



It is offered to use the J-integral, which considers the plastic deformation at the crack tip, for layered materials based on high-strength steel Z8HN3MFA and erosion-resistant cobalt alloys EP131 or molybdenum alloy MT, which collapse under the laws of elastoplastic mechanics.

В. Н. КОВАЛЕВСКИЙ, Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ, Е. В. САГАРДА, И. В. ФОМИХИНА, БНТУ

УДК 621.762.669.71

ПОВЫШЕНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Состояние проблемы. Создание нового класса эрозионностойких слоистых материалов на основе высокопрочной стали 38ХН3МФА и сплавов молибдена МТ, хрома ВХ-2К, ниобия ЛН-1, кобальта ЭП 131, полученных металлургическим вакуумным переплавом и изготовленного литьем труб, возможно сваркой взрывом с нагревом выше T_x . Изделие работает в условиях эрозионного износа, механического истирания, усталостного разрушения, связанного с циклическим приложением нагрузки. Характеристики механических свойств не позволяют судить о структурном состоянии и свойствах локальных объемов и рассматривать слоистый материал как единое целое. Высокие температуры и давления требуют оценки прочности и твердости поверхностных слоев в диапазоне рабочих температур. Критерием оценки способности слоистого материала сопротивляться разрушению при возникновении на рабочей поверхности нарушений (микротрещин) не может быть признан существующий показатель σ_w – прочность соединения компонентов, так как он не позволяет оценить остаточную прочность материала с трещиной, работоспособность слоистого материала, обладающего различным уровнем пластичности от хрупких – молибдена и хрома до пластичных – кобальта и ниобия. Экспериментальные исследования эрозионного износа группы металлов при циклическом нагружении, выполненные по методике Гудцова–Лозинского (рис. 1), показали, что унос слоя металла при газовой эрозии аэродинамическими силами усиливается пластической деформацией и снижением прочности слоев при насыщении их газами [1]. Для изделий из стали 38ХН3МФА отмечается интенсивный диаметральный износ рабочего канала трубы (до 1,2 мм на диаметр 30 мм). Прочность поверхностных слоев

на микроуровне, дефектность структуры и тип решетки, прочность которой характеризуется коэффициентом жесткости различных металлов, определяют сопротивление износу.

Циклический характер нагружения требует определить влияние усталостной трещины на долговечность. Прогнозирование поведения высокопрочной стали 38ХН3МФА в трубных изделиях необходимо в зоне длиной 3–4 диаметра, где достигаются максимальные давления (340 МПа) и температуры (до 2000 °С) при скорости потока газа 400 м/с и времени 10 с. В этой зоне разогрев поверхностных слоев изделия достигает 750–800 °С, что требует для оценки работоспособности использовать критерий упругопластического разрушения материала с трещиной. Для оценки живучести слоистого материала, достоверности методов ее определения, разработки экспериментальной и теоретической модели требуется наличие соответствующего приборного оснащения и исследовательского оборудования. Воздействие высокоскоростной

