

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ЧАСТЬ 2 .

КЛАССИФИКАЦИЯ
И АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ
МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Бишкек · 2001

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА МЕХАНИКИ

КЛАССИФИКАЦИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ЧАСТЬ 2

Классификация и анализ разрушения материалов
и элементов конструкций

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Издательство Кыргызско-Российского
Славянского Университета
Бишкек · 2001

Рычков Б.А. (составитель)

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Часть 2. Классификация и анализ разрушения материалов и элементов конструкций: Методическое пособие /Кыргызско-Российский Славянский университет. – Бишкек, 2001. – 28 с.

Методическое пособие предназначено для студентов четвертого и пятого курсов естественно-технического факультета по специальности «Динамика и прочность машин».

Приводятся сведения, необходимые для анализа причин разрушения материалов и элементов конструкций, а также описание типичных дефектов структуры материалов и деталей.

Рекомендовано к печати кафедрой механики
и РИСО КРСУ

© КРСУ, 2001 г.

1. ТИПИЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ

А) Дефекты кристаллической структуры. Металлические материалы имеют кристаллическую природу. Наиболее широко применяемые конструкционные материалы являются поликристаллическими, причем отдельные зерна можно считать монокристаллами. Совершенная кристаллическая решетка – это идеализированная схема. В решетке реального кристалла имеются различные дефекты.

Один из дефектов – выход атомов из регулярных (стационарных) положений, вызванный тепловым движением, когда нарушаются межатомные связи и возникают электронные явления (это первый тип дефектов – колебания решетки).

Другими простейшими дефектами кристаллической решетки являются: *вакансия*, образующаяся при уходе атома из узла решетки; *межузельный атом*, т.е. «лишний» атом того же элемента, что и атомы, составляющие решетку, для которого не нашлось свободного узла; *примесный*, или чужеродный, атом, который найдется даже в самых «чистых» материалах. Примесные атомы могут замещать атомы, из которых составлена решетка, в ее узлах (тогда они называются *примесями замещения*), либо размещаться в межузельных пустотах между основными атомами решетки (в этом случае они называются *примесями внедрения*). Подобные дефекты, связанные с одним атомом, называются *точечными дефектами* (второй тип дефектов).

Другое несовершенство кристаллической решетки проявляется в виде *линейных дефектов* (третий тип). В результате незавершенного трансляционного смещения одной части решетки относительно другой образуется линейный дефект, называемый *дислокацией*. Иначе говоря, в кристалле образуются такие области, в которых атомы верхней половины кристалла смещены относительно атомов нижней половины. Дислокация и ее ядро обозначаются значком \perp . Ядра, находящиеся в соседних параллельных атомных плоскостях, образуют непрерывную линию дислокации, которая не обязательно должна быть прямой – чаще она бывает искривленной. Дислокации перемещаются дискретными скачками атомного размера, вызывая сдвиг соседних рядов атомов. Если дислокация пройдет кристалл насквозь, то произойдет сдвиг на одно межатомное расстояние.

Представление о дислокации в атомной структуре ввели в 1934 г. независимо друг от друга Тейлор, Орован и Поляни для объяс-

нения большого различия между пределами текучести реальных кристаллических материалов и прочностью идеальных материалов. В настоящее время дислокации можно наблюдать непосредственно с помощью электронной микроскопии тонких фольг, а также с помощью химических методов, выявляя фигуры травления.

Винтовая дислокация превращает ровные атомные плоскости кристалла в спирально закрученные.

Пластичность кристаллов есть результат образования и движения дислокаций. Часто дислокационные линии сплетаются в сетки. В таких случаях трудно представить себе поведение каждого атома; тогда дислокацию рассматривают как целое и говорят о действующих на нее силах, о взаимодействии дислокаций друг с другом и об образовании дислокационной структуры.

Есть еще *поверхностные дефекты* (четвертый тип). Ими являются поверхности, по разные стороны которых векторы трансляции имеют различные направления. Например, может существовать кристаллографическая плоскость, при переходе через которую решетка кристалла изменяется так, как будто она отразилась в зеркале. Такой поверхностный дефект называется *границей двойника*. Двойникование – это второй характерный способ пластической деформации. Двойникованию подвержены металлы с объемноцентрированной кубической и гексагональной плотноупакованной структурой.

Области смыкания кристаллов с различными ориентировками называются границами зерен. Области смыкания кристаллов различного состава называются границами фаз. Свободную поверхность кристалла также можно рассматривать как одно из поверхностных несовершенств, при переходе через которое происходит крайне резкое изменение кристаллической структуры.

Б) Дефекты детали. В детали конкретной конструкции можно обнаружить много дефектов, которые разделяются на три группы: 1) металлургические дефекты в материале в исходном состоянии, 2) дефекты, возникающие в процессе изготовления, 3) дефекты как результат неправильного конструирования.

К 1-й группе относятся: избыточное содержание неметаллических включений, пористость, усадочные раковины, сегрегации (т.е. отделение, изоляция) химических элементов, неблагоприятно ориентированное при штамповке волокнистое строение, хрупкие крупные частицы вторых фаз, зернограницные сегрегации; дефекты, обусловленные отпусковой хрупкостью и связанные с микроструктурой, возникшей при проведении неправильной термической обработки.

Во 2-ю группу включены: следы обработки резанием, шлифовки и листовой штамповки, такие, как подрезы, прижоги, задиры, царапины

и трещины, закаты, рубцы, расслои, обезуглероженные слои, неправильно проведенная цементация, а также дефекты, связанные со сваркой, например пористость, образование горячих и (или) холодных трещин, недостаточная глубина проникновения и плохой профиль наплавленного валика; дефекты, возникающие в результате чрезмерного трения и износа, от влияния коррозии и усталости.

К 3-й группе (субъективные ошибки) относятся: существование больших концентраций напряжений; неправильный выбор материала и технологии его обработки; неадекватный или неточный анализ напряжений с целью определения действующих в детали их полей; дефекты, как результат недостаточного внимания к важной роли характера прилагаемой нагрузки в сочетании с окружающей средой с точки зрения безопасной эксплуатации детали.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ

А) О явлении концентрации напряжений. Резкое изменение формы поверхности деформируемого тела приводит к неравномерному распределению напряжений. Причинами, нарушающими плавное распределение напряжений по поперечному сечению тела, могут служить: отверстия, вырезы, галтели, входящие углы, выступы и т.п. Они называются концентраторами напряжений. Исследование их влияния на характер распределения напряжений составляет содержание учения о концентрации напряжений. Однако не только геометрические факторы, перечисленные выше, могут служить источниками концентрации напряжений. Материал может иметь внутренние зоны концентрации напряжений, возникающие из-за неоднородности структуры: это сами кристаллы с их анизотропными свойствами, а также дислокации, включения, раковины, разрывы на поверхности и краевые эффекты. Концентрация напряжений возникает также в процессе изготовления различных армированных материалов из-за различий коэффициентов Пуассона и температурных коэффициентов связующего и арматуры.

Кроме концентраторов в виде отверстий и надрезов следует иметь в виду еще сварные соединения. Наиболее важным является наличие концентрации напряжений при геометрических нарушениях очертаний поверхности соединения, но, кроме того, металл шва является литым или частично деформированным и может быть менее прочным, чем основной металл, особенно если шов содержит внутренние дефекты. Околошовная зона также обладает эффектом концентрации напряжений, ибо в ней возникают остаточные растягивающие напряжения, уменьшающие предел усталости.

Наличие концентратора приводит к резкому возрастанию напряжений в непосредственной близости от него. Однако концентрация напряжений очень быстро убывает по мере удаления от концентратора, так что напряженное состояние основной массы тела не зависит от особенностей концентратора. Таким образом, влияние концентраторов оказывается локальным, а напряжения, возникающие в их окрестности, поэтому называют *местными* напряжениями. Убывание напряжений по мере удаления от концентратора является *законом затухания*. Чем больше максимальное напряжение у концентратора, тем резче затухание. Это частный случай *принципа Сен-Венана*, в соответствии с которым если в данной области приложена самоуравновешенная система сил, то напряжения, вызванные этими силами, исчезают на расстоянии порядка наибольшего линейного размера области.

При увеличении нагрузки напряжения вблизи концентратора достигают предела текучести раньше, чем в других местах. Это приводит к образованию в окрестности концентратора локальной зоны пластических деформаций, в то время как основная масса материала тела деформируется упруго. В связи с этим происходит некоторое выравнивание напряжений. Чем пластичнее материал, тем перераспределение напряжений более заметно. Тем самым местные перенапряжения практически безопасны для пластических материалов при статическом нагружении. Более того, обнаружено, что прочность образца с надрезом из пластичного материала выше, чем у гладкого цилиндрического образца с одинаковым рабочим сечением, и она повышается с увеличением глубины надреза (последняя характеризуется процентом занимаемой выточкой части сечения). У отдельных пластичных металлов она может быть даже несколько выше, чем у ненадрезанного стержня. На изменение прочности влияет также острота надреза, характеризующаяся отношением глубины выточки к радиусу кривизны у ее основания ($\frac{t}{\rho}$). При этом наблюдаются два эффекта: с увеличением остроты надреза прочность повышается, а пластичность снижается. У надрезанных образцов предел текучести σ_s может повышаться на 5 – 40%, а предел прочности σ_b – на 25 – 60%. Следует особо подчеркнуть, что острые надрезы оказывают противоположное влияние, если прочность достигает некоторого критического значения. Для большинства пластичных металлов, по данным Г.В.Ужика, отношение прочности надрезанного образца к гладкому с возрастанием остроты надреза вначале растет, достигает максимума, а затем снижается. Но и для пластичных материалов концентрация напряжений опасна при переменных напряжениях; в этом

случае напряжения вблизи концентратора могут превысить предел сопротивления материала переменным нагрузкам, что приведет к преждевременному разрушению.

Иначе обстоит дело у хрупких материалов. Прочность образцов с надрезом у них резко снижается вследствие возникновения пиков местных напряжений в окрестностях концентраторов.

Второй важной особенностью концентрации напряжений, еще мало учитываемой в практических расчетах, является возникновение вблизи концентраторов более сложного напряженного состояния (чаще двухосного или трехосного), чем напряженное состояние материала детали, удаленного от концентратора. Это оказывает непосредственное влияние на условия разрушения. Так, неравномерное трехосное растяжение, которое возникает при растяжении цилиндрического стержня с глубокой кольцевой выточкой, вызывает торможение пластичности и обычно приводит к повышению пределов текучести и прочности.

Концентрация напряжений в окрестности выточки существенно зависит от радиуса кривизны в ее вершине ρ , глубины выточки t , а также от угла раскрытия (угла наклона поверхности выточки). Из трех перечисленных параметров, влияющих на величину концентрации напряжений, наиболее важным является ρ . Как показал Нейбер, основную роль играет «кривизна выточки», т.е. отношение глубины выточки к радиусу кривизны у основания ($\frac{t}{\rho}, \frac{1}{\rho}$). Влияние угла наклона значительно меньше, чем первых двух параметров.

Наряду с концентрацией напряжений имеет место концентрация деформаций, обладающая определенной спецификой и потому требующая особого внимания. Величины концентрации напряжений и деформаций в упругой области совпадают. Концентрация пластических деформаций не только отличается от концентрации упругих деформаций – эта характеристика, кроме того, имеет различные значения при плоском напряженном и плоском деформированном состояниях. Концентрация пластических деформаций может более медленно уменьшаться с расстоянием, вследствие чего для нее принцип Сен-Венана неприменим. Наконец, концентрация деформаций при упругопластическом состоянии возрастает в отличие от концентрации напряжений, которая уменьшается при наличии областей пластичности. Концентрация деформаций мало влияет на начальную деформацию детали и ее предельную нагрузку, но она способствует разрушению, даже когда возникают пластические деформации. Дело в том, что хотя для материалов, которые могут деформироваться пластически, пластическая деформация и замедляет разрушение по сравнению с теми материалами, которые не

могут деформироваться пластически, но наличие концентратора приводит к уменьшению величины деформации до разрушения.

Б) Коэффициенты концентрации напряжений. Концентрация напряжений характеризуется макроскопическими параметрами: коэффициентами концентрации напряжений и градиентом изменения напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений K_t характеризует уровень местного повышения напряжений и выражается формулой

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_n \quad (1)$$

где σ_{\max} – наибольшее местное напряжение, σ_n – номинальное или среднее по сечению напряжение (σ_{\max} определяется теоретически методами теории упругости или экспериментально). Номинальное напряжение вычисляется по типовым формулам. Следует заметить, что при этом нагрузку можно относить либо к полному поперечному сечению, без учета концентратора, либо к опасному сечению, ослабленному концентратором напряжений. Поэтому при пользовании термином «номинальное напряжение» следует указывать метод, каким оно определено. Таким образом, хотя выбор критического сечения является произвольным, необходимо иметь в виду одно и то же сечение при вычислении номинальных и максимальных напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений является функцией абсолютной величины номинального напряжения, геометрических параметров детали и вида нагружения; он не зависит от механических свойств материала, предполагаемого упругим и изотропным. Однако в некоторых случаях, например, при трехмерном напряженном состоянии и при наличии концентрации нагрузки может проявиться влияние коэффициента Пуассона.

