

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

*90-летию Сибирского государственного
индустриального университета посвящается*

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

Отделение металлургии

Сборник научных трудов

Издается с 1994 г. ежегодно

Выпуск 42

Москва
Новокузнецк
2019

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. 42 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянцев (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2019 – 191 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. 66, табл. 22, библиогр. назв. 170.

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, АО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянцев 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; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, 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., СибГИУ, г. Новокузнецк.

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

ББК 34.3я4

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ И РУКОВОДИТЕЛЯХ АВТОРСКИХ КОЛЛЕКТИВОВ

Белов Н.А.	д-р техн. наук, проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Волокитин Г.Г.	д-р техн. наук, проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск
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
Никитин А.Г.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Ноздрин И.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Оршанская Е.Г.	д-р пед. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Перетяцько В.Н.	д-р техн. наук, проф., д.ч. АИН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Руднева В.В.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Темлянцев М.В.	д-р техн. наук, проф., д.ч. РАЕН, СибГИУ, г. Новокузнецк
Фастыковский А.Р.	д-р техн. наук, проф., СибГИУ, г. Новокузнецк
Шур Е.А.	д-р техн. наук, проф., ВНИИЖТ, Москва

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	7
<i>А.А. Уманский, Я.В. Денисов</i>	
Исследование влияния параметров производства слитков конвертерной стали на качество их внутренней структуры.....	8
<i>А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.С. Симачев, О.А. Решетнев</i>	
Анализ влияния параметров производства электростали на качественные показатели рельсов.....	16
<i>А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.С. Симачев</i>	
Исследования состава и распределения неметаллических включений по сечению рельсовых профилей	22
<i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, А.А. Соколов</i>	
Влияние внешних воздействий на процессы кристаллизации сплавов и затвердевания отливок.....	28
<i>А.Г. Никитин, К.С. Медведева, П.Б. Герике</i>	
Экспериментальное исследование процесса разрушения кусков ферросплава в одновалковой дробилке с упором на валке	37
<i>А.Г. Никитин, А.В. Абрамов, В.В. Горяшин</i>	
Исследования работы щековой дробилки с устройствами выборки зазоров в шарнирах	40
ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	43
<i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, С.Г. Галевский</i>	
Освоение технологии производства нанокристаллического карбида циркония.....	44
ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ.....	49
<i>С.С. Мишуков, В.Б. Деев, Н.А. Белов, А.А. Соколов</i>	
Разработка высокопрочного литейного сплава на основе системы легирования Al-Zn-Mg-Fe-Ni	50
<i>С.С. Мишуков, В.Б. Деев, С.М. Дубинский, А.А. Соколов</i>	
Исследование литейных свойств, структуры и свойств высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Ni-Fe	54
<i>В.В. Дорошенко, В.Б. Деев, Н.А. Белов</i>	
Исследование жидкотекучести сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики	63
<i>В.В. Дорошенко, В.Б. Деев, Н.А. Белов</i>	
Исследование возможности использования шихты с повышенным содержанием железа при получении сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики	66

<i>С.С. Мишуров, В.Б. Деев, С.М. Дубинский, А.А. Соколов</i>	
Разработка методов удаления деформированного слоя с поверхности пористых изделий из безникелевого титанового сплава биомедицинского назначения	69
<i>В.Н. Цвигун, Е.А. Шур, Р.С. Койнов</i>	
Микродеформации и разрушения вблизи вершины трещины при монотонном нагружении.....	76
ЭКОНОМИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	86
<i>О. Шлик, А. Шлик, А. Шлик</i>	
Акустическая компьютерная система Accusteel контроля и управления технологическим процессом электродугового и конвертерного переделов стали - технология XXI века	87
<i>А.М. Анасов</i>	
Техногенные катастрофы и их предупреждение	107
<i>С.В. Кривошеев, О.И. Гордиевский, И.В. Ноздрин</i>	
Использование отвальных шламов химических предприятий в качестве вторичного металлургического сырья.....	119
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	126
<i>С.Г. Коротков, М.В. Темлянец, В.В. Стерлигов</i>	
Кафедре теплоэнергетики и экологии Сибирского государственного индустриального университета 85 лет. Дела. События. Люди	127
<i>Г.В. Галевский, В.В. Руднева</i>	
Кафедра металлургии цветных металлов и химической технологии СибГИУ - 50 лет в образовании и науке	142
<i>А.Р. Фастыковский, В.Н. Перетяцько</i>	
Этапы становления кафедры «Обработка металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК».....	159
ПРОБЛЕМЫ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ.....	171
<i>Е.Г. Оршанская</i>	
Особенности академического билингвизма в условиях обучения в вузе	172
<i>С.В. Шемберг</i>	
Обучение техническому переводу: сложности перевода антропонимов.....	178
ОТКЛИКИ, РЕЦЕНЗИИ И БИОГРАФИИ.....	182
<i>Г.Г. Волокитин</i>	
Рецензия на монографию «Диборид титана. Нанотехнология, свойства, применение» (Авторы Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – 209 с.).....	183
<i>Г.Г. Волокитин</i>	
Рецензия на учебное пособие «Оборудование и технология производства сверхтвердых материалов» (Авторы Г.В. Галевский, В.В. Руднева. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2019. – 211 с.).....	186
К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ	189

