

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15/179; 539.4

Метод оценки вязкости разрушения материала по рассеянию характеристик твердости

А. А. Лебедев, Н. Р. Музыка, В. П. Швеи

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Установлена устойчивая корреляция между характеристиками вязкости разрушения материала и статистическими параметрами рассеяния значений его твердости.

Ключевые слова: вязкость разрушения, рассеяние характеристик твердости, коэффициент гомогенности, сложное напряженное состояние.

Введение. Современные тенденции развития механики разрушения материалов, как одного из направлений механики деформируемого твердого тела, характеризуются заметным снижением интереса к фундаментальным проблемам разрушения, связанным с развитием новых научно обоснованных идей как основы разработки достоверных алгоритмов оценки живучести конструкций.

Потеря несущей способности конструкций в большинстве случаев связана с разрушением ее ответственных элементов, в материале которых при эксплуатации формируются рассеянные повреждения. Их накопление и слияние приводит к образованию микро- и макротрещин, распространяющихся на все сечение, т.е. к полному разрушению – разделению деформируемого тела на части.

Кинетика этого постадийного процесса чрезвычайно сложна и неоднозначна. Построение достоверных моделей зарождения и развития рассеянных повреждений (первая стадия разрушения) из-за существенной нелинейности происходящих структурных трансформаций представляет большие трудности, что сдерживает разработку соответствующих алгоритмов расчета на основе кинетических теорий накопления повреждений.

Не менее сложные задачи приходится решать при моделировании второй стадии – стадии развития магистральной трещины. Здесь значительные успехи достигнуты в области совершенствования аппарата аналитических и численных методов решения краевых задач механики разрушения для плоских и трехмерных тел с трещинами. В то же время недостаточно уделено внимания развитию известных и разработке новых, более совершенных критериев трещиностойкости (вязкости разрушения) материалов, а также доступных способов определения их критических значений, которые используются в расчетах в качестве характеристик конструкционных материалов.

Имеющиеся стандартные методики (напр., [1]) являются трудоемкими и дорогими, поскольку необходимо соблюдать строгие требования стандарта к образцу с трещиной и в процессе испытаний измерять геометрию и размеры трещины с высокой точностью. Известны работы, в которых рассмотрены нестандартные методы, позволяющие приближенно оценивать вязкость разрушения материала по характеристикам его механических свойств [2, 3], хотя существует мнение, что предложенные корреляции неустойчивы и в большинстве случаев есть частными, пригодными для ограниченного класса материалов [4–7].

Обоснование метода. Возможности имеющихся корреляционных уравнений можно расширить, если ввести в них наиболее представительные параметры, характеризующие особенности структуры материала [8, 9]. К таким параметрам относится прежде всего степень неоднородности структуры, характеризующаяся наличием зернистости, химических флуктуаций, инородных включений, пор и других дефектов, которые особенно сильно проявляются в зонах интенсивного деформирования и служат причиной зарождения микротрещин, а также влияют на их развитие, т.е. контролируют процесс разрушения, определяют его параметры и характеристики [4, 10].

С другой стороны, с неоднородностью структуры материала связано рассеяние характеристик его механических свойств, особенно вязкости разрушения, которая зависит от параметров состояния материала в малых объемах возле вершины трещины, а именно: в местах, где относительные размеры дефектов по отношению к размерам указанных объемов достаточно велики.

Об определяющем влиянии размеров “зоны процесса”, а следовательно, и неоднородности структуры материала в ней на регистрируемые параметры трещиностойкости при испытаниях свидетельствуют результаты работы [10]. В последней показано, что если условия создания исходной трещины в образце не приводят к охрупчиванию материала в зоне повреждения, то разброс характеристик вязкости будет обусловлен только локальным разбросом свойств материала в этой зоне. Такой вывод согласуется с данными испытаний двух сталей, пластическая зона которых при однократном (статическом) нагружении приблизительно в четыре раза больше, чем после предварительного охрупчивания. Увеличение объема активно деформированного материала адекватно повышению его квазиоднородности, что является основной причиной снижения разброса свойств при одновременном росте регистрируемых значений вязкости разрушения. Это дает основание говорить о существовании устойчивой корреляционной связи между сопротивлением материала распространению трещины и параметрами структуры материала, контролирующими рассеяние физико-механических свойств и в первую очередь характеризующими степень его гомогенности в условиях, максимально имитирующих ситуацию в вершине растущей трещины.

