

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КРИТЕРИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ (J-ИНТЕГРАЛ)

Докт. техн. наук, проф. КОВАЛЕВСКИЙ В. Н., канд. техн. наук, доц. САГАРДА Е. В., инженеры ЖУК А. Е., СЕНЧЕНКО Г. М.

Белорусский национальный технический университет

Исследование процесса разрушения осуществляют на макро- и микроскопическом уровнях. В первом случае твердое тело рассматривают как непрерывный континуум с определенными свойствами (механика разрушения), что позволяет создать количественную оценку сопротивления разрушению. Во втором процесс разрушения рассматривается с использованием микроструктурного анализа, при котором можно учесть влияние зоны пластической деформации у вершины трещины, воздействующей на интенсивность выделения энергии. Для того чтобы определить влияние пластических деформаций на интенсивность выделения энергии, следует получить точное решение упругопластической задачи о поле напряжений у вершины трещины. Такое решение пока не получено. Для упругопластической механики разрушения разработан критерий, учитывающий пластическую деформацию у вершины трещины. Таким критерием является J -интеграл (интеграл Черепанова – Райса) [1].

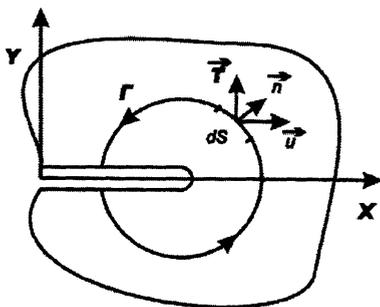


Рис. 1. К расчету J -интеграла

Математически J -интеграл представляет собой независимый от пути интегрирования криволинейный интеграл (рис. 1)

$$J = \int_r W dy - T \frac{\delta U}{\delta X} dS, \quad (1)$$

где r – произвольный замкнутый контур, содержащий трещину; \vec{T} – вектор напряжений, перпендикулярен к контуру r и направлен во внешнюю сторону, $\vec{T}_i = \sigma_{iy} n_y$; n_y – концентрация напряжений; U – перемещение в направлении оси x ; dS – элемент контура r ; W – удельная энергия деформации (энергия деформации единицы объема),

$$W = W(x, y) = W(\epsilon) = \int_0^\epsilon \sigma_{iy} d\epsilon_{iy}. \quad (2)$$

Для упругого случая J -интеграл можно вычислить, используя решение упругой задачи о поле напряжений:

$$J = r \int_{-\pi}^{\pi} W(r, \theta) \cos \theta - T(r, \theta) \frac{\delta U}{\delta X}(r, \theta) d\theta. \quad (3)$$

В этом случае J -интеграл эквивалентен интенсивности выделения упругой энергии $J = G$. Для критического значения J_{1c} -интеграла, при котором может начаться рост трещины, справедливо $J_{1c} = G_{1c}$.

Физическая интерпретация J -интеграла рассматривается как мера изменения потенциальной энергии тела с приростом длины трещины

$$J = -(\delta V / da) / B, \quad (4)$$

где V – потенциальная энергия тела; a – длина трещины; B – толщина образца.

Критическое значение J -интеграла в условиях плоской деформации рассматривают как J_{1c} , а в условиях плосконапряженного состояния – как J_c . В этом случае J_{1c} является нижней границей вязкости упругопластического материала.

Экспериментальное определение J -интеграла возможно с использованием методики испытаний на трех- или четырехточечный изгиб призматических образцов с тонким надрезом

или наведенной трещиной. Схема испытания образца с трещиной на трехточечный изгиб представлена на рис. 2.