Неравномерность распределения напряжений по сечению характеризуется изменением максимального напряжения σ_1 вблизи наибольшей концентрации. Формула для градиента изменения напряжений имеет вид

$$G = d\sigma_1 / dy \quad (2)$$

Влияние концентрации напряжений на прочность учитывается эффективным коэффициентом концентрации напряжений при статической нагрузке:

$$k_s = \sigma_b / \sigma_{bk} \quad (3)$$

при этом площадь поперечного сечения образца без концентратора должна быть равна площади поперечного сечения образца с концентратором в ослабленном сечении. Обычно эффективные коэффициенты концентрации напряжений приводят в виде графиков или номограмм для конкретных материалов и форм концентраторов. k_s меньше теоретического (k_t) и лишь в отдельных случаях может приближаться к k_t , в частности для хрупких материалов. Обнаружено, что k_s увеличивается при уменьшении вязкости материала, при повышении предела прочности и при увеличении размера концентратора. В предельном случае вязкости, равной нулю, получим хрупкий материал типа стекла. Он абсолютно чувствителен к концентрации напряжений при статическом нагружении и для него $k_s = k_t$. Металлы с более высоким пределом прочности при растяжении имеют меньшую вязкость, а также большую чувствительность и больший коэффициент концентрации напряжений.

Влияние типа концентратора таково, что образцы с кольцевой выточкой обнаруживают наибольший предел прочности, обычно даже много больший, чем предел прочности гладких образцов, т.е. статический коэффициент концентрации напряжений по величине меньше единицы, с минимальным значением 0,67. Для образцов из стали с различными типами кольцевых выточек получены величины k_s в диапазоне от 0,68 до 0,82. Другие типы концентраторов, например галтель или поперечное отверстие, обнаруживают зачастую малую чувствительность к концентрации, давая величины k_s , примерно равные единице. Пластины с концентраторами и без них имеют примерно равный статический предел прочности. Так, по данным некоторых проектировщиков, для плоских образцов семь различных типов концентраторов с теоретическими коэффициентами концентрации напряжений, колеблющимися от 3/2 до 5, дали величины k_s в сравнительно узком диапазоне – 0,9 до 1,17 – для стали и алюминиевых сплавов.

Существует еще эффективный коэффициент концентрации при напряжениях, переменных во времени, – k_f , который показывает, во сколько раз предел усталости образца без концентратора выше предела усталости образца с концентратором. k_f колеблется от значения единицы для очень мелких надрезов до величины теоретического коэффициента концентрации для глубоких надрезов, но никогда не превосходит

последней величины. k_f – эмпирическая характеристики, не связанная с напряженным состоянием.

Следует еще иметь в виду, что не удастся получить модель с очень высокими значениями k_t за счет увеличения остроты надреза. Так, максимальные значения k_t в опыте равны приблизительно 11. В применении к мелкозернистым металлам возможно надежно использовать результаты теории до кривизны надрезов, при которой $k_t = 3 \div 4$, когда в области вершины концентратора физическая неоднородность материала еще не оказывает влияния.

Обычно значения теоретических коэффициентов оказываются несколько больше опытных. Объясняется это тем, что экспериментально деформации измеряются на определенной базе (длине), а теоретические расчеты производятся для точки. Расхождение будет уменьшаться с уменьшением базы применяемых тензометров.

Для выточек с острыми углами Нейбер предложил следующую эмпирическую зависимость для вычисления коэффициента концентрации:

$$k_A = 1 + \frac{k_t - 1}{1 + \frac{\pi}{\pi - \omega} \sqrt{\frac{A}{R}}}, \quad (4)$$

где A – постоянная величина для данного материала, имеющая размерность длины и представляющая собой половину ширины элементарной частицы (блока), она определяется экспериментально (для стали $A \approx 0,5$ мм); R – радиус закругления у основания выреза; ω – входящий угол выреза в виде V – образного паза, выражающийся в радианах.

Соотношение (4) используется для описания результатов испытаний надрезанных образцов. Не установлено никакой количественной зависимости между значениями A , определенными экспериментально, и микроструктурой испытанных материалов.

Для произвольной нелинейной зависимости между напряжением и деформацией ($\sigma - \varepsilon$) Нейбер предложил следующий способ нахождения коэффициента концентрации: на продолжении упругого участка кривой $\sigma - \varepsilon$ откладывается величина фиктивного максимального напряжения, равного произведению номинального напряжения на коэффициент концентрации в упругой области. Затем из полученной точки проводится гипербола $\sigma \cdot \varepsilon = const$ до пересечения с кривой $\sigma - \varepsilon$. Ордината точки пересечения будет соответствовать действительному мак-

симальному напряжению σ_{max} , по которому и вычисляется искомый коэффициент концентрации напряжений.

В) Образование микротрещин. При изучении вопроса об образовании микротрещин в материале, не имеющем их в исходном состоянии, принимается следующее основное предположение. Считается, что разрушению всегда предшествует локальное пластическое течение и что в результате этого течения возникает основная доля концентрации напряжений, необходимой как для образования, так и для распространения трещины. Область чистого пластического течения во всем образце может быть мала и может быть сосредоточена в непосредственной близости от трещины, но она всегда есть. Локальное пластическое течение в форме скольжения или двойникования наблюдалось в окрестности поверхностей разрушения в каждом материале, в котором только пробовали его найти.

В материалах с объемно центрированной кубической и гексагональной плотно упакованной решеткой скольжение возникает в пачках соседних плоскостей, прилегающих друг к другу (полосы скольжения), а не распределено равномерно по всему кристаллу. Для удобства вычислений обычно объединяют двойники и полосы скольжения в категорию полос течения. Основная особенность механизма разрушения физически заключается в том, что, для того чтобы вызвать начало разрушения, необходимо заблокировать полосу течения и предотвратить рассасывание результирующей концентрации напряжений. Как показали эксперименты, при испытании меди скольжение происходит легко и обрыв происходит редко. В железе и бериллии наблюдаются полосы как скольжения, так и двойникования, и эти полосы легко блокируются границами зерен, включениями, вторичными фазами или другими полосами течения.