В.Н. Цвигун, Е.А. Шур², Р.С. Койнов¹

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк, Россия

² ВНИИЖТ, Москва, Россия

МИКРОДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ВБЛИЗИ ВЕРШИНЫ ТРЕЩИНЫ ПРИ МОНОТОННОМ НАГРУЖЕНИИ

Описаны результаты прямых наблюдений микродеформаций у вершины усталостной трещины при монотонном нагружении. Показано, что максимальный угол у вершины долома равен 13° в пластичном материале, есть микросдвиги вдоль вершины трещины более 20 мкм. Сформулирован механизм однократного долома для большинства материалов.

The results of direct observations of microdeformations at the tip of a fatigue crack under monotonic loading are described. It is shown that the maximum angle at the top of a breaking is equal to 13° in a plastic material, there are microshears along the tip of a crack more than 20 μm . The mechanism of one-time breakage is formulated for most materials.

Сокращения: УТ – усталостная трещина; ВУТ – вершина УТ

Ранее [1-4] была описана модель роста усталостной трещины как шарнира с механической точкой вращения берегов трещины. Эта точка вращения в хрупких материалах совпадает с вершиной усталостной трещины (ВУТ). В пластичных материалах она находится на некотором расстоянии от ВУТ в глубине образца и определяется пересечением двух прямых линий, проведенных по берегам трещины.

Методы прямого наблюдения за ростом УТ в прозрачном образце позволили ранее подробно описать [1] механизмы разрушений, приводящих к образованию основных видов фрактографических рельефов при циклическом нагружении. К ним относятся: образование усталостных хрупких и вязких бороздок; траковых следов; макролиний усталости от перегрузок и всплеск температуры; зависимость шага усталостной бороздки при росте УТ от длины левого ската нагружающего цикла напряжений.

Настоящая статья посвящена изучению процессов разрушения (микродеформации у ВУТ, страгиванию трещины, ветвлению трещины, образованию такого фрактографического рельефа как речной узор) при монотонном нагружении. Явления роста УТ изучали методами световой стереомикроскопии на прозрачных хрупких и пластичных полимерах (ПММА, ПЭ и других) с меньшим, чем у металлов модулем упругости. Последующие эксперименты

проводили на хрупких и пластичных металлических материалах. В качестве хрупкого металлического материала использовали рельсовую сталь в горячекатаном состоянии (НВ 250, КСЧ 15 Дж/см²). В качестве пластичного металлического материала использовали сталь 12ХН3А (НВ 241, КСЧ 100 Дж/см²).

Высокая степень локализация микродеформаций около стенок усталостной трещины позволила применять микрообразцы размером 25х6х3 мм с предварительно выращенной УТ. Поле наблюдений в микроскопе составляло около 0,5 мм. При доломе образца с УТ площадка разрушений с десятками микротрещин возрастает в несколько раз.

Поверхность образца на пути роста УТ размечали с помощью острой алмазной иглы от профилографа (радиус острия менее 1 мкм). Применяли сетку с ячейкой около 0,05 мм. Было бы лучше использовать метод нанесения сетки вакуумным напылением. Это полностью бы исключило влияние неровностей на поверхности на траекторию перемещения ВУТ. По деформациям микронной сетки можно по превращению исходных прямоугольников в искривленные параллелепипеды в ABAQUS рассчитать степени деформации. Наличие значительных пластических деформаций у ВУТ, которые вызывают текстурные рефлексy вблизи трещины долома, было подтверждено при съемке на отражение в электронографе с половины сломавшегося образца размером 12х6х3 мм из алюминиевого сплава.

1 Монотонное нагружение образца с усталостной трещиной

Вид пластически деформированной зоны у ВУТ можно представить, как показано на рисунке 1 [5,6]. Визуально это линии скольжения (и начинающие открываться ступенчатые трещины на пересечениях этих линий скольжения) хорошо видны при небольшом увеличении в прозрачных материалах.