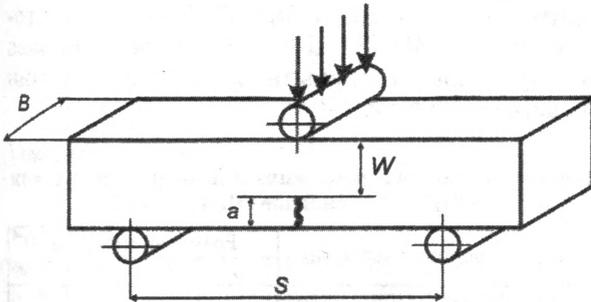


Рис. 2. Схема испытания образцов на трехточечный изгиб

Методика испытаний позволяет одновременно измерять нагрузку, величину прогиба образца (перемещение), длину трещины и время. В рабочее пространство испытательной машины встроена камера, обеспечивающая проведение высокотемпературных испытаний в вакууме, инертной или защитной атмосфере. Прогиб элементов машины в процессе испытаний составлял $0,02 \pm 0,005$ мкм/Н. Погрешность датчика нагрузки 0,1 Н. Нагрев образца осуществляли генератором тока высокой частоты мощностью 12 кВт и рабочей частотой напряжений 700 кГц. Для выравнивания температурного поля по длине индукционной катушки использовали сустептор (штука из $MoSi_2$ внутри индукционной катушки). Полированная поверхность образца освещалась ксеноновой лампой высокого давления. Изображение, полученное на микроскопе, передавалось на экран телевизора и фиксировалось на видеокамере. Прогиб образца фиксировали датчиком перемещений индукционного типа. Изменение длины трещины фиксировалось самописцем. Страгивание трещины соответствовало максимальной нагрузке. Общий вид установки представлен на рис. 3.

Для расчета параметра J -интеграла использовали зависимость [2]

$$J = \frac{f(a_0/H)}{B(H-a_0)}(U_1 - U_0), \quad (5)$$

где U_1 – энергия разрушения образца с трещиной, численно равна площади под кривой $P - \epsilon$ (энергия упругой и пластической деформаций); U_0 – погрешность, вносимая испытательной машиной за счет упругого последствия, определяется из результатов испытаний образцов без трещины.

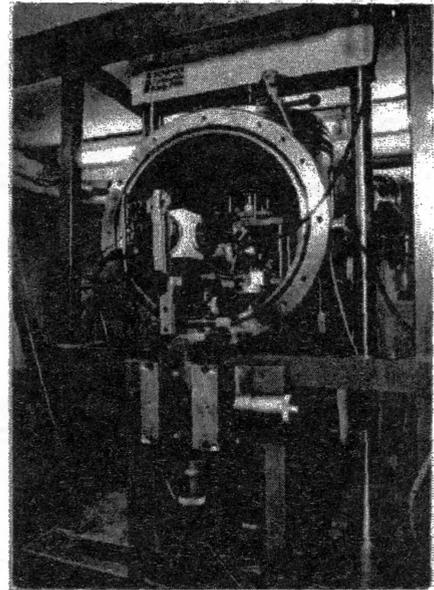


Рис. 3. Камера для испытаний образцов на трехточечный изгиб с нагревом в регулируемой атмосфере

Параметр J_{1c} определяется степенью реализации условий плоской деформации, которое возможно при соблюдении условия:

$$(W - a)/B \geq 25(J_{1c}/G_{1c}). \quad (6)$$

Функция $f(a_0/W)$ принимается равной двум, если $a_0/W \approx 0,2 \dots 0,6$. Вычисление площадей под диаграммой деформирования проводили с использованием численного интегрирования.

Численное моделирование процесса разрушения при упругопластической деформации образца с трещиной (расчет J -интеграла) осуществляли с использованием ХРР решения в области у вершины трещины:

$$\sigma_{iy} = \sigma_0 \left(\frac{J}{I_n \epsilon_0 \sigma_0 r} \right)^{\frac{1}{n+1}} f_{iy}(\theta); \quad (7)$$

$$\epsilon_{iy} = \epsilon_0 \left(\frac{J}{I_n \epsilon_0 \sigma_0 r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \Phi_{iy}(\theta); \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^n, \quad (9)$$

где $\sigma_0, \epsilon_0, I_n$ – константы материала; f_{iy}, Φ_{iy} – тригонометрические функции.

Численный расчет выполняли с применением комплекса CRACK, дополненного программой расчета температурных полей, возникающих при сварке и упрочнении взрывом с предварительным нагревом образцов (TEMP) и температурными зависимостями физико-меха-

нических свойств материалов. Основу программ составляет метод конечного элемента. Базовым элементом у вершины трещины принят квадратичный вырожденный элемент Барсоума, а остальные области представлены изопараметрическим четырехугольным квадратичным элементом.

Комплекс включал:

- построение конечно-элементной модели (AIDA);
- расчет температурных полей (TEMP);
- расчет упругопластических полей в теле с трещиной и критериев разрушения (NEPTUN);
- графическое представление результатов (COMPAS).

Размер элементов у вершины трещины принимали равным 1/25 длины трещины a . В области размером порядка длины трещины размеры элемента увеличивались в геометрической прогрессии. Отношение длины элемента к ширине принимали < 50 . Диаграмму растяжения (напряжение – деформация) аппроксимировали зависимостью

$$\sigma = \sigma_{0,2} + m\varepsilon_p^k, \quad (10)$$

где k – показатель упрочнения; m – коэффициент упрочнения материала.

В логарифмическом виде зависимость записывается

$$\ln(\sigma - \sigma_{0,2}) = \ln m + k \ln \varepsilon_p. \quad (11)$$

Расчет J -интеграла проводили для исследуемых материалов для случаев плосконапряженного состояния (на поверхности образца) и плоской деформации (в середине образца).

Экспериментальные измерения J -интеграла проводили при испытании призматических образцов с трещиной (тонким надрезом) на трехточечный изгиб при комнатных температурах и с нагревом до 350, 700 °С, численный расчет J -интеграла выполняли по приведенной методике для стали 38ХНЗМФА в состоянии улучшения и упрочнения при обжиге трубных заготовок взрывом при температуре 850 °С со степенью деформации $\varepsilon = 14\%$, для кобальтового сплава ЭП-131 – в состоянии нормализации, для молибденового сплава МТ – в состоянии рекристаллизации. Режимы упрочнения выбирались, исходя из условий деформации материалов при последующей сварке их взрывом для создания слоистого композиционного материала. Предусматривалась наружная схема плакирования, при которой метаемая трубная заготовка из стали 38ХНЗМФА подвергалась деформации с $\varepsilon = 14\%$. В качестве плакирующих заготовок использовали сплавы кобальта

ЭП-131 или молибдена МТ, которые в процессе сварки объемной пластической деформации не подвергались.

Результаты экспериментальных измерений J -интеграла для стали 38ХНЗМФА, кобальтового сплава ЭП-131 и молибденового сплава МТ при скорости испытания $v = 12$ мкм/мин представлены в табл. 1.

Таблица 1
Экспериментальные измерения J -интеграла для стали 38ХНЗМФА, сплавов ЭП-131 и МТ

Материал, условия испытания	Размеры, мм			$J \cdot 10^{-4}$ Н/м
	B	W	L	
ЭП-131, нормализация, испытания 23 °С	1,966	6,387	1,610	8,1
ЭП-131, нормализация, испытания 350 °С	1,676	6,728	2,170	10,7
ЭП-131, нормализация, испытания 700 °С	2,098	6,673	1,645	6,2
38НЗМФА, улучшение, испытания 23 °С	2,864	8,143	1,920	6,2
38НЗМФА, улучшение, испытания 350 °С	3,010	8,153	1,960	5,8
38НЗМФА, улучшение, испытания 700 °С	2,918	8,149	1,943	4,0
38НЗМФА, упрочнение, испытания 23 °С	2,800	6,828	1,790	5,3
38НЗМФА, упрочнение, испытания 350 °С	2,832	7,091	2,288	12,4
38НЗМФА, упрочнение, испытания 700 °С	2,817	6,923	2,155	4,9
МТ, рекристаллизация, испытания 23 °С	2,800	8,140	1,850	0,25
МТ, рекристаллизация, испытания 350 °С	2,930	7,191	2,302	5,3
МТ, рекристаллизация, испытания 700 °С	3,015	8,157	1,968	2,5

Сравнение экспериментальных и численных значений J -интеграла при различных температурах испытания (23, 350, 700 °С) для стали 38ХНЗМФА (улучшение или упрочнение взрывом при температуре 850 °С; $\varepsilon = 15\%$), сплавов кобальта ЭП-131 (нормализация) и молибдена МТ (рекристаллизация) показали, что экспериментальные значения занимают промежуточные положения между расчетными, выполненными для плосконапряженного состояния и плоской деформации.

В качестве примера приведены сравнительные данные расчета и эксперимента для стали 38ХНЗМФА после упрочнения взрывом при температуре 850 °С; $\varepsilon = 15\%$ (рис. 4). Пунктирной линией (2) показаны экспериментальные значения J -интеграла, сплошной линией (1) – значения J -интеграла для плоской деформации, штрихпунктирной (3) – для плосконапряженного состояния.

Отклонение от среднего расчетного значения от эксперимента составляет 5...10 % в запасе надежности.

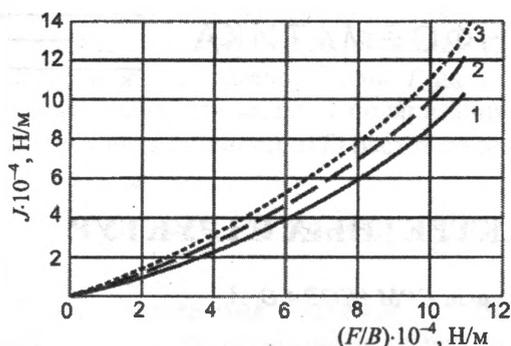


Рис. 4. Экспериментальные и численные значения J -интеграла: испытания при 850 °С, сталь 38ХНЗМФА (упрочнение)

Анализ результатов исследования показал, что из сплавов, подвергнутых термической обработке, наибольшей вязкостью разрушения обладает кобальтовый сплав ЭП-131. В зоне у вершины трещины в этом сплаве развивается интенсивная пластическая деформация (рис. 5а). Наибольших значений J -интеграл достигает при 350 °С, где сочетаются высокая пластичность и достаточно высокое значение предела текучести. С увеличением температуры испытания J -интеграл снижается, что связано с падением предела текучести кобальтового сплава.

Для стали 38ХНЗМФА высокие значения J -интеграла наблюдаются в материале после упрочнения высокоскоростной деформацией энергией взрыва при повышенных температурах. Характерной особенностью упрочнения при высоких температурах являются структурные изменения в стали. В зависимости от скорости охлаждения после упрочнения в стали образуются фрагментированные пластины мартенсита деформации и бейнита. Упрочняющие карбиды растворяются в матрице при нагреве и при охлаждении выпадают с более равномерным распределением в виде дисперсных частиц.

Сформированная высокоскоростной деформацией структура способствует повышению предела текучести стали в 1,8...2 раза с сохранением характеристик пластичности. Предел текучести стали 38ХНЗМФА достигает 1900 МПа. Повышается дефектность кристаллической решетки. Неравновесная структура приводит к возникновению значительных внутренних напряжений.

При испытании с нагревом (350 °С) происходит снижение внутренних напряжений и значения J -интеграла повышаются. Зона пластичности у вершины трещины для стали 38ХНЗМФА представлена на рис. 5б. Следует отметить, что на поверхности образца у вершины трещины (плосконапряженное состояние) образуется бугор деформации.

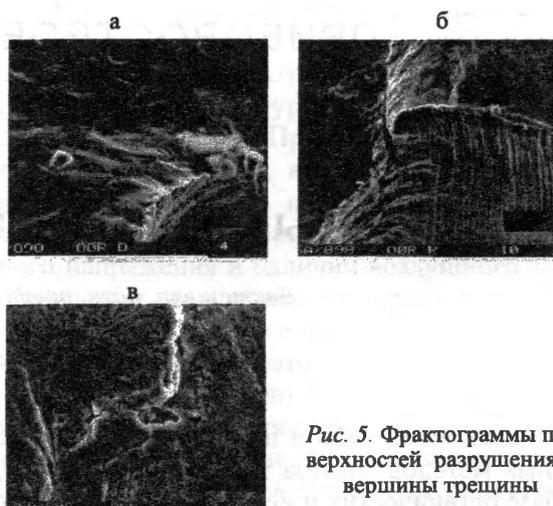


Рис. 5. Фрактограммы поверхностей разрушения у вершины трещины

Для молибденового сплава при комнатных температурах характерны высокая хрупкость и низкие значения J -интеграла. При температуре 350 °С J -интеграл повышается, так как эта температура выше температуры хрупко-вязкого перехода. Характер распространения трещины в сплаве МТ показан на рис. 5в.

ВЫВОД

Выполненные исследования позволили заключить, что, управляя структурой сталей и сплавов, их напряженным состоянием, строением и свойствами, можно добиться значительного повышения работоспособности материала в жестких условиях нагружения при наличии трещины. Параметр J -интеграл характеризует вязкость разрушения материала в условиях плосконапряженного состояния в том случае, когда воспользоваться коэффициентом вязкости разрушения K_{Ic} нельзя. Упрочнение взрывом при высокой температуре обработки позволяет получить не только высокую прочность стали 38ХНЗМФА, но и высокую вязкость разрушения. При этом снятие внутренних напряжений при нагреве до 350 °С дает возможность получить высокие значения J -интеграла. Полученные результаты позволяют разрабатывать слоистые композиционные материалы с высокой вязкостью разрушения [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Нотт Дж. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
2. Kromp K., Pabst R. F. Über die Ermittlung von J Integralwerten bei keramischen Werkstoffen im Hochtemperaturbereich. – Materialprüf. 22, 1980. – S. 241–246.
3. Ковалевский В. Н. Оценка работоспособности и разрушения слоистых материалов, полученных сваркой взрывом // Сварка и родственные технологии: Республ. межвед. сб. – Мн., 1999. – Вып. 2. – С. 50–53.