fracture. – J. Appl. Mech., 35, 379-400.
15. Jeong H.- Slip lines in front of a round notch tip in a pressure – sensitive materials. – Mech. of Materials, 1994, 19, 29-38.
16. Alfredsson B. - Rolling Contact Fatigue-2012, 11, 15-30.

17. Цвигун В.Н., Шур Е.А., др. - Изучение механизмов питтинга, споллинга и других контактно – усталостных дефектов в рельсах. Часть 4. Деформация и напряжения в головке рельса при контакте качения. - Вестник горно-металлургической секции РАЕН., 2016, В. 35., с.126-146.
18. [www. Doitpoms. Ac. Uk / TLP library brittle fracture](http://www.doitpoms.ac.uk/TLP_library_brittle_fracture).
19. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.А. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. М., Московский горный университет, 2004, 450 с.
20. Kaiser J. – 1953, BD24, N1/2, S 43-45.
21. Schijve J. - Fatigue of structures and materials in 20 Century –Int. J. of Fract., 2003,25,679-702.
22. Коцаньда С. – Усталостное растрескивание металлов – М, 1990, С. 623.
23. Лабур Т. Морфология поверхности разрушения в условиях усталости / Автоматическая сварка - 2011, №3, 12-18.
24. Цвигун В.Н.- Изучение осевых дислокаций роста в монокристаллических усах NACL методами микропучковой рентгенографии методом Ланга. Новокузнецк, СМИ. Отчет ПНИЛ. 1970, С. 67.
25. Dahlberg M., Alfredsson B. –Standing contact fatigue with line contact loading-2010, №11, p.18.[www.structural – integrity.eu / pdf](http://www.structural-integrity.eu/pdf).
26. Tsay Y., Kolsky H. – Surface wave propagations. JMPS, 1968, v.16, 2, P.99-110.
27. Anderson P., Rice J., - Continuing cracks tip deformation and fracture –JMPS,1978, 26, P.163-186.
28. Anderson P., Rice J.,-The stress field and energy of a three – dimensional dislocation loop at a crack tip- JMPS, 1987,6, 743-769.

**Вестник горно-металлургической секции РАЕН.
Отделение металлургии**

Сборник научных трудов

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 01.10.2018 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 10,5 Уч.-изд.л. 11,3 Тираж 300 экз. Заказ № 275

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.
Издательский центр СибГИУ