При наблюдении с помощью стереомикроскопа за процессом роста УТ в хрупкой стали установлено, что непрерывный рост УТ сопровождается ее раскрытием-закрытием в вершине, как обычного шарнира с постоянным углом при ВУТ (рис.2). Угол АОВ открывается и закрывается (почти полностью), а вершина УТ, когда она закрыта – не видна. Хорда CD у ВУТ отсутствует или имеет высоту несколько микрон, т.е. в хрупком материале точка вращения совпадает с точкой О. Если такой образец с УТ подвергается монотонному нагружению, то даже в хрупкой рельсовой стали начинает образовываться хорда CD и зона вытяжки COD.

Сначала она короткая, потом из точек С и D образуются короткие усы сдвиговых деформаций – в этих точках максимальная плотность линий скольжения, которые будут местами появления пунктирных, игольчатых микротрещин. С ростом монотонной нагрузки, приложенной к образцу с УТ, растет и хорда CD, удлиняются два уса деформаций и раздается щелчок при разрушении образца. Металл в треугольнике АОВ и рядом вскипает, взрывается с образованием десятков трещин и проходит магистральная трещина, которая начинается в точке С или D, далее она продолжается на точку О и дальше.

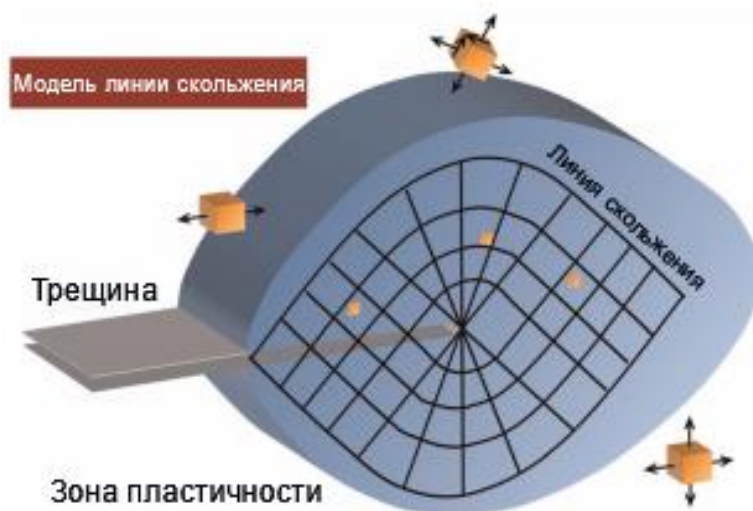


Рисунок 1 – Поля линий скольжения у вершины трещины [5,6]. Искривление ортогональных прямоугольников приводит к созданию зон вторичных напряжений растяжения, условий вскрытия плоскостей сдвига, т.е. игольчатых пунктирных микротрещин. Там, где больше концентрация линий скольжения, там места первых разрушений

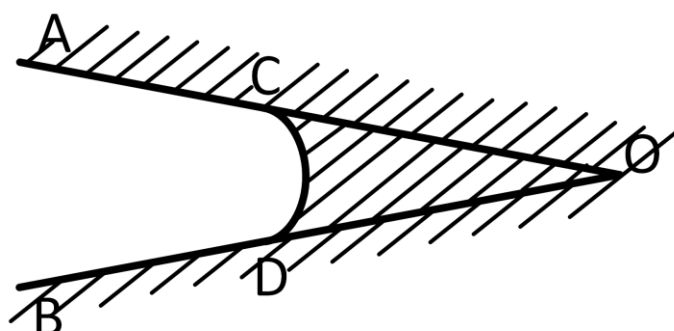


Рисунок 2 – Схема трещины в пластичном материале ACDB. Есть зона вытяжки COD и точка вращения O

Многие хорошо известные, общепринятые модели образования усталостных бороздок (Смит, Лэйрд) оказались верными только в узком интервале усталостных нагрузок [8].

Поэтому предпочтительны прямые наблюдения, измерения картины деформаций у ВУТ, т.к. усталостным разрушениям предшествуют несколько циклов усталостного нагружения. Кинематический анализ роста УТ очень сложен, но есть много интересных явлений в полях линий скольжения у ВУТ:

1 – есть повороты и смещения систем отсчета (особенно при однократном долоте образца с УТ);

2 – есть постоянные переходы точек вращения вглубь образца по мере развития микродеформаций у ВУТ и микроразрушений;

3 – в полосах сдвигов материалы движутся с разными скоростями одной полосы относительно другой;

4 – образуется косоугольная система координат, происходят трехмерные развороты;

5 – инструментарий деформаций и разрушений это только сочетание вращательного и поступательного движений. Эти два простых движения ответственны за все перемещения, образование зон конфликтов, перенапряжений, разрушений.

При монотонном нагружении образцов из хрупкой и пластичной сталей силой P фиксировали их состояние при различной нагрузке $P = 0; 1360 \text{ Н}; 1560 \text{ Н}$ (рисунок 3).