Напряжение, необходимое для разрушения, при этом подходе не определяется точно, однако показано, что разрушение возникает при напряжении течения, требуемом для того, чтобы обеспечить критическую ширину полосы течения. Предел текучести и разрушающее напряжение примерно равны при температуре перехода от хрупкого поведения к пластическому, и изучение текучести при температуре такого перехода дает, таким образом, удобный способ измерения критического напряжения текучести. Такая схема вязко-хрупкого перехода была предложена А.Ф.Иоффе для оценки работоспособности стали и конструкционных материалов в изделии. Схема была использована Н.Н.Давиденковым для обобщения и анализа многочисленных опытных данных по потере пластичности и переходу в хрупкое состояние металлов и сплавов при определенной критической температуре (или в интервале температур), и поэтому в дальнейшем она получила название схемы Иоффе-Давиденкова. До настоящего времени большинство прак-

тических и теоретических работ в области хрупкого разрушения базируются на этой схеме. На ее основе был обоснован метод ударной вязкости как количественный метод оценки склонности материала к хрупкому разрушению. Ударные испытания являются косвенным методом определения сопротивления отрыву. В 1950 г. Г.В.Ужик предложил метод непосредственного определения сопротивления отрыву путем испытания до разрушения образцов с надрезом при статическом растяжении и различных температурах. Он впервые обратил внимание на тот факт, что не приложенное внешнее напряжение определяет поведение материала под нагрузкой, а локальное напряженное состояние у вершины надреза или трещины. Было показано, что хрупкое разрушение пластичных металлов возникает только тогда, когда локальный объем у вершины надреза подвергается всестороннему неравномерному растяжению.

Г) Образование макроскопических трещин. Наличие микротрещины размером с диаметр одного зерна еще не является достаточным условием для полного разрушения. Так, например, в условиях растяжения наблюдали за образцами железа, которые содержали более чем 1% треснувших зерен и в которых течение продолжалось обычным образом при увеличении напряжений. Каждая микротрещина затуплялась, и вокруг нее возникало пластическое течение, а результирующие локальные концентрации напряжений были пренебрежимо малы. Чтобы произошло разрушение, необходимо, чтобы микротрещина распространялась сквозь окружающие ее зерна до тех пор, пока растущая трещина либо не разделит образец на части, либо не встретит другие растущие трещины, которые начали расти с подобных же зародышей микротрещин.

Д) Виды механического разрушения при различных формах напряженного состояния. Хотя разрушение представляет собой хорошо известное явление, его истинная природа во многих случаях выяснена далеко не полностью и потому трудно дать точное его определение.

Вплоть до сравнительно недавнего времени (до 1924 – 1925 гг.) считалось, что разрушение – это простое физическое явление, подобное испарению жидкостей или плавлению твердых тел. Проведенные с тех пор экспериментальные работы позволили установить, что кажущиеся одинаковыми явления, объединенные общим названием «разрушение», на самом деле соответствуют различным процессам. Теория сопротивления разрушению в настоящее время окончательно не разработана, однако удается распознать различные виды разрушения и классифицировать в соответствии с их механизмами.

С микроструктурной точки зрения существуют три различных вида разрушения, из которых первые два – *разрушение сколом* и *разру-*

шение срезом – можно назвать *транскристаллитными*, а третье – *разрушение по границам зерен* – *интеркристаллитным*.

Как следует из самих названий, при транскристаллитном разрушении трещина распространяется через внутренние области зерен в поликристаллическом материале, а при интеркристаллитном разрушении она проходит по границам зерен. Со структурной точки зрения можно различить два вида транскристаллитного разрушения в зависимости от характерной для него кристаллической плоскости. Например, если элементарная ячейка является объемно центрированной кубической (типичной для железа и сталей), то разрушение сколом происходит по внешней плоскости такой ячейки, а разрушение срезом – по плоскости внутри ячейки, включающей атом в центре. Это не означает, что при срезе единственным критерием разрушения является величина действующего касательного напряжения; также и наступление скола не определяется исключительно растягивающими напряжениями.

Существуют два способа практического определения типа разрушения. Первый из них основан на различии плоскостей разрушения кристалла, которые выявляют металлографически. При исследовании стали поверхность излома сначала полируют, а затем протравливают в реактиве, состоящем из азотной кислоты и воды (в соотношении 1:3). Образуются фигуры травления, имеющие квадратную или прямоугольную форму, со сторонами, параллельными плоскостям куба кристалла феррита. Изучение фигур травления под микроскопом позволяет определить направление разрушения по отношению к указанным плоскостям и выявить плоскости скола и сдвига.

Кроме того, для двух указанных типов разрушения характерны различные виды поверхностей излома, что составляет основу другого метода их идентификации. В случае разрушения срезом поверхность излома серая и волокнистая, в то время как поверхность скола светлая и кристаллическая. Однако существуют случаи разрушения, когда на поверхности излома одновременно наблюдаются оба вида указанных признаков; при этом совсем не обязательно, чтобы соотношение волокнистых и кристаллических участков соответствовало пропорции между долями объема, разрушившимися срезом и сколом.

При классификации разрушения принято использовать термины «вязкое» и «хрупкое», но они не вполне согласуются с рассмотренными категориями разрушения. Например, часто трудно отождествить вязкое разрушение с тем или другим типом транскристаллитного разрушения. Вязкость обычно связывают с пластическим течением, однако рентгеновским методом удается обнаружить признаки пластического течения на поверхностях так называемого абсолютно хрупкого излома стали.

По этой причине термин «хрупкое» разумнее применять для разрушения, при котором относительное сужение поперечного сечения детали мало (составляет несколько процентов). Например, в случае круглых прутков с глубоким, острым надрезом неизменно происходит разрушение срезом, но поскольку при этом изменение размеров образца минимально, разрушение правильнее называть хрупким. Разрушению сколом часто предшествует небольшое пластическое течение; следовательно, в этом смысле оно должно быть отнесено к вязким. Таким образом, терминам «вязкое» и «хрупкое» при описании как микроскопических, так и макроскопических характеристик разрушения можно придать различный смысл.

В частности, так называемое хрупкое разрушение может быть типа вязкого скола либо хрупкого среза. Последнее характерно для стали при низкой температуре. Разрушение чугуна считают хрупким, хотя со структурной точки зрения оно осуществляется механизмом среза, а не скола.

Интеркристаллитное разрушение, которое часто наблюдается в условиях ползучести и коррозии под напряжением, имеет совершенно иной механизм, хотя и в этом случае поведение материала может быть как хрупким, так и вязким.

Явное преимущество классификации явлений разрушения по кристаллографическим признакам состоит в том, что она помогает выявить механизмы этого процесса. Однако несомненно и то, что феноменологическая точка зрения более удобна, так как позволяет непосредственно использовать атомистические представления наряду с макроскопическими.