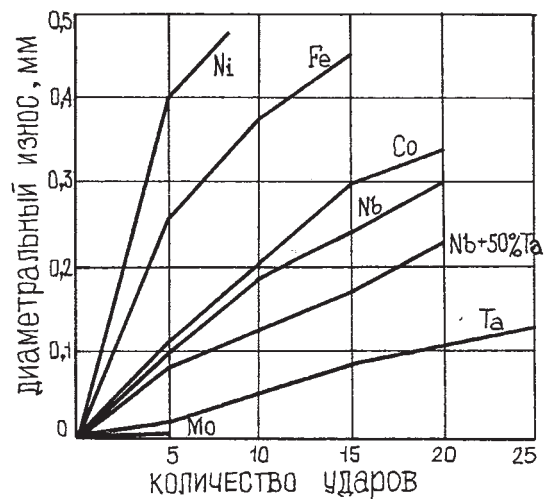


Рис. 1. Эрозионная стойкость металлических материалов

пластической деформации на материал трубы приводит к созданию в ней структуры, способной закрепить дислокации (ячеистыми формированиями, полигонами, дисперсными равномерно расположенными упрочняющими частицами), что затрудняет насыщение поверхности кислородом и повышает эрозионную стойкость металлов и сплавов. Ужесточение режимов эксплуатации потребовало плакирования стали тугоплавкими сплавами, эрозионная стойкость которых превышает сталь 38ХНЗМФА с хромированным слоем в 3–5 раз. Прогрессивным методом получения слоистого материала является сварка взрывом, при которой за счет высокоскоростной пластической деформации и температуры можно управлять структурой и свойствами стали и эрозионностойких сплавов молибдена МТ, кобальта ЭП131, ниобия ЛН-1, хрома ВХ-2К [2, 3]. Сравнительная оценка показателей эрозионной стойкости сплавов, используемых в качестве компонентов КМ, дана относительно стали 38ХНЗМФА (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительная оценка эрозионной стойкости сплавов

Сплав	Эрозионная стойкость	Физические свойства	Механические свойства	Технологичность производства
МТ (0,5Ti)	5	10	10	30
ВХ-2Х	4	25	5	25
ЛН-1	4	40	43	45
ЭП 131	3	50	35	36
38ХНЗМФА	1	60	40	50

Оценку физических и механических свойств осуществляли исходя из способности эрозионно-стойкого сплава выдерживать давление, температуру и скорость нагружения. Технологичность оценивали по возможности наладить производство и обработку слоистых материалов (профилирование рабочих поверхностей).

Важным показателем является оценка допустимой накапливаемой деформации, которая для стали 38ХНЗМФА составляет $\epsilon_{0,5}^P = 6,8\%$ при интенсивности накопления за цикл $< 13\%$. Изменение температуры в изделии сопровождается возникновением высоких термических напряжений, величина которых зависит от теплофизических и механических свойств материалов, структуры и анизотропии свойств. Интенсивность упрочнения стали с увеличением степени деформации снижается. При критических степенях деформации в структуре появляются трещины. Высокоскоростная объемная деформация в диапазоне $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения $850\text{ }^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением сопровождается образованием мартенсита деформации с фрагментированной поверхностью (повышением твердости), растворением и выделением дисперсных

упрочняющих карбидов, что обеспечивает высокую ударную вязкость ($1,2\text{ МДж/м}^2$) и пластичность ($\delta = 12\%$, $\psi = 36\%$). Создание мелкодисперсной структуры с равномерным распределением дисперсных упрочняющих частиц позволяет избежать концентраторов напряжений, скопление дислокаций, образование центров с ослабленной прочностью на микроуровне. Изменение прочностных характеристик стали и кобальтового сплава при нагреве показало, что упрочненные высокоскоростной деформацией материалы снижают при нагреве прочность различным образом (табл. 2).

Таблица 2. Прочность стали 38ХНЗМФА и сплава ЭП 131 после упрочнения

Обработка взрывом (ϵ , %; T , $^\circ\text{C}$)	σ_B , МПа, 38ХНЗМФА, испыт. $23\text{ }^\circ\text{C}$	σ_B , МПа, ЭП131, испыт. $23\text{ }^\circ\text{C}$	σ_B , МПа, 38ХНЗМФА, испыт. $650\text{ }^\circ\text{C}$	σ_B , МПа, ЭП131, испыт. $650\text{ }^\circ\text{C}$
0; 23	749	899	150	553
25; 23	774	849	150	861
50; 23	624	–	156	–
0; 400	774	–	175	–
25; 400	850	1349	150	474
50; 400	–	1398	–	1123
0; 850	1623	974	424	550
25; 850	–	1074	500	500
50; 850	1723	1099	–	225

Изменение степени деформации по сечению трубной заготовки, упрочнение от соударения с оправкой и от воздействия ВВ приводит к неравномерному распределению твердости по сечению и максимальной ее величине на внутренней поверхности. Упрочнение высокоскоростной деформацией при $850\text{ }^\circ\text{C}$ положительно сказывается на сопротивлении истиранию и эрозионной стойкости материалов. Для оценки сопротивления разрушению упрочненных высокоскоростной деформацией исследуемых материалов и слоистого КМ использовали энергетический критерий вязкости разрушения J -интеграл.

