

Температурно-скоростная зависимость типа разрушения

© А.Д. Евстифеев, А.А. Груздков, Ю.В. Петров

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ad.evstifeev@gmail.com

(Поступило в Редакцию 25 сентября 2012 г.)

Предложен способ определения условий хрупковязкого перехода при разрушении твердых тел. Хрупковязкий переход рассмотрен как результат конкуренции различных механизмов разрушения. Предлагаемая модель справедлива в широком диапазоне изменения скорости деформации и температуры. В качестве примера для конкретных материалов произведен расчет области значений температуры и скорости деформации, в которых наиболее вероятно хрупкое разрушение.

Введение

Несмотря на то что понятие о подразделении разрушения твердых тел на хрупкое и вязкое имеет длительную историю, в настоящее время не существует общепринятого подхода к данной классификации. Традиционный подход берет за основу величину механической энергии, поглощенной до разрушения. Большая работа деформирования до разрушения соответствует вязкому разрушению, малая — хрупкому. Однако провести резкую грань удается лишь в некоторых случаях квазистатических испытаний. Поэтому разными авторами предлагаются различные характеристики для отнесения разрушения к хрупкому или вязкому, причем часто говорят о смешанном характере разрушения и даже о доле хрупкого и вязкого разрушения при разделении образца.

На атомном уровне хрупкое разрушение связывается с разрывом химических связей, в то время как вязкое — со смещением атомных слоев по плоскостям скольжения. Поэтому материалы с аморфной структурой (стекла, керамики), которые характеризуются случайным расположением атомов (и, следовательно, изотропными свойствами), обычно демонстрируют хрупкое разрушение. Твердые тела с кристаллической структурой характеризуются (на уровне отдельных кристаллов) отчетливо выраженной анизотропией, наличием плоскостей скольжения. Во многих случаях движение дислокаций оказывается энергетически более выгодным, чем разрыв связей по механизму хрупкого скола. Пластическая деформация снимает локальную концентрацию напряжений, что делает невозможным продвижение трещины и способствует вязкому типу разрушения.

Разделение материалов на хрупкие и пластичные является в значительной мере условным, поскольку одни и те же материалы в различных условиях нагружения способны демонстрировать разный характер разрушения. Факторы, влияющие на тип разрушения, подразделяют на внутренние и внешние. К первым относятся химический состав (для сталей — содержание углерода, добавок и примесей) и структура (размер зерна, тип кристаллической решетки). Из внешних факторов наиболее

важными являются скорость и температура. Важными факторами являются также особенности напряженно-деформированного состояния и размеры конструкции.

Под хрупковязким переходом (ХВП) понимают феномен резкого изменения целого комплекса свойств материала (пластичности, прочности, трещиностойкости, энергоемкости разрушения и др.), которое сопровождается радикальным изменением поверхности излома материала, происходящим в узком диапазоне изменения параметров нагружения. ХВП характерен для металлов с объемно-центрированной кристаллической решеткой (молибден, вольфрам, хром, конструкционные стали), интерметаллидов (TiAl, NiAl) и других сплавов. Металлы с решеткой гранцентрированного куба (аустенитные стали, медь, алюминий, никель) не склонны к охрупчиванию. Для чистых металлов и малоуглеродистых сталей характерно наличие резкого перехода от одного типа разрушения к другому. Для ряда материалов переходная зона оказывается довольно широкой, фиксируется постепенное изменение доли кристаллического и волокнистого изломов.

Явление охрупчивания металлов при понижении температуры называется хладноломкостью. Работы по экспериментальному определению температуры хладноломкости проводились еще в довоенные годы [1–3]. Было отмечено, что повышение скорости деформации приводит к смещению точки хладноломкости в область более высоких температур. В работе [3], например, была предложена эмпирическая формула

$$\ln \dot{\epsilon} = C - \frac{U}{kT}, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, C и U — константы материала. Однако ввиду отсутствия связи с другими характеристиками материала применимость этой зависимости ограничивается конкретной схемой испытаний, использованной в настоящей работе.

Отметим, что интерес к изучению ХВП обусловлен прежде всего катастрофическим характером хрупкого разрушения. С целью улучшения свойств материала при высоких температурах или увеличения статической

прочности (предела текучести) в материал вносятся легирующие добавки. Однако улучшение свойств материала в одном диапазоне характеристик внешнего воздействия может привести к радикальному ухудшению свойств в другом диапазоне, например к охрупчиванию при низких температурах или высоких скоростях нагружения. Поэтому новые материалы должны проходить комплексные испытания, на основании которых можно сделать вывод об их поведении в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия. Проведение программы подобных испытаний требует наличия адекватных математических моделей.