Уже при отсутствии нагрузки ($P = 0$) остаточный угол раскрытия ВУТ равен двум градусам за счет деформаций берегов трещины, окисления стенок УТ, появления вторичных трещин при ветвлении основной УТ (рисунок 3 а). Вторичные трещины почти всегда уходят вверх и вниз от основной трещины под углом от 35 до 100 градусов.

Линия разметки на образце, (рис.3а), С-Е- F- D еще остаются прямыми, а угол при ВУТ равен двум градусам, при усилии $P = 0 \text{ Н}$ (схема d).

При нагрузке $P = 1360 \text{ Н}$, (рис.3b), из ВУТ, из точки О, прошло короткое скольжение (сдвиг) Н, и более длинное скольжение Г, вверх. Т.к. сдвиг Г был длиннее, то и сдвиг верхнего берега УТ был больше на 8 мкм, чем внизу (рис.3b).

Направление сдвига берегов УТ легко вычислить по фотографии, если соединим берега УТ хордой ЕF и появится ее наклон. При снижении усилия P от 1360 Н до нуля, в усах деформаций Г и Н будет реверсивная упруго - пластическая деформация.

Если продолжить повышать монотонно нагрузку до усилия $P = 1560 \text{ Н}$, получим раздвоение трещины. Она пойдет дальше по одному из усов Г или Н; скорее Н, т.к. он находится правее, дальше от ВУТ. В итоге, трещина долома будет одна, а другая ветвь остановится и закроется. Максимальное раскрытие ВУТ будет 0, 18 мм (рис.3с), а верхний берег УТ сдвинут вправо на 20 мкм. Точка вращения берегов УТ будет находиться при нагрузке 1560 Н на расстоянии $T = 0,55 \text{ мм}$ (рис.3с), а при нагрузке 1360 Н (рис.3b) величина T была 0,21 мм. Таким образом, пластическая деформация охватывает все больший объем материала.

Для хрупкой стали расстояние Х (рис.3е) мало, всего несколько микрон. При доломе микрообразца из этой стали участок перед ВУТ подвергается динамическому разрушению, когда трудно понять пошаговые разрушения (необходима скоростная видеозапись). Открываются десятки микротрещин разной ориентации и по зоне предразрушений проходит магистральная трещина. Все короткие трещины (пунктирные) закрываются, и мы их не видим.