Аналогичный случай имеет место при внедрении индентора в полупространство, в частности, при основных видах испытаний материала на твердость. При таких испытаниях в окрестности контакта возникают растягивающие напряжения, создающие условия для зарождения и развития радиальных, медианных (осевых) и боковых трещин [11]. Предпринятые попытки [11, 12] связать протяженность этих трещин у вершины отпечатка

при внедрении в материал пирамиды Виккерса непосредственно с вязкостью разрушения K_{1c} материалов не получили распространения, так как этот метод показал только качественную достоверность получаемых результатов на ограниченном классе хрупких материалов. Его реализация оказалась возможной только в лабораторных условиях.

В работе [13] вязкость разрушения определяли по микротвердости материала непосредственно в пластической области образцов COD, испытываемых на изгиб. Однако выполнение таких оценок для поликристаллических материалов носит весьма приближенный характер, поскольку микротвердость является локальной характеристикой материала.

Не оправдали себя также другие попытки установить корреляционную связь между твердостью, как свойством материала, и характеристиками вязкости разрушения, хотя условия нагружения материала в зоне контакта с индентором практически адекватны условиям при стандартных испытаниях на трещиностойкость: в околоконтактных областях действуют растягивающие напряжения, обеспечивающие условия нормального отрыва в осевых сечениях отпечатка [12]. По-видимому, регистрируемые при испытаниях характеристики зависят не только от сопротивления материала деформированию и развитию трещины, но и от степени диссипации энергии в связи с преодолением сил “сухого” трения в зоне контакта. Поскольку такие потери могут изменяться в зависимости от свойств контактируемых материалов, формы индентора, режима нагружения и других факторов, контролировать их в процессе нагружения практически невозможно.

Заметим, что определить твердость материала без учета влияния трения можно расчетным путем, используя процедуру численного моделирования процесса вдавливания индентора в упругопластическое пространство с заданными свойствами [14]. Это, казалось бы, должно повысить физическую достоверность корреляционной связи между полученными значениями “чистой” твердости (без влияния трения) и другими механическими характеристиками, в частности вязкостью разрушения.

Однако вязкость разрушения, как было показано выше, зависит главным образом от ситуации около вершины развивающейся трещины, характеризующейся размерами активно деформируемой зоны, свойствами и структурным состоянием материала. Эти факторы контролируют степень неоднородности материала в пределах рассматриваемой зоны и, как следствие, рассеяние характеристик вязкости разрушения. При испытаниях на твердость наблюдаются подобные деформационно-структурные трансформации материала в активной зоне, приводящие к рассеянию регистрируемых значений твердости [2, 11].

Трансформации происходят в результате деформирования материала индентором, внедрение которого осуществляется под действием приложенного к нему усилия без учета потерь, связанных с преодолением сил трения на контактирующих поверхностях. Определяемые при испытаниях значения твердости рассчитывают по усилию, фактически прикладываемому к индентору с учетом указанных потерь на трение.

Адекватность условий работы исследуемого материала, которые формируются перед развивающейся трещиной при испытаниях на твердость и

вязкость разрушения, обеспечивает получение сопоставимых уровней рассеяния, определяемых при указанных видах испытаний. Это дает основание предполагать наличие корреляции между трудно определяемыми экспериментально характеристиками вязкости разрушения материала и статистическими параметрами рассеяния значений твердости, легко устанавливаемыми по результатам сравнительно небольшого числа ее измерений в одинаковых условиях.

Экспериментальные результаты. Авторы не претендуют на строгую научную обоснованность представленных ниже выводов. Однако некоторая схематичность высказанных предположений в достаточной степени, по нашему мнению, компенсируется их физической непротиворечивостью и убедительно подтверждается результатами специально проведенных опытов.