Конкуренция двух механизмов

Переход к хрупкому разрушению традиционно связывают с ухудшением пластических свойств материала, например, с возрастанием предела текучести, а сам ХВП рассматривают как результат конкуренции двух механизмов разрушения. Идею, что в первом приближении можно пренебречь взаимным влиянием двух процессов и рассматривать независимо друг от друга сопротивление хрупкому отрыву и пластическому сдвигу, называют гипотезой Людвика-Давиденко-Орвана. Впервые наиболее последовательно эта идея была реализована в знаменитой „схеме Иоффе“ [4], когда для кристаллов поваренной соли была построена температурная зависимость прочности и предела текучести, точка пересечения построенных диаграмм соответствовала температуре хладноломкости. Аналогичный подход применялся также и для скоростных зависимостей прочности и текучести.

Традиционно считается, что факторы, повышающие предел текучести (повышение скорости деформации, понижение температуры), способствуют охрупчиванию, и наоборот. Однако в последние годы появляются все новые экспериментальные данные, идущие вразрез с привычными представлениями.

Во многих работах показано, что в диапазоне сверхвысоких скоростей деформации пластические свойства могут улучшаться. Так, в работе [5] указывается, что при скорости изменения коэффициента интенсивности напряжений K_I в диапазоне до $10^7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}\text{s}^{-1}$ разрушение происходило хрупким образом, при более высоких скоростях к моменту страгивания трещины весь объем образца находился в пластическом состоянии. В [6] наблюдаемое улучшение пластических свойств объясняется тем, что при повышенных скоростях деформации происходит более равномерное вовлечение микрообъемов материала в процесс деформирования.

В ряде работ было показано, что в области сверхвысоких скоростей деформации повышение температуры испытаний может приводить к повышению предела текучести. „Аномальное“ поведение предела текучести было экспериментально обнаружено для чистого титана и монокристаллического алюминия [7,8]. Этот эффект

авторы объясняют тем, что в диапазоне сверхвысоких скоростей наиболее важным фактором оказывается вязкое сопротивление движению дислокаций („фоннное трение“) [9].

Таким образом, для моделирования хрупковязкого перехода требуются критерии текучести и разрушения, справедливые в широком диапазоне изменения параметров, которые учитывали бы, в том числе, и возможность „аномального“ поведения материалов.

Критерии, основанные на понятии инкубационного времени

Сформулированным выше условиям удовлетворяют критерии, основанные на понятии инкубационного времени, подробное описание которых можно найти в монографии [10].

В условиях медленного нагружения переход материала в пластическое состояние и разрушение хрупких тел происходят при достижении напряжением критического значения — предела текучести (σ_Y) или предела прочности (σ_C). Например, для одноосного растяжения критерий текучести может быть записан в виде

$$\sigma(t) < \sigma_Y, \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ — текущее значение напряжения. Переход в пластическое состояние происходит при нарушении условия (2). Если длительность внешнего воздействия становится соизмеримой с длительностью переходных процессов в структуре материала, критерии критического напряжения становятся неприменимы. Критерий текучести, справедливый как для быстрого, так и для медленного нагружения, имеет вид [11]

$$\frac{1}{\tau_Y} \int_{t-\tau_Y}^t \left(\frac{\sigma(s)}{\sigma_Y} \right)^{\alpha_Y} ds < 1, \quad (3)$$

где τ_Y — инкубационное время текучести, α_Y — безразмерный параметр, зависящий от температуры. Если приложенная нагрузка меняется достаточно медленно, критерий (3) переходит в условие (2).

Чтобы учесть влияние температуры, были предложены следующие температурные зависимости [12]:

$$\sigma_Y = \sigma_0 \exp\left(-\frac{T}{T_p}\right), \quad (4)$$

$$\tau_Y = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{kT}\right), \quad (5)$$

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)\right), \quad (6)$$

где T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, T_p , σ_0 , τ_0 , U , α_0 , W — постоянные материала. В работе [12] показано, что критерий (3) с

температурными зависимостями (4)–(6) применим для многих материалов в широком диапазоне изменения температуры и скорости деформации. В рамках единой модели удается описать и „нормальное“ температурное разупрочнение, и „аномальное“ возрастание предела текучести с ростом температуры [13].