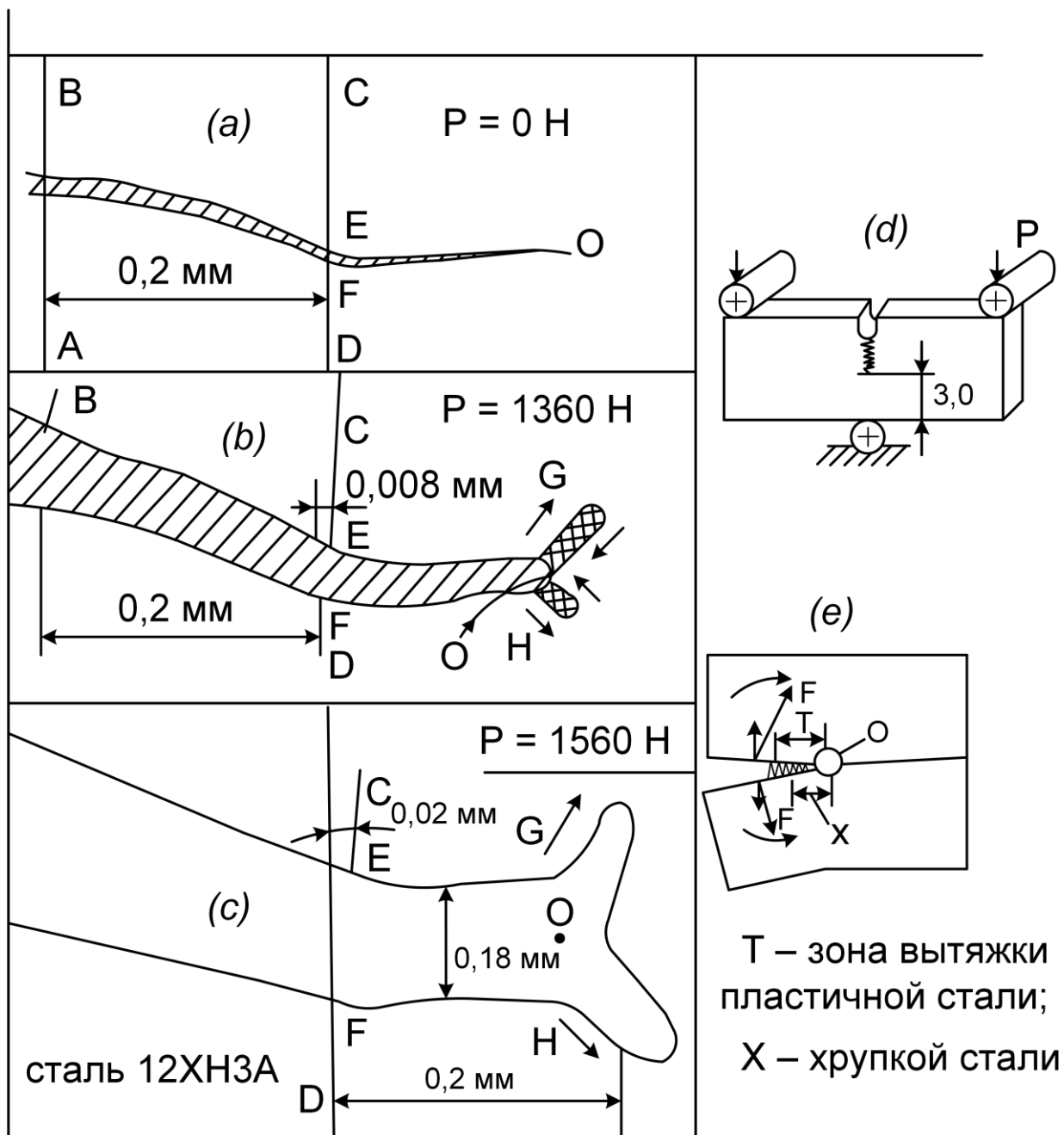


Рисунок 3 – Образец с усталостной трещиной нагружается по схеме (d) при усилии $P=0 \text{ H}$ (a); $P= 1360 \text{ H}$ (b); и $P=1560\text{H}$ (c). Схематическое изображение двух стадий раскрытия трещины долома

В пластичной стали угол при вершине долома равен примерно 13° (без учета высоты ступени). Для пластичных материалов точка вращения O не совпадает с ВУТ и работать на растяжение начинает вся длина зоны вытяжки T , а не короткий отрезок X , как для менее пластичных материалов (рис.3е). Для самых хрупких материалов этот отрезок X стремится к нулю.

Поворот вектора силы F (рис.3е) по мере увеличения нагрузки, у ВУТ увеличивает вклад пластичности и два длинных уса пластической деформации уже не прямолинейные, а искривляются вперед, в сторону роста УТ,

происходит рост пунктирных многочисленных игольчатых микротрещин, которых много в этих полях линий скольжения впереди ВУТ.

2 Процесс ветвления трещин

Обычно под ветвлением трещин имеют в виду раздвоение трещин. УТ растут в режиме открытия – закрытия вершины трещины (хлопания). Когда нет подвода энергии они закрываются, а новый цикл открывает УТ. Именно при трогании с места, закрытой полностью или частично трещины происходят важные явления микродеформаций у ВУТ и следующий за этим процесс ветвления.

Ветвление трещины – обычный процесс образования из одной магистральной трещины двух и редко трех самостоятельных трещин. Это происходит при росте УТ на дефектах, включениях, карбидах, других микротрещинах. При скоростном росте трещин чаще происходит ветвление трещины, потому что при больших скоростях движения у ВТ локализуется, подавляется пластичность материала, он охрупчивается, снижается энергия разрушения и трещина легче ветвится. Поскольку процесс подведения энергии к трещине не постоянен, а происходит импульсами, с остановками трещины до подхода следующего импульса, то временно ВТ будет закрываться частично до минимально возможного угла закрытия. При этом при трогании с места приостановленной трещины, у ее вершины (рис.4) возникнут две плоскости микросдвигов, которые при почти вертикальном переднем фронте импульса нагружения, открываются и равноценно растут как две трещины, со своими углами разрушения V_F . Первая трещина образуется на продолжении верхнего уса деформации, а вторая – из нижнего уса деформации (сдвига). Классически эти усы на новом материале, из надреза, будут направлены под углом $\pm 55^\circ$ к горизонтали, а при наличии цилиндрической пластически деформированной зоны упрочненного наклепом материала (рис.4) сдвиги будут под углом более 45° , т.е. материал упрочнен, и зона сжимающих остаточных напряжений отклоняет сдвиги, отталкивает их на больший угол назад.

При низкой скорости роста и когда трещина трогается с места после остановки, радиус зоны пластической деформации будет больше. При этом в процесс деформации вовлекаются большие объемы материала, а не узкая полоска вдоль стенок трещины, как при ее непрерывном росте.

При росте трещины у ее вершины редко бывают симметричные условия деформации. Поскольку на пути роста трещины встречаются дефекты типа трещин и пор, материал имеет разную локальную прочность. Это приводит к угловому сдвигу или сколу у вершины трещины, т.е. образуется одна боковая трещина или две. Последние обычно наклонены под углом $50 - 70^\circ$ к плоскости трещины.