Интересные результаты получены при исследованиях на оборудовании ЛБМ [15, 16] процессов накопления повреждений при плоском напряженном состоянии в условиях двухосного растяжения, в том числе по нелинейным траекториям деформирования. При испытаниях малоуглеродистых сталей показано, что абсолютное значение твердости слабо чувствительно к трансформациям структуры, которые происходят вследствие изменения вида деформированного состояния. В этом отношении более приемлемым, как и следовало ожидать, оказался метод ЛМ-твердости. Суть метода заключается в том, что в качестве информационных признаков состояния материала, т.е. степени его поврежденности, принимаются не абсолютные значения твердости, а параметры их рассеяния при массовых измерениях. Поэтому об изменении структурного состояния материала, а именно о его деградации в заданных условиях работы можно судить по степени рассеяния характеристик механических свойств. В качестве параметра рассеяния принят коэффициент гомогенности m Вейбулла, который рассчитывается по формуле Гумбеля. Применительно к испытаниям на твердость получим

$$m = 0,4343 d_n \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-1/2},$$

где параметр d_n определяют по количеству n изменений; H_i – значения твердости по результатам i -го измерения; $\overline{\lg H}$ – среднее значение логарифма твердости по результатам n измерений.

Полученные с использованием метода ЛМ-твердости данные показали, что при изменении условий деформирования от одноосного к двухосному с соотношением деформаций в плоскости листа $b = \varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 0,2 \dots 0,5$ коэффициент гомогенности Вейбулла имеет относительно большую величину (рис. 1). Это свидетельствует о меньшем уровне поврежденности металла в данном диапазоне. Ухудшение структуры в отношении повышения ее дефектности наблюдается при соотношениях деформаций $b = 0 \dots 0,2$ и $b = 0,5 \dots 1,0$. Аналогичные результаты получены также для сплавов АМг6 и АМцС. Поэтому к более стойким и лучшим в отношении условий работы тонкостенных конструкций следует отнести состояние материала с показателями двухосности деформирования в диапазоне $0,2 < b < 0,5$.

Отметим важный с научной и практической точек зрения факт корреляции между параметрами рассеяния значений твердости материала и характеристиками трещиностойкости. В этом легко убедиться, сопоставляя данные на рис. 1,а, на котором показана зависимость коэффициента трещиностойкости при страгивании трещины $K_{стр}$ от соотношения главных напряжений в условиях двухосного растяжения, с результатами на рис. 1,б. Как видно, зависимости $K_{стр} = f_1(\sigma_2/\sigma_1)$ и $m = f_2(\sigma_2/\sigma_1)$ с точностью до коэффициента совпадают, что свидетельствует о существовании зависимости $K_{1c} = f_3(m)$. Отметим, что коэффициент $K_{стр}$ широко используется при оценке несущей способности тонких пластин с трещиной в качестве параметра, характеризующего сопротивление материала распространению трещины:

$$K_{стр} = \sigma_{стр} \sqrt{\pi l_0} f_1 f_2,$$

где $\sigma_{стр}$ – напряжение, соответствующее моменту старта трещины; l_0 – длина трещины; f_1 и f_2 – множители, учитывающие соответственно влияние граничных условий на напряженное состояние в вершине трещины [16].

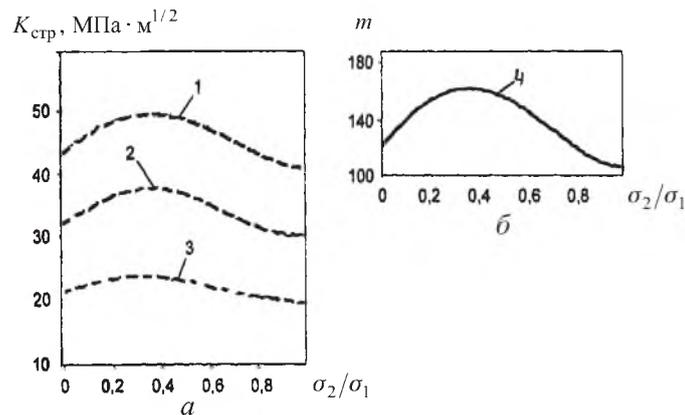


Рис. 1. Зависимость коэффициента трещиностойкости при страгивании трещины (а) и коэффициента гомогенности (б) от соотношения главных напряжений при двухосном растяжении: 1, 4 – малоуглеродистая сталь; 2 – сплав АМГ6; 3 – сплав АМЦС.