Предложенный ранее критерий прочности [10] предлагается дополнить параметром α_f , аналогичным параметру α_γ :

$$\frac{1}{\tau_f} \int_{t-\tau_f}^t \left(\frac{\sigma(s)}{\sigma_c} \right)^{\alpha_f} ds < 1, \quad (7)$$

где τ_f — инкубационное время разрушения.

В работе [14] для зависимости инкубационного времени от разрушения была введена зависимость

$$\tau_f = \tau_{0f} \frac{U_c}{kT}, \quad (8)$$

где τ_{0f} , U_c — константы материала. Введем обозначение

$$C = \tau_{0f} \frac{U_c}{k}. \quad (9)$$

Для температурной зависимости статического предела прочности используем зависимость, аналогичную (4):

$$\sigma_c = \sigma_{0c} \exp\left(-\frac{T}{T_q}\right), \quad (10)$$

где T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, остальные величины — константы материала.

По предложенным моделям можно построить скоростные зависимости предела текучести и предела прочности для различных температур. Можно также при фиксированной скорости деформации построить температурные зависимости предела текучести и предела прочности. Точка пересечения диаграмм будет соответствовать критической скорости (или критической температуре), при которой происходит смена типа разрушения. Предел прочности и предел текучести можем представить как функции двух переменных — температуры и скорости деформации. Таким образом, при построении диаграмм прочности и пластичности мы получаем две поверхности. Как следствие, при пересечении этих поверхностей образуется кривая ХПВ в фазовой плоскости $T \leftrightarrow \dot{\epsilon}$.

Расчет температурно-скоростной зависимости для некоторых материалов

Определение параметров кривой ХВП по пересечению расчетных диаграмм требует знания характеристик прочности и пластичности для одного и того же материала. Данные, имеющиеся в доступной научной литературе, к сожалению, как правило, недостаточно полны для расчета параметров. Однако для некоторых материалов подробную оценку удалось провести.

Применим данный подход к анализу экспериментальных данных из работы [15]. Экспериментаторами испытывалась конструкционная ХНМ-сталь (chromium–nickel–molybdenum), доведенная с помощью различной термообработки до разных статических пределов прочности (сталь А-750 МПа). Исследовалась возможность данных материалов выдерживать ударные нагрузки. Максимальная скорость деформации достигала $5 \cdot 10^4$ 1/s, а интервал исследуемых температур 77–523 К. Статические испытания проводились на машине „Instron“.

На рис. 1 приведена зависимость точки хладноломкости, построенной по формулам (3), (7) с учетом значений параметров для материала из [15], указанных в таблице. По температурным (рис. 2) и скоростным

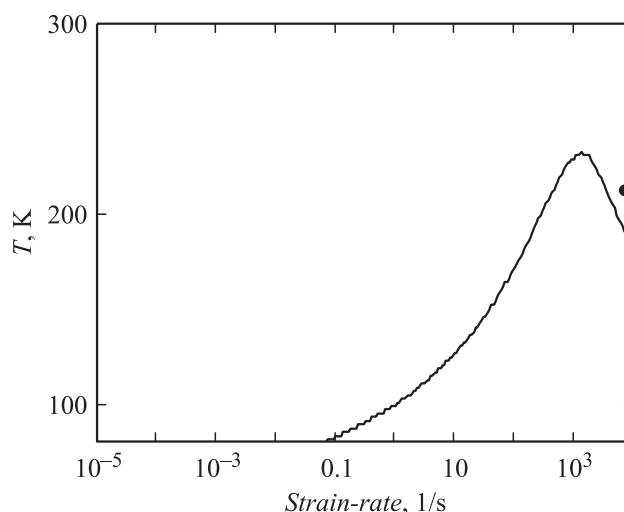


Рис. 1. Области значений температуры и скорости деформации, соответствующих хрупкому (снизу от кривой) и вязкому (сверху от кривой) разрушениям (сталь А). Кривая построена по формулам (3)–(10) с учетом значений параметров из таблицы.