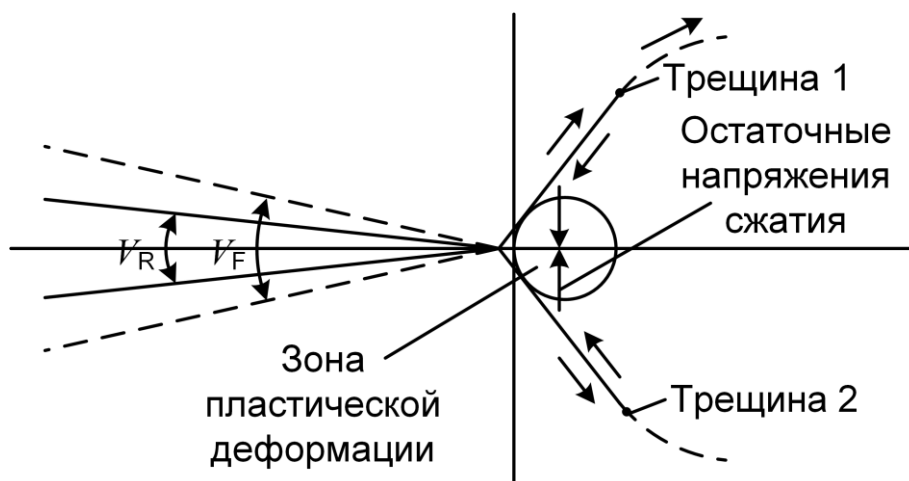


Рисунок 4 – Схема образования при остановке трещины зоны пластической деформации с остаточными напряжениями сжатия. При медленном старте трещина пойдет в обход этой зоны, с одной стороны, или пересечет ее прямо. При быстром старте образуется две трещины, по каждому из симметричных сдвигов

При снижении напряжений во время их большой пульсации трещина останавливается и закрывается, берега ее смыкаются. Новый нагружающий импульс напряжений приводит к раскрытию трещины, ее росту. При этом на месте закрытия вершины трещины, при трогании ее с места обычно образуется пара боковых трещин [2]. Причина этого явления - остаточные деформации материала при остановке трещины (удлиненный материал подвергается сжатию при закрытии трещины).

Если УТ растет в поле действия K_2 (сдвига) или смеси K_1/K_2 , то наблюдается сильное ветвление трещины. Это связано с тем, что в поле сжимающих напряжений растет не одна трещина - лидер, а сразу несколько коротких игольчатых трещин, которые потом соединяются между собой в цепочку. Остальные трещины приостанавливаются и дальше не растут.

Для УТ ветвление трещины часто связано с большими значениями K_2 - компоненты. Если реализуется схема растяжения, а K_1 – компонента есть на включениях, плоскостях сдвига, речных микроструктурах, то обычно растет одна магистральная трещина УТ. Остальные УТ просто закрываются, и их не видно при 100 - кратном увеличении.

3 Речной узор

Картины речного узора на фрактограммах хорошо видны, когда разрушаются хрупкие металлические материалы, камни и керамика. Разрушения по типу речного узора проявляются как соединение первоначально разрушенных сколом (квазисколом) микроплощадок, находящихся на разных уровнях, относительно плоскости магистральной трещины и имеет целью соединить разрушения на разных уровнях ниже и выше плоскости основной магистральной трещины, объединить эти разрушения с плоскостью магистральной трещины

по короткому пути дочерними (вторичными) трещинами. В реализации такого механизма разрушения используется скол (квазискол) по плоскостям спайности внутри зерна, а также сколы по сегрегациям на границах зерен.

Эти точки нормального или смешанного отрыва имеются не только внутри треугольника COD шарнира трещины (рис. 5b), но и впереди ВУТ, там, где действуют реверсивные упруго-пластические деформации.

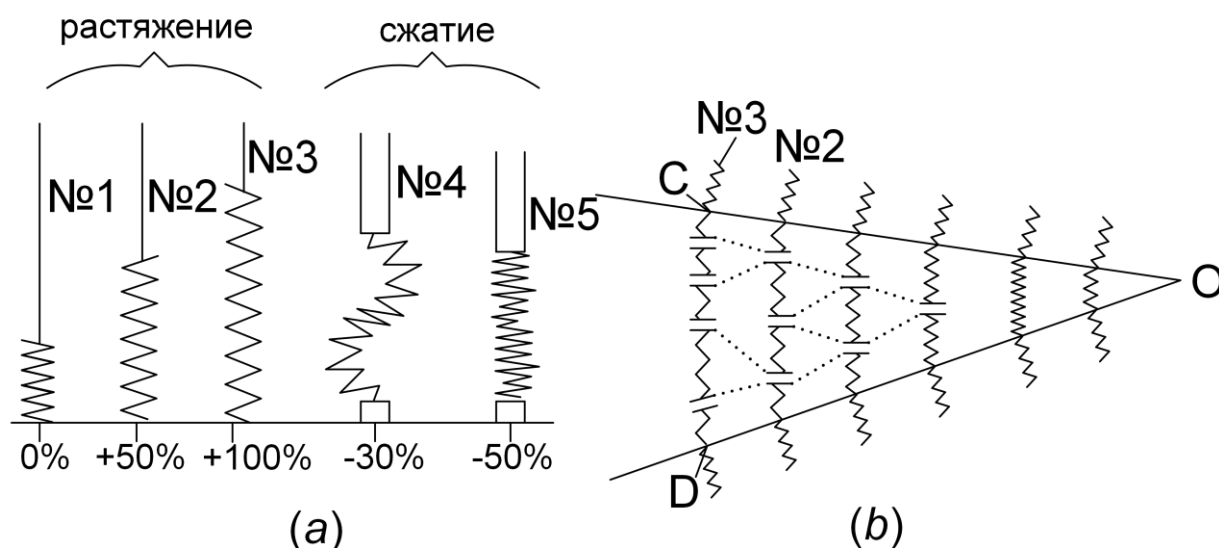


Рисунок 5 – Применение гофрированных упруго – пластических элементов для моделирования вертикальных деформаций в шарнире трещины COD.

(№1-№2-№3) – схема деформаций в открытой трещине (a); при закрытии вершины трещины элемент №3 сначала осаживается с потерей устойчивости, а затем -№5 он осаживается вертикально (неустойчивость при закрытии). При раскрытии трещины COD происходит образование речного узора разрушения (b) путем соединения хрупких разрывов (пунктирные точки) в цепочки вторичных трещин.

При неполном закрытии трещины элемент № 3, (рис.5), преобразуется при сжатии (закрытии) трещины - в элемент № 4, а при полном закрытии трещины элемент № 3 имеет вид как № 5. При закрытии трещины только при сжатии элемента № 4 есть потеря устойчивости, перекося, т.к. он был растянут при открытии трещины. Такое искривление роста УТ имеет место, при рас-трескивании материалов в условиях сжатия. Это приводит к горизонтальным сдвигам, расслоениям.

При сжатии материала идет процесс осадки до тех пор, пока у микро-объема материала не появится третья жесткая опора, необходимая для его устойчивости.

Когда трещина раскрывается, то фигуры речного узора получают при соединении в цепочки (пунктир) (рис. 5b) ближних коротких трещин, образованных в местах квазискола.

У вершины трещины (рис. 6a) прямоугольный тетраэдр заменяем весами, на которых силу растяжения F уравновесим прочностью зерен А и В. Зер-

но А представим как две площадки S1 и S2, на которые устойчиво опирается при сжатии вся конструкция зерна, а при растяжении все уравновешено до начала разрушения цепей - связей (с). Каждое зерно имеет хрупкие (С) и вязкие элементы (L). Первыми будут разрушены хрупкие элементы, а потом будут смяты, срезаны более вязкие перемычки, рис. 6d. Разрушения идут поэтапно: первыми происходят сколы - отрывом, а затем образовавшиеся фасетки сколов начинают соединяться микросдвигами в поле растяжения.