Предметом механики разрушения в узком смысле является анализ напряженно-деформированного состояния, условий и характера разрушения тел с трещинами. В частности, механика разрушения дает ответ на вопрос о несущей способности тела с заданной трещиной или о допустимом размере трещины в теле при заданных внешних нагрузках. Последнее является теоретической базой для разработки норм дефектности материалов в процессе неразрушающего контроля их качества. Совершенствование методов подобного рода контроля показало, что бездефектных материалов практически не существует. Полная же ликвидация технологических трещин в конструкционных материалах ввиду чрезвычайной сложности этой задачи в обозримом будущем представляется экономически нерентабельной. Да и их наличие, как показывает опыт, еще не свидетельствует о безусловной неработоспособности конструкции.

Долгое время влияние трещин не учитывалось в расчетах на прочность. Считалось, что они развиваются на заключительной, по времени очень короткой, стадии разрушения и не вносят заметного вклада в

долговечность конструкции. Традиционные теории, называемые теориями прочности, оставляли вне своих рамок процесс собственно разрушения. По образному выражению Ю.Н.Работнова, заботясь о здоровье, они избегали анализа самой болезни. «Но для предотвращения смертельного заболевания нужно знать его природу, симптомы и характер протекания; для обеспечения прочности конструкции нужно знать причины и характер ее возможного разрушения» [8].

Излому от статических напряжений предшествует развитие остаточных деформаций удлинения и поперечного сужения. Изломы от переменных напряжений не сопровождаются ни удлинением, ни поперечным сужением сечения детали в месте их образования.

Виды излома образцов, разорванных на разрывных машинах, следующие.

Поверхность излома металла в вязком состоянии чаще всего кратерообразная. Перед разрушением пластическая деформация оставляет свои следы – видимое глазом сужение поперечного сечения образца и образование шейки. Изломы вязкого материала иногда происходят по плоскости, наклоненной под углом 45° к оси образца, т.е. по направлению линий Чернова-Людерса. Это показывает, что излому предшествовала деформация сдвига.

Стали в хрупком состоянии (из-за надреза, термической обработки) при разрушении от растяжения не обнаруживают видимых невооруженным глазом деформаций сужения и удлинения. Но эти деформации можно обнаружить чувствительными приборами. При изгибе и кручении, как и при растяжении, статический излом сопровождается пластическими деформациями. На характер излома прямых деталей влияет термическая обработка.

Незадолго до момента разрушения металла при переменных напряжениях в нем начинают развиваться трудно обнаруживаемые пластические деформации. Они возникают вследствие деформаций скольжения. Скольжение происходит по плоскостям кристаллических решеток, заполненных больше всего атомами, а также вследствие перемещения дислокаций и других дефектов кристаллической структуры и вызывается касательными напряжениями.

Типичным признаком усталостного излома, независимо от рода напряжений, является матовая мелкозернистая поверхность. Любой усталостный излом показывает: а) отрыв, когда плоскость разрыва перпендикулярна к направлению действия нормальных напряжений; б) сдвиг, когда плоскость разрыва располагается под углом 45° к нормальным напряжениям. Начало разрушения может наступить по той или другой причине – в зависимости от того, достигли ли нормальные напряжения величины сопротивления отрыва раньше, чем касательные

напряжения приблизились к временному сопротивлению сдвига, или наоборот. В первом случае происходит отрыв, во втором – сдвиг.

Поверхность излома, происшедшего от отрыва, матовая, мелкозернистая, бархатистая. Этот вид характеризует усталостный излом после большого числа циклов. Излом, вызванный отрывом, происшедшим от знакопеременных напряжений, имеет более бархатистую поверхность, чем излом, вызванный отрывом от пульсирующих напряжений.

Отрыв вследствие статического напряжения оставляет на плоскости излома видимые следы пластических деформаций – крупные зерна. Поверхность излома, вызванного отрывом при переходе временного предела усталости (после относительно небольшого числа циклов перемен напряжения), неоднородна. Часть поверхности излома мелкозернистая, другая часть имеет крупное зерно и видимые следы пластической деформации.

Излом, образованный сдвигом, может иметь гладкую мелкозернистую и неровную, иногда чешуйчатого вида, поверхность. Сдвиг, вызванный переменными напряжениями, имеет большей частью коричнево-красноватый оттенок, переходящий иногда в черный цвет. Сдвиг от статического напряжения придает поверхности излома металлический блеск.

Изучая виды изломов, можно составить представление о направлении действия сил, их вызвавших. Результаты лабораторных исследований видов излома, а также измерения действовавших на деталь сил могут быть использованы для изучения причин аварий, происшедших при эксплуатации машин.

Микроскопические трещины усталости образуются уже на ранней стадии деформирования после числа циклов, составляющего 10-20% от общей долговечности. Видимая трещина образуется незадолго до окончательного разрушения детали. Обычно деталь 70-90% общего числа циклов, необходимых для разрушения при неизменной амплитуде напряжений, работает без видимой трещины, и лишь в оставшиеся циклы развивается трещина, приводящая к окончательному излому.

Внешний вид усталостных изломов свидетельствует о постепенном развитии трещины усталости. При этом если нагрузка на деталь действует так, что напряжения в отдельные периоды достигают величин, достаточных для роста трещины, она растёт только в эти периоды. Общее время и число циклов для образования трещины в этом случае значительно увеличивается. Примером таких разрушений могут служить оси подвижного состава железных дорог, вследствие того, что рост трещины происходит преимущественно при перегрузке.

На поверхности усталостного излома обычно наблюдаются три типичные зоны. Вначале образуется зона, соответствующая зарождению

трещины в некотором микроскопическом объеме на контуре и медленному ее развитию в макротрещину. Увеличение напряжений в месте расположения трещины (в связи с ослаблением сечения) вызывает ускоренный рост трещины с увеличением площади ее распространения. После того как трещина распространилась на определенную часть сечения, мгновенно происходит хрупкое разрушение по части сечения, называемой *усталостным доломом*. Поверхность излома в месте расположения трещины бывает плоской и гладкой благодаря сильному поверхностному наклепу, который металл получает при повторяющемся соприкосновении поверхностей излома при циклическом нагружении. Поверхность излома части сечения, в которой распространяется макротрещина, во многих случаях имеет ряд уступов, особенно при изломах деталей, подвергающихся меняющейся по величине нагрузке. Поверхность долома имеет кристаллический характер, связанный с хрупким разрушением.

Е) Условия перехода металлов из вязкого в хрупкое состояние. Изучение механических свойств аварийных деталей показало, что высокое сопротивление пластической деформации (σ_m, σ_s), хорошая пластичность (δ, ϕ) и удовлетворительная вязкость металла еще не являются гарантией достаточно высокой несущей способности изготовленной из него детали. Подавляющее большинство разрушений машинных деталей сопровождается хрупким изломом, начинающимся, как правило, в местах концентрации напряжений. Причина этого явления заключается в способности пластичных металлов охрупчиваться под действием определенных внешних и внутренних факторов.