Коэффициент $K_{стр}$ имеет смысл коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} при расчете конструкций по критериям механики разрушения.

Для подтверждения отмеченной выше корреляции между характеристиками вязкости разрушения материала и статистическими параметрами рассеяния значений твердости были проведены специальные исследования.

Программа экспериментов включала испытание четырех реакторных сталей: 10ХМФТ, 15Х2МФА, 15Х2НМФА (в исходном состоянии и термообработанной по двум режимам), 08ХГНМТА, а также конструкционной стали 20. Характеристики вязкости разрушения определяли на компактных образцах ($B = 25$ мм) по стандартной методике [1]*. Технология изготов-

* Исследования по определению коэффициентов интенсивности напряжений реакторных сталей выполнены под руководством д-ра техн. наук, проф. В. В. Покровского.

ления образцов и методика проведения испытаний подробно описаны в нормативном документе [17]. Параметры рассеяния характеристик твердости реакторных сталей, разрушенных при испытаниях на вязкость разрушения, определяли методом LM-твердости [18] по результатам 30 измерений.

Измерение твердости по Роквеллу (шкала HRB) проводили портативным твердомером COMPUTEST SC производства фирмы ERNST (Швейцария), снабженного автоматической системой обработки опытных данных с выводом значений твердости на дисплей, что позволило исключить влияние на результаты измерений ошибок оператора. Индентор твердомера в виде конуса рассчитан на рабочую нагрузку 49 Н с предварительной нагрузкой 11,8 Н. Калибровка и сертификация прибора по официальным мерам твердости показала хорошую стабильность и высокую точность измерений при шероховатости поверхности подготовленного к испытаниям образца, соответствующей требованиям инструкции ($R_a = 1$ мкм).

Результаты испытаний приведены на рис. 2. Как видно, полученные по методу LM-твердости значения коэффициентов гомогенности m хорошо коррелируют с соответствующими значениями коэффициентов трещиностойкости K_{1c} . Имеющийся разброс данных можно считать вполне допустимым для такого рода испытаний.

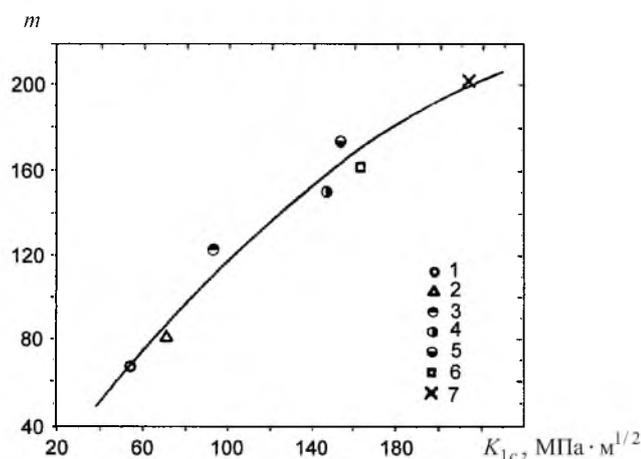


Рис. 2. Корреляция между коэффициентами гомогенности m и характеристиками трещиностойкости (коэффициент интенсивности напряжений) сталей: 1 – 10ХМФТ (охрупченная); 2 – 20; 3 – 15Х2НМФА (термообработка по режиму I); 4 – 15Х2НМФА (термообработка по режиму II); 5 – 15Х2НМФА (исходное состояние); 6 – 08ХГНМТА; 7 – 15Х2МФА.

Заключение. Полученные экспериментальные данные подтверждают высказанные выше соображения о подобии кинетики накопления повреждений в процессе развития разрушения материала при испытаниях на твердость и трещиностойкость (по крайней мере, стандартных компактных образцов), а также об адекватности соответствующих моделей структурных трансформаций в локальных зонах в вершине развивающейся трещины. Поэтому установленный факт корреляции между коэффициентами m и K не случаен, а вполне закономерен и может быть использован в качестве

доступного и дешевого экспресс-метода оценки трещиностойкости конструкционных материалов. Его новизна и полезность подтверждена патентом [19].