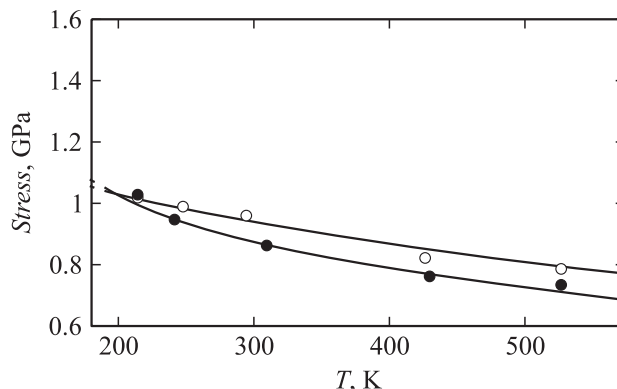


Рис. 2. Зависимости пределов прочности и текучести от температуры (сталь А) при скорости деформации $7 \cdot 10^3$ 1/s (точки — эксперимент, кривые построены по формулам (3)–(10) с учетом значений параметров из таблицы).

Параметры критериев (3)–(10)

| Источ- ник | σ_0 | T_p | $E\tau_{0y}$ | U/k | α_0 | W/k | σ_{0c} | C | U_c/k | T_q | α_f |
|---------------|------------|-------|-------------------|-------|------------|-------|---------------|-------------|---------|-------|------------|
| | GPa | K | Pa · s | K | — | K | GPa | MPa · s · K | K | K | — |
| [15] | 0.909 | 1000 | $6 \cdot 10^{-6}$ | 1050 | 14.46 | 1000 | 0.76 | 23 | 1050 | 1000 | 9 |
| [16] | 0.14 | 1862 | 10^{-6} | 4000 | 26 | 328 | 0.2 | 2 | 4000 | 1862 | 26 |
| [17] | 0.35 | 1862 | 10^{-7} | 1000 | 8 | 328 | 0.417 | 0.1 | 1000 | 1862 | 8 |

(рис. 3) зависимостям пределов прочности и текучести можно немного упростить модель и связать некоторые параметры из формул (3)–(10).

Данные по температурно-скоростной зависимости предела текучести мягкой стали, приводимые в работе [16], широко цитируются в литературе. Однако при этом мало внимания обращается на тот факт, что в ряде

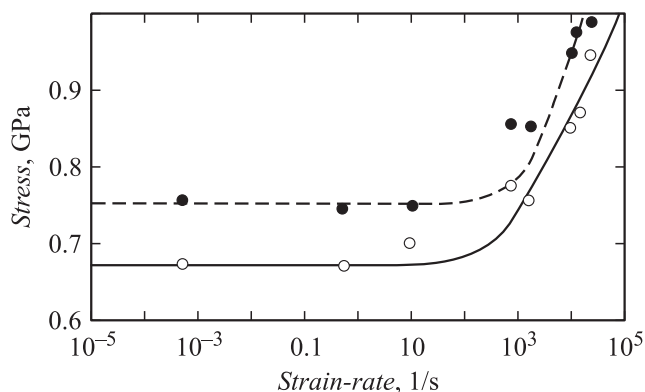


Рис. 3. Зависимость пределов прочности и текучести от скорости деформации (стали А) (точки — эксперимент [15], кривые построены по формулам (3)–(10) с учетом значений параметров из таблицы).

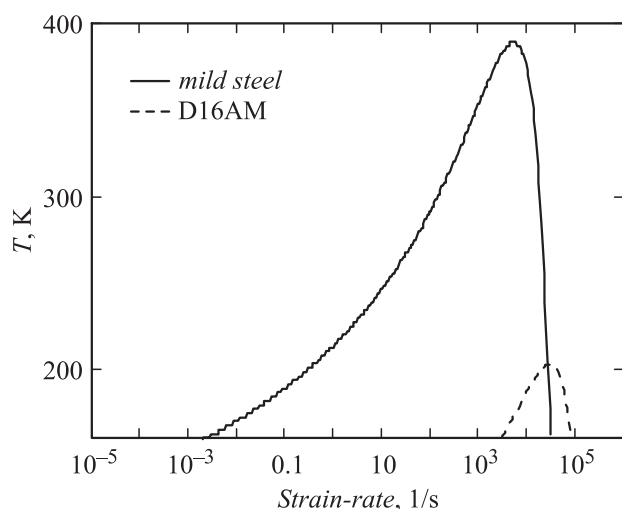


Рис. 4. Области значений температуры и скорости деформации, соответствующих хрупкому (снизу от кривой) и вязкому (сверху от кривой) разрушениям. Кривые построены по формулам (3)–(10) с учетом значений параметров из таблицы.