Критерий вязкости разрушения J -интеграл. Для упругопластической механики разрушения разработан критерий J -интеграл (интеграл Черепанова–Райса) [4, 5], учитывающий пластическую деформацию у вершины трещины. Экспериментальные исследования процесса разрушения слоистых материалов показали [6], что значения J -интеграла в слоистом КМ отличаются от величин компонентов материала. Эрозионностойкие тугоплавкие сплавы (Мо и Cr) разрушаются по механизму квазихрупкого разрушения по телу зерна. Сталь 38ХНЗМФА и сплав ЭП 131 разрушаются как вязкие материалы с развитой зоной пластической деформации, по дислокационному механизму, а биметаллы на основе стали и сплавов – с уча-

стием нескольких механизмов одновременно. Макро- и микроскопический уровень исследований процесса разрушения позволяет рассматривать его с позиции механики разрушения с количественной оценкой сопротивления разрушению по микроструктурному анализу с учетом влияния зоны пластической деформации у вершины трещины. Получить точное решение упругопластической задачи о поле напряжений у вершины трещины не представляется возможным, что вызвало необходимость приближенного расчета J -интеграла.

Приближенный расчет J -интеграла. В расчете используется независимый от пути интегрирования криволинейный интеграл J -интеграл (рис. 2). Математически J -интеграл описывается зависимостью, в которой энергия деформации контура уравнивается суммарным напряжением:

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

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

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

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 $J_{1c} = G_{1c}$.

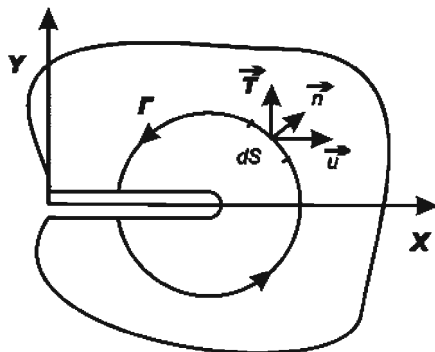


Рис. 2. Схема нагружения контура, опирающегося на берега трещины

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.

Для расчета параметра J -интеграла использовали зависимость [5]:

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

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

Параметр J_{1c} определяется степенью реализации условий плоской деформации, которые возможны при соблюдении неравенства:

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

Функция $f(a_o/W)$ принимается равной двум, если $a_o/W \approx 0,2-0,6$.

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 XPP решения в области у вершины трещины:

$$\sigma_{iy} = \sigma_o \left(\frac{J}{I_n \varepsilon_o \sigma_o r} \right)^{\frac{1}{n+1}} f_{iy}(\theta), \quad (7)$$

$$\varepsilon_{iy} = \varepsilon_o \left(\frac{J}{I_n \varepsilon_o \sigma_o r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \Phi_{iy}(\theta), \quad (8)$$

$$\sigma = \sigma_o \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} \right)^n, \quad (9)$$

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

Численный расчет выполняли с применением комплекса CRACK. Комплекс дополнен программой расчета температурных полей, возникающих при сварке и упрочнении взрывом с предварительным нагревом образцов (TEMP), и температурными зависимостями физико-механических свойств материалов. Основу программ составляет метод конечного элемента. Базовым элементом у вершины трещины принят квадратичный вырожденный

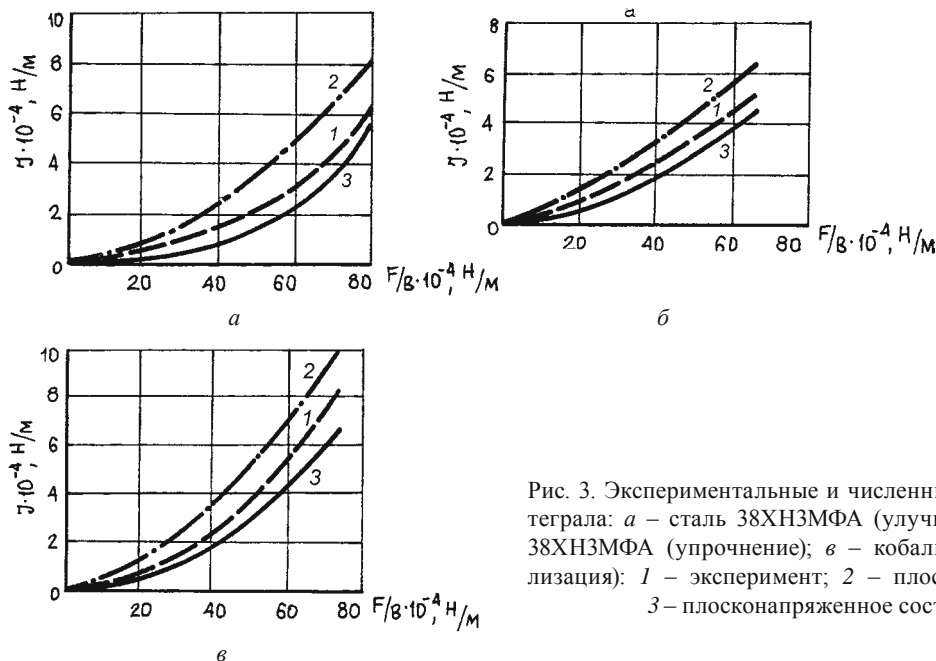


Рис. 3. Экспериментальные и численные значения J -интеграла: а – сталь 38ХНЗМФА (улучшение); б – сталь 38ХНЗМФА (упрочнение); в – кобальт ЭП131 (нормализация): 1 – эксперимент; 2 – плоская деформация; 3 – плосконапряженное состояние

элемент Барсоума, а остальные области представлены изопараметрическим четырехугольным квадратичным элементом.

Комплекс включал в себя 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:

$$\sigma = \sigma_{0,2} + m \varepsilon_p^\kappa \tag{10}$$

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

В логарифмическом виде зависимость записывается в виде:

$$\ln(\sigma - \sigma_{0,2}) = \ln m + \kappa \ln \varepsilon_p \tag{11}$$

Расчет J -интеграла проводили для исследуемых материалов для случая плосконапряженного состояния (на поверхности образца) и плоской деформации (в середине 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. Экспериментальные значения J -интеграла занимают промежуточные положения между расчетными (рис. 3), выполненные для стали 38ХНЗМФА и кобальтового сплава ЭП 131 [7].

Выводы

Высокопрочная сталь 38ХНЗМФА, плакированная взрывом эрозионностойкими сплавами кобальта, молибдена, ниобия и хрома, обеспечивает значительное (в 3–5 раз) повышение эрозионной стойкости, стойкости к истиранию и явлениям усталости. Высокоскоростная деформация при взрывной обработке с нагревом сопровождается структурными изменениями, которые ведут к образованию фрагментированных пластин мартенсита и бейнита, перераспределению упрочняющих карбидов. Это ведет к повышению прочностных характеристик материала (в 1,5–2,0 раза) без снижения ресурса пластичности. Упрочнение без нагрева приводит к росту прочности, но снижает пластичность, что сопровождается снижением значений J -интеграла. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по сопротивлению слоистых материалов разрушению, методика исследований и влияние структуры и свойств на значение J -интеграла будут приведены в следующем номере журнала.

Литература

1. Урванцев Л. А. Эрозия и защита металлов. М.: Машиностроение, 1966.
2. Ильященко А. Ф., Фомихина И. В., Ковалевский В. Н. Закономерности и механизм формирования структуры стали 38ХНЗМФА методами высокоскоростной пластической деформации и термообработки // Материаловедение. 2012. № 12. С. 20–31.

3. И л ь ю щ е н к о А. Ф., Ф о м и х и н а И. В., А л е к с е е в Ю. Г., К о в а л е в с к и й В. Н. Особенности и механизм формирования зоны соединения сталь 38ХНЗМФА – молибденовый, ниобиевый сплав ЭП 131 сваркой взрывом // Порошковая металлургия. 2012. № 1. С. 5–14.
4. Н о т т Д ж. Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978.
5. Р е й с Д ж. Г. Математические методы в механике разрушения // Разрушение. Т. 2. М.: Мир, 1975. С. 205–335.
6. К р о м п К., Р а b s t R. F. Über die Ermittlung von J Integralwerten bei keramischen Werkstoffen im Hochtemperaturbereich // Materialprüf. 1980. Bd. 22, S. 241–246.
7. К о в а л е в к и й В. Н. Оценка работоспособности и разрушения слоистых материалов, полученные сваркой взрывом. Сварка и родственные технологии // Респ. межвед. сб. Минск, 1999. Вып. 2. С. 50–53.