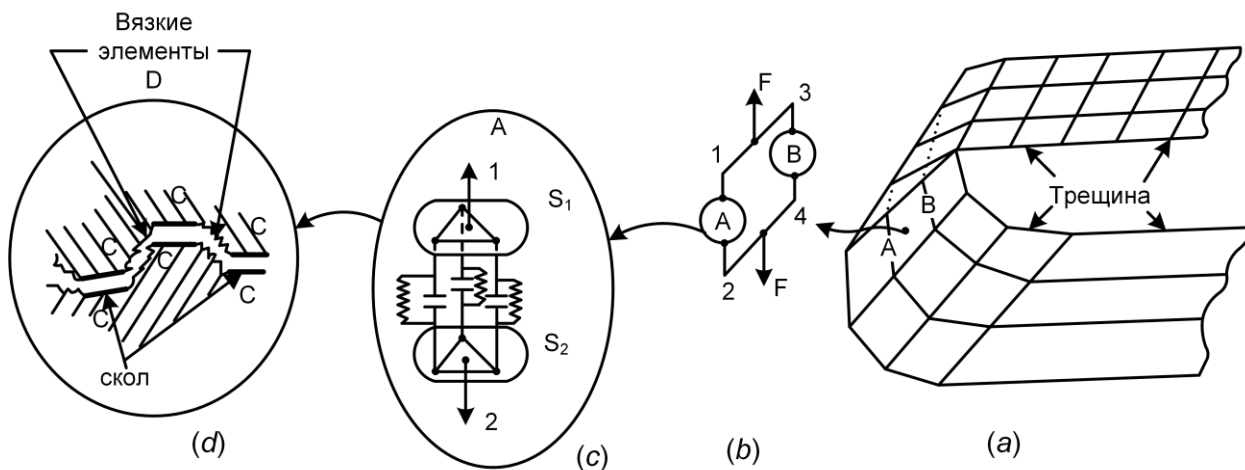


Рисунок 6 – Схема разрушений по типу речного узора. У ВУТ (а) при ее раскрытии идет непрерывное сравнение прочности и деформаций в соседних зернах А и В (b), выбирается путь роста трещины. Внутри зерна А (с) –при растяжении путем скола разрушаются слабые элементы, а при сжатии – элементы остаются неустойчивыми, пока каждый из них не будет иметь три точки опоры. Таким образом элементы разрушаются сначала сколом (С) (рис.6d), а потом сдвигом (D). При соединении фасеток на большой магистральной трещине в итоге получают фигуры речного узора, на которых соединяются разноуровневые площадки.

Выводы: Сформулирован общий для большинства материалов механизм однократного долома при монотонном нагружении и наличии усталостной трещины. Начинается он со старта двух локальных сдвигов (усов деформаций) под углом около 60 градусов из ВУТ. При исчерпании ресурса пластичности образуется много пунктирных микротрещин. От деформаций и трещин, которые нарезают и рассекают микрообъем материала у ВУТ на криволинейные искривленные фигуры, стартуют десятки ступенчатых трещин в местах пересечений плоскостей сдвигов.

По мере развития пластических сдвигов у ВУТ увеличивается угол раскрытия трещины, поворачиваются векторы сил растяжения и усы деформации поворачивают в сторону роста УТ. Возникают дополнительные растягивающие напряжения от искривленных сдвигов, которые облегчают вскрытие плоскостей сдвигов, как трещин.

Толщина зоны пластической деформации по берегам УТ соизмерима с радиусом такой пластической зоны впереди УТ.

По деформациям сетки с шагом 10 мкм, которая нанесена на зону вблизи ВУТ, можно измерять компоненты сдвига и отрыва у ВУТ при доломе.

По радиусу зоны пластической зоны у ВУТ при однократной перегрузке, можно, определять время торможения и замедления роста УТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изучение механизмов контактно-усталостных дефектов в рельсах [Электронный ресурс] : монография / В. Н. Цвигун, Е. А. Шур, В. Н. Кузнецов, Р. С. Койнов ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Электронные данные (1 файл). – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2017. – ISBN 9785780604976.

2. Шур Е. А. Модели образования фрактографических рельефов на усталостных трещинах / Е. А. Шур, В. Н. Цвигун, Р. С. Койнов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Москва; Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2018. – Вып. 40. - С. 118-135. – Библиогр.: с. 134 (28 назв.).

3. Цвигун В. Н. Подповерхностные усталостные трещины («крылья бабочки») при контакте качения / В. Н. Цвигун, Е. А. Шур, Р. С. Койнов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Москва; Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2017. – Вып. 39. - С. 183-190. – Библиогр.: с. 190 (12 назв.).

4. Изучение механизмов питтинга, спаллинга и других контактно-усталостных дефектов рельсов. Сообщение 3. Исследование трещиностойкости рельсовой стали в условиях сложного напряженного состояния (влияние K₁ и K₂ в различных соотношениях) / В.Н. Цвигун, В.Н. Кузнецов, С.В. Коновалов // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии : сборник научных трудов. – Москва; Новокузнецк : СибГИУ, 2015. – Вып. 34. - С. 153-158. – Библиогр.: с. 158 (3 назв.).

5. Chowdhury P., H. Sehitoglu – Mechanisms of fatigue cracks growth – of critical digest of theoretical developments – FFEMS, 2016 Wiley Public Shing Ltd Fatigue Fract Mater Struct 00, p. 1 -23.

6. Rice J. / The mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue/ 1966, ASTM, ASTM STP 415, p. 247 – 411.

7. Ritchie R. Mechanism of fatigue cracks propagations in ductile and brittle solids – Int. J. of Fracture – 1999, 100, p. 55 – 83.

8. Laird C., Smith G.C.: Crack propagation in high stress fatigue. – Philosophical magazine, 1962, №7, p. 947-857.

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

Сборник научных трудов

Компьютерный набор Темлянцева Е.Н.

Подписано в печать 21.10.2019 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.
Усл.печ.л. 11,2 Уч.-изд.л. 11,9 Тираж 300 экз. Заказ № 250

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