случаев данных по пределу текучести не удалось получить из-за хрупкого разрушения образцов. Параметры динамической текучести и прочности для мягкой стали по данным экспериментов [16] приведены в таблице.

Аналогичные расчеты были проделаны для алюминиевого сплава Д16АМ, данные испытаний по которому приводятся в работе [17]. Параметры динамической текучести и прочности сплава Д16АМ по данным экспериментов приведены в таблице. По формулам (3)–(10) и параметрам из таблицы были построены скоростные зависимости точки хладноломкости (рис. 4) для мягкой стали [16] и сплава Д16АМ [17].

Заключение

Анализ по определению типа разрушения был проведен в рамках ставшей общепризнанной трактовки ХВП как результата соревнования двух механизмов разрушения, хрупкого разрушения и макроскопической текучести. Для моделирования текучести и разрушения был применен подход, основанный на понятии „инкубационного времени“, с учетом температурных зависимостей параметров прочности и текучести. В результате точка хладноломкости и критическая скорость деформации были определены в рамках одной модели. В фазовой плоскости $T \leftrightarrow \dot{\epsilon}$ была построена кривая, разделяющая области, соответствующие хрупкому и вязкому разрушениям. Для ряда материалов удалось оценить значения параметров модели и произвести расчет области значений температуры и скорости деформации, в которых наиболее вероятно хрупкое разрушение. На расчетных диаграммах (рис. 1, 4) наглядно можем видеть, что тип разрушения зависит от скорости деформации и температуры. Заметим, что начальный участок диаграмм (рис. 1, 4) при умеренно высоких скоростях деформации соответствует достаточно быстрому росту „температуры хладноломкости“ с увеличением скорости деформации, что находится по крайней мере в качественном согласии с традиционными представлениями и простыми феноменологическими моделями, например уравнением (1). Однако в диапазоне сверхвысоких скоростей деформации предлагаемая в настоящей работе модель предсказывает „аномальное“ снижение температуры ХВП, что противоречит традиционным представлениям, но косвенно подтверждается рядом экспериментальных работ.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг., государственный контракт № П1104, а также грантов № 11-01-00491-а, № 10-08-00966-а, № 10-01-91154-ГФЕН_а.

Список литературы

- [1] Давиденков Н.Н. Динамические испытания материалов. М.–Л.: ОНТИ, 1936. 395 с.
- [2] Давиденков Н.Н. // ЖТФ. 1939, Т. 9. С. 1051–1062.
- [3] Витман Ф.Ф., Степанов В.А. // ЖТФ. Т. 9. Вып. 12. С. 1070–1085.
- [4] Иоффе А.Ф. Физика кристаллов. Л., Госиздат. 1929. 192 с.
- [5] Ващенко А.П., Маковой В.А. // Физико-химическая механика материалов (Львов). 1992. Т. 28. № 1. С. 14–18.
- [6] Степанов Г.В. Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев, 1991. 288 с.
- [7] Канель Г.И., Разоренов С.В. // ФТТ. 2001. Т. 43. Вып. 5. С. 839–845.
- [8] Канель Г.И., Разоренов С.В., Зарецкий Е.Б., Херрман Л., Майер Б. // ФТТ. 2003. Т. 45. Вып. 4. С. 625–629.
- [9] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 408 с.
- [10] V. Bratov, N. Morozov, Y. Petrov. Dynamic Strength of Continuum. St.-Petersburg: St.-Petersburg University Press, 2009.
- [11] Груздков А.А., Петров Ю.В., Смирнов В.И. // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 11. С. 1987–1989.
- [12] Gruzdkov A.A., Sitnikova E.V., Petrov Y.V., Morozov N.F. // Mathem. Mechan. Sol. 2009. Vol. 14. N 2. P. 72–87.
- [13] Петров Ю.В., Груздков А.А., Ситникова Е.В. // ДАН. 2007. Т. 417. № 4. С. 493–496.
- [14] Петров Ю.В., Ситникова Е.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 8. С. 71–74.
- [15] Ващенко А.П., Леонов В.П., Токарев В.М., Эглит А.С. // Проблемы прочности. 1991. № 9. С. 17–19.
- [16] Campbell J.D., Ferguson W.G. // The Philosophical Magazine. 1970. Vol. 21. P. 63.
- [17] Степанов Г.В. // Проблемы прочности. 1980. № 6. С. 37–38.