Резюме

Установлено стійку кореляцію між характеристиками в'язкості руйнування матеріалу та статистичними параметрами розсіяння значень його твердості.

1. *ГОСТ 25.506-85*. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 27.03.85.
2. *Романив О. Н., Ткач А. Н.* Микромеханическое моделирование вязкости разрушения металлов и сплавов // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1977. – **13**, № 5. – С. 5 – 22.
3. *Красовский А. Я., Вайниток В. А.* Критерий разрушения материалов, учитывающий вид напряженного состояния у вершины трещины // *Пробл. прочности*. – 1978. – № 5. – С. 64 – 69.
4. *Барон А. А.* Исследование связи трещиностойкости и деформации перед вершиной трещины // *Там же*. – 1997. – № 2. – С. 33 – 40.
5. *Иванова В. С., Кудряшов В. Г.* Метод определения вязкости разрушения (K_{1c}) по данным испытания образцов на усталость // *Там же*. – 1970. – № 3. – С. 17 – 19.
6. *Проходцева Л. В., Дроздовский Б. А., Полищук Т. В.* О характере излома при оценке вязкости разрушения в условиях плоской деформации // *Завод. лаб.* – 1974. – № 3. – С. 89 – 94.
7. *Холл В., Кихара Х., Зут В. и др.* Хрупкие разрушения сварных конструкций / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
8. *Олейник Н. В., Нго Ван Куэт.* Определение вязкости разрушения материалов по их механическим свойствам // *Пробл. прочности*. – 1976. – № 1. – С. 72 – 77.
9. *Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Ковчик С. Е.* Определение вязкости разрушения K_{1c} конструкционных материалов через их механические характеристики и параметр структуры // *Физ.-хим. механика материалов*. – 1977. – № 2. – С. 120 – 122.
10. *Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В., Подкользин В. Ю.* О природе разброса вязкости разрушения при статическом нагружении // *Пробл. прочности*. – 1990. – № 2. – С. 10 – 16.
11. *Колесников Ю. В., Морозов Е. М.* Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 224 с.
12. *Chiang S. S., Marshall D. B., and Evans A. G.* The response of solids to elastic/plastic indentation. 1. Stresses and residual stresses // *J. Appl. Phys.* – 1982. – **53**, No. 1. – P. 298 – 311.

13. *Mokka R., Kotilainen H., and Forstan J.* Hardness variations of the plastic zone area in bent COD specimens // *Scand. J. Metall.* – 1974. – 3, No. 1. – P. 38 – 40.
14. *Бакиров М. Б., Зайцев М. А., Фролов И. В.* Математическое моделирование процесса вдавливания сферы в упругопластическое полупространство // *Завод. лаб.* – 2001. – № 1. – С. 37 – 46.
15. *А.с. № 1805328 СССР, МКИ⁴ G01N 3/08.* Способ испытания материалов на двухосное растяжение и устройство для его осуществления / *А. А. Лебедев, А. В. Бойко, О. В. Загорняк, Н. Р. Музыка* // *Открытия. Изобретения.* – 1993. – № 12. – С. 3.
16. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р.* Методы испытаний и механика разрушения листовых материалов при двухосном растяжении. – Луцк: Надстырьє, 2004. – 214 с.
17. *РД 50-260-81.* Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. – М: Изд-во стандартов, 1982. – 56 с.
18. *Патент № 52107А, МПК 7 G01N 3/00, G01N 3/40.* Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “LM-метод твердості” / *А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек.* – Опубл. 16.12. 2002. Бюл. № 12.
19. *Патент № 13952, МПК 6 G01N 3/00, G01N 3/20.* Україна. Спосіб визначення в'язкості руйнування матеріалів / *А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, В. П. Швець.* – Опубл. 17.04. 2006. Бюл. № 4.

Поступила 17. 05. 2006