На переход пластичных металлов из вязкого в хрупкое состояние влияют: *температура, скорость нагружения, вид напряженного состояния, наличие концентраторов напряжений, размеры образца (изделия), условия обработки, структурное состояние металла.*

С понижением температуры характеристики сопротивления пластической деформации многих металлов увеличиваются, а пластичность и вязкость снижаются. При какой-то критической температуре, вернее в критическом интервале температур, ударная вязкость становится весьма низкой – металл переходит в хрупкое состояние.

Температура, соответствующая переходу металлов из вязкого в хрупкое состояние, называется критической температурой хрупкости или *порогом хладноломкости*. Так как переход из вязкого состояния в хрупкое чаще всего бывает постепенным, то различают два порога хладноломкости: верхний, соответствующий переходу из вязкого состояния в переходное (промежуточное), и нижний, соответствующий переходу из промежуточного состояния в хрупкое.

Как правило, хладноломкость характерна для металлов с объемноцентрированной кубической и гексагональной решетками и не свойственна металлам с гранецентрированной кубической решеткой. К числу хладноломких, т.е. подверженных хрупкости на холоде, металлов относятся все черные металлы, включая разнообразные сорта конструкционной стали, за исключением высоколегированных сталей аустенитного класса. Из цветных металлов хладноломкими являются цинк и вольфрам, в меньшей степени – магний. Большинство других цветных металлов, включая прессованный алюминий, медь, никель и их сплавы, не обнаруживают хрупкости даже при самых низких температурах.

У конструкционных сталей склонность к хрупкому разрушению хорошо оценивается по температурам их хладноломкости.

Хотя склонность к хрупкому разрушению устанавливается испытаниями на ударную вязкость при температурах ниже 0^0 , нельзя сделать вывод, что результаты таких испытаний не могут иметь значения для службы металла при комнатной температуре. Следует иметь в виду, что уровень критической температуры, установленный на малых лабораторных образцах определенной формы, дает только сравнительную оценку хладноломкости испытываемой стали, справедливую для образцов данных размеров и формы, и не может дать количественного представления о поведении больших образцов и деталей. Известно, что большие образцы более склонны к хрупкому разрушению, чем малые, и что хрупкие разрушения больших деталей могут происходить при более высоких температурах, в том числе и при температурах, представляющих непосредственный интерес для эксплуатации машин.

Вторым фактором, имеющим значение для перехода пластичных металлов в хрупкое состояние, является скорость деформирования. С увеличением скорости деформирования характеристики сопротивления пластичных металлов упругой и пластической деформации увеличиваются. Например, увеличение скорости нагружения с 1 до 8 кг/мм² в секунду приводит к увеличению значений предела текучести углеродистой стали почти на 20%. Отношение динамического предела текучести к статическому пределу текучести для конструкционной стали доходит до 1,7. Временное сопротивление разрыву при динамическом (ударном) нагружении также повышается, но в меньшей степени, чем предел текучести.

Влияние скорости деформирования, однако, не так велико, как температуры. В то время как многие металлы могут быть переведены в хрупкое состояние только за счет снижения температуры, для большого числа технических металлов критическая скорость деформирования (скорость, необходимая для того, чтобы перевести металл в хрупкое состояние при неизменных всех других факторах, способствующих ох-

рупчиванию) при 20⁰ настолько велика, что осуществление ее на практике невозможно. Динамичность нагружения имеет значение главным образом в условиях определенных видов напряженного состояния и в сочетании с другими факторами, способствующими охрупчиванию пластичных металлов.

Одним из таких факторов является «жесткость» напряженного состояния. Наиболее жестким видом напряженного состояния является всестороннее растяжение. Аналогично влияют и все другие виды сложноподвиженного состояния, оказывающие затормаживающее влияние на пластическую деформацию.

Влияние концентраторов напряжений на сопротивление пластичных металлов деформации рассмотрено выше.

Критический интервал температур, в котором наступает снижение ударной вязкости, помимо всех перечисленных факторов, зависит от размеров образца (изделия). С увеличением размеров и объема образца критический интервал хрупкости передвигается в сторону высоких температур. Чем больше изделие, тем меньше хрупкая прочность, тем вероятнее возможность хрупкого его разрушения в условиях данного напряженного состояния.

На переход конструкционной стали из вязкого в хрупкое состояние большое влияние оказывают условия получения и таким образом изготовления и обработки как факторы, определяющие структуру стали и ее вязкость. Все виды обработки, способствующие повышению порога хладноломкости, суживают область вязкого состояния и увеличивают хрупкость стали.

Особенно большое влияние на хладноломкость оказывает величина зерна. Стали с крупным зерном обладают значительно большей хладноломкостью, чем стали мелкозернистые. Мелкое зерно понижает критическую температуру хрупкости и улучшает ударную вязкость стали независимо от того, является ли оно (зерно) биографическим или действительным (т.е. является ли оно результатом выплавки стали и термической обработки).

Наклеп растяжением, сжатием или изгибом снижает общий уровень удельной ударной вязкости и повышает порог хладноломкости тем в большей степени, чем выше степень деформации. Это влияние усиливается при последующем старении.

Хладноломкость стали определяется также химическим ее составом. В составе стали присутствуют постоянные элементы в виде углерода и фосфора, которые облегчают переход в хладноломкое состояние. Среди легирующих элементов имеются как элементы, которые смещают порог хладноломкости в сторону повышенных температур, так

и элементы, которые, наоборот, ослабляют склонность к хладноломкости. Среди последних большое значение имеет никель.

3. МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

К целям макроскопического изучения поверхности разрушения относятся: обнаружение местоположения начала трещины, определение ее размера и формы, описание «текстуры» поверхности разрушения и выявление крупных следов, которые могли бы позволить сделать предположение о действующем механизме разрушения. Для начала необходимо попытаться определить количество мест зарождения трещин (одно или два), так как это может служить указанием на реализуемое напряженное состояние в критической области. Как правило, число мест зарождения трещины возрастает при увеличении уровня приложенных напряжений и величины действующего коэффициента интенсивности напряжений. Даже в том случае, когда до критических размеров достигает лишь одна трещина, до разрушения могут развиваться вторичные трещины, что обуславливает изменение в характере напряженного состояния, которое может аккомодировать и дать толчок к развитию существующего основного дефекта.

Вне зависимости от количества мест зарождения разрушения чрезвычайно важно определить их месторасположение и точно установить причину существования (возникновения). В случае, когда механизм разрушения, ответственный за рост исходного дефекта до критических размеров, известен, исследователь может порекомендовать меры «остановки» роста дефекта или наметить направления по изменению конструкции детали.

На этой стадии основная задача заключается в поисках источника разрушения. Надо иметь в виду, что трещина часто оставляет серию «отметин» («зарубок») на поверхности разрушения, по которым можно судить об относительном направлении движения трещины. Например, было показано, что искривленные линии, называемые «шеvronными» следами, которые сливаются в области середины протяженности поверхности разрушения, указывают на направление, так сказать, «назад», где нужно искать начало образования трещины.

Считают, что в отдельных локализованных областях материала впереди магистральной трещины возникают вторичные трещины, которые растут назад, встречаясь с распространяющимся фронтом магистральной трещины. В результате образуется искривленная, ветвистая траектория разрушения. Единственное, что нужно сделать в этом случае, это проследить за «стрелкой», образованной шевронным узором. Когда трещина возникает в крупной детали, то она при движении иногда сильно разветвляется в нескольких направлениях. Хотя шевронные следы вдоль каждого «ответвления» будут указывать на различные на-

правления развития разрушения, тем не менее, важно помнить, что эти различные группы шевронных следов свидетельствуют об одном и том же: относительное направление разрушения – назад к исходной трещине. После обнаружения источника разрушения микроскопист сможет сосредоточить внимание на его микроморфологических особенностях и выявить причину разрушения. Однако в ряде случаев эти следы могут затеняться другими следами на поверхности разрушения, такими, как вторичные разрушения в анизотропных материалах.

Часто можно обнаружить «губы среза», представляющие области на поверхности разрушения, соответствующие реализации условий плосконапряженного состояния. Для некоторых материалов, таких, как высокопрочные алюминиевые сплавы и отдельные стали, есть эмпирические зависимости, связывающие размер зоны пластической деформации с величиной губ среза на поверхности разрушения, поскольку губы среза располагаются под углом $\pm 45^0$ к направлению толщины пластины. Указанные зависимости позволяют ориентировочно определить уровень напряжений.

Вполне допустимо, что трещина будет зарождаться по одному механизму, а ее распространение контролироваться другим или другими механизмами. Например, трещина может начинаться у металлургического (структурного) дефекта, распространяться на определенное расстояние как усталостная, а затем продолжать расти в результате совместного воздействия механизма распространения усталостной трещины и механизма, связанного с воздействием окружающей среды.

«Внезапное» развитие трещины может также происходить при существовании локальных остаточных напряжений. Принимая, что трещина расположена в области локальной концентрации напряжений, можно представить, что приложение средней по величине нагрузки приведет к повышению уровня интенсивности напряжений до величины локальной концентрации напряжений. Это обусловит нестабильный характер распространения трещины в детали. Однако при этом трещина быстро выйдет из области (зоны) высокой концентрации напряжений и остановится, оставив след на поверхности разрушения, так как сама по себе средняя нагрузка, без локальной концентрации напряжений, не обладает необходимой движущей силой для поддержания роста трещины.

Бывают случаи, когда поверхность разрушения является плоской, что указывает на отсутствие (на этой поверхности) процесса протекания определяемой доступными методами пластической деформации в ходе эксплуатации. Во многих случаях, особенно когда разрушение развивается в течение длительного времени, поверхность разрушения содержит линии, которые в литературе носят название «следов на раковине моллюска», линий остановки и/или «береговых отметок». Эти от-

метки (следы) связывали с различными периодами распространения трещины, такими, как один полет или одна серия маневров самолета или работа агрегата в течение заводской рабочей смены. Следует подчеркнуть, что эти полосы (бороздки) отражают периоды роста и не отражают отдельные циклически повторяющиеся воздействия нагрузки. Считают, что указанные участки роста трещины и участки, соответствующие периодам остановки, на поверхности разрушения окисляются и/или корродируют по-разному, обуславливая образование на поверхности разрушения концентрических колец или полуколец неоднородной окраски. Аналогичные полосы на поверхности разрушения были обнаружены в случае нагружения с различной амплитудой. В связи с тем, что эти «береговые отметки» (бороздки) часто искривлены с центром кривизны в начале распространения трещины, они служат в качестве указателя места начала разрушения. Иногда береговые отметки называют «речным узором», когда помимо растяжения имеется крутящий момент и для предотвращения скручивания плоскостей отрыва возникает новый набор ступенек отрыва, образующих одну большую ступеньку; такие трещины-притоки соединяются в направлении продвижения фронта трещины.

Большая часть разрушений в процессе эксплуатации деталей характеризуется единственным местом зарождения, обуславливающим полное разрушение. Размер этой «подросшей» усталостной трещины в момент окончательного разрушения (долома) прямо связан с уровнем приложенных напряжений и вязкостью разрушения материала.

4. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ И ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

После установления местоположения источника трещины дальнейший типичный анализ разрушения преследует две основные цели: установление микромеханизмов роста дефекта субкритических размеров и определение условий концентрации интенсивности напряжений, действовавших в вершине трещины в момент разрушения. Для определения траектории движения трещины относительно составляющих микроструктуры часто используют методы металлографии. Кроме того, и для определения путей развития разрушения на микроскопическом уровне (внутризеренное или межзеренное) часто полезным оказывается анализ металлографических шлифов. Размер и форма зерна несут в себе важную информацию относительно термомеханической предыстории детали. Например, крупнозернистая структура указывает на длительную высокую температуру нагрева, а вытянутая в одном направлении зеренная структура указывает не только на использование деформации в цик-

ле обработки материала, например, прокатки, штамповки или волочения, но и на направление деформации. Такая информация позволяет предвидеть существование анизотропии механических свойств, которые следует определять и учитывать в связи с преимущественным направлением приложения напряжений.

Изучение микроструктурных составляющих дает возможность исследователю проконтролировать правильность проведения термической обработки. Идентификация фаз в приграничной области позволяет, например, объяснить протекание межзеренного разрушения. Наконец, проводя подсчет частиц включений, можно определить относительную чистоту стали с металлографической точки зрения. Хотя невозможно выразить вязкость разрушения материала через некоторую меру содержания включений, тем не менее известно, что она уменьшается при увеличении содержания неметаллических включений. Вообще опытный металлограф по данным металлографического анализа может однозначно ответить на вопрос о качестве рассматриваемого металла.

Фрактография состоит в изучении поверхности разрушившейся детали, что позволяет установить место начала разрушения. Случай, когда имеется шевронный узор, наиболее информативный. В других случаях готовятся так называемые реплики с поверхности разрушения, т.е. отпечатки этих поверхностей на специальные пленки, которые затем просматриваются в электронном микроскопе и интерпретируются соответствующее изображение. Эта методика включает: сохранение поверхности разрушения, ее очистку, методы приготовления реплик и интерпретацию изображения. Подробности можно найти в монографии [4].

5. ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА РАЗРУШЕНИЯ ДЕТАЛИ

Используя понятия механики разрушения, данные анализа интенсивности напряжений в вершине трещины, изучения макроскопических и микроскопических особенностей поверхности разрушения, механические свойства материала, исследователь должен суметь обобщить эту информацию при решении конкретных задач. Для этой цели предлагается перечень, включающий геометрию детали, напряженное состояние, характеристику дефекта, данные фрактографического анализа, информацию о структуре, включая сведения об изготовлении детали и другую вспомогательную информацию. В то же время опыт показывает, что в большинстве случаев некоторые факты (приведшие к разрушению) установить никогда не удастся и для полного анализа следует применять научные догадки. Цель перечня – сведение к минимуму числа догадок и как можно в большей степени использование возможностей для проведения точного количественного анализа.

Перечень данных, необходимых для полного анализа разрушения

- I. Описание размера детали, формы и области исследования.
 - A. Установленные области концентрации расчетных напряжений.
 1. Величина концентрации напряжений в месте разрушения.
- II. Напряженное состояние для детали.
 - A. Тип напряжений.
 1. Величина уровней расчетного напряжения:
 - среднее напряжение,
 - интервал напряжений.
 2. Тип напряжений, их комбинация.
 3. Наличие градиента напряжения.
 - B. Напряженное состояние: плоскодеформированное или плосконапряженное.
 1. Внешний вид поверхности разрушения: процент губ среза.
 2. Величина, рассчитанная с использованием отношения размера зоны пластической деформации к толщине.
 - V. Характер изменений нагружения.
 1. Продолжительность в часах работы детали.
 2. Частота приложения циклов нагружения.
 3. Тип картины нагружения:
 - случайное нагружение.
 - существование перегрузок, связанных с ненормальными условиями эксплуатации детали.
- III. Данные, относящиеся к критическому дефекту.
 - A. Дата предыдущей проверки.
 1. Что было обнаружено при последней проверке.
 - B. Природа критического дефекта, приведшего к разрушению (использовать четко выполненные чертежи и/или макрофотографии с точным указанием увеличения).
 1. Местоположение критического дефекта по данным макроскопического анализа.
 2. Размер, форма и ориентировка в состоянии неустойчивости критического дефекта.
 3. Поверхностный или внутренний дефект.
 4. Направление распространения трещины, определенное по
 - шевронным следам,
 - скачкообразному распространению,
 - «береговым» отметкам.

В. Дефекты, внесенные при производстве и приведшие к зарождению трещины: царапины, подрезы, сварочные дефекты, плохая пригонка (сочленение) и др.

Г. Структурные дефекты, приведшие к зарождению трещины: включения, частицы второй фазы, шлаковые включения, поры и др.

Д. Данные фрактографического анализа.

1. Качественные наблюдения: чашечное разрушение, скол, межкристаллитное разрушение, усталостные бороздки, коррозия.

2. Количественные оценки:

- расстояние между бороздками на известной длине распространения трещины;
- данные по расстоянию между бороздками, свидетельствующие о равномерном или случайном нагружении;
- ширина зоны растяжений в момент начала нестабильного распространения трещины.

IV. Характеристики материала детали.

А. Обозначение сплава.

Б. Механические свойства: по сертификату /действительные: σ_u , σ_m , $\delta\%$, $\psi\%$, коэффициенты концентрации напряжений, характеристики усталости.

В. Химический состав сплава, по сертификату / действительный.

Г. Способ выплавки: на воздухе, в вакууме, другой.

Д. Деформация слитка: горячая, холодная, поперечная прокатка.

Е. Термомеханическая обработка.

1. Закалка или обработка на твердый раствор.
2. Старение или отпуск.
3. Промежуточная деформация.

Ж. Способ производства детали:

1. Получение: ковка, литье, обработка резанием, центробежное литье, другие.
2. Соединение: сварка, пайка, адгезионное соединение, болтовое, другие.
3. Поверхностная обработка: дробеструйная, холодная обкатка, цементация, азотирование, пламенная или индукционная закалка, гальванические покрытия, травление, другие.

И. Микроструктура детали.

1. Наличие волокнистости и / или полосчатости, связанных с сегрегацией химических элементов.
2. Размер и форма зерна:

– удлинение зерен по отношению к оси приложения нагрузки;

– изменение зеренной структуры по различным сечениям в штамповках.

3. Подсчет включений и их классификация.

В идеальном случае следует использовать несколько методов расчета, что позволяет осуществлять контроль правильности проведенных вычислений.

Л и т е р а т у р а

1. **Кишкин Б.П.** Конструкционная прочность материалов. – М.: МГУ, 1976.
2. **Михайлов-Михеев П.Б.** Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. – М.-Л., 1961.
3. **Екобори Т.** Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. – М., 1971.
4. **Херцберг Р.В.** Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. – М., 1989.
5. Конструкционные материалы: Справочник /Под общ. ред. д.т.н. Б.Н.Арзамасова. – М., 1990.
6. Разрушение. – Т.1: Микроскопические и макроскопические основы механики разрушения. – М., 1973.
7. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов: Справочное пособие. – Т.2: Методы исследования механических свойств металлов. – М., 1974.
8. **Работнов Ю.Н.** Механика деформируемого твердого тела. – М., 1979.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Типичные дефекты	3
А) Дефекты кристаллической структуры	3
Б) Дефекты детали	4
2. Общие сведения, необходимые для анализа причин разрушения	5
А) О явлении концентрации напряжений	5
Б) Коэффициенты концентрации напряжений	8
В) Образование микротрещин	11
Г) Образование макроскопических трещин	12
Д) Виды механического разрушения при различных формах напряженного состояния	12
Е) Условия перехода металлов из вязкого в хрупкое состояние .	17
3. Макроскопическое изучение поверхности разрушения	20
4. Металлографическое и фрактографическое исследования	22
5. Данные для анализа разрушения детали	23
Перечень данных, необходимых для полного анализа разрушения	24
Литература	26

Б.А.Рычков
(составитель)

КЛАССИФИКАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Часть 2

Классификация и анализ разрушения материалов
и элементов конструкций

Редактор В.К.Погорелова
Технический редактор Э.К.Гаврина
Корректор О.А.Матвеева
Компьютерная верстка Е.Г.Шевёлкина

Подписано к печати 4.10.2001. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Офсетная печать. Объем 1,75 п.л.
Тираж 50 экз. Заказ 126.

Издательство Кыргызско-Российского Славянского университета
720000, Бишкек, Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ
720000, Бишкек, Шопокова, 68