

УДК 539.55:620.1

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВОГО ЖЕЛЕЗА

А. В. Федотов

Пермский государственный технический университет, 614600 Пермь

В рамках структурно-феноменологического подхода дана постановка краевой задачи статической трещиностойкости структурно-неоднородных спеченных материалов. Предложен алгоритм численного моделирования механического поведения порошковых структурно-неоднородных материалов с трещинами. Проведена оценка трещиностойкости некоторых порошковых структурно-неоднородных материалов. С использованием фрактографического анализа дано обоснование выявленного аномального характера трещиностойкости спеченных материалов. Достоверность численного моделирования подтверждена результатами механических испытаний на статическую трещиностойкость.

Введение. Стремительное развитие научно-технического прогресса невозможно без успешного применения материалов, получаемых порошковой металлургией [1–4]. Порошковые материалы используются в конструкциях, работающих в широком диапазоне экстремальных нагрузок. В ряде случаев разрушение конструкции происходит при наличии и дальнейшем распространении в ней трещины [5, 6]. Для решения проблемы безопасности и работоспособности изделия при наличии в ней трещины необходимо знание характеристик вязкости разрушения используемого материала [7].

В ряде случаев провести оценку работоспособности конструкции не представляется возможным, поэтому становится актуальным проведение лабораторных опытов на образцах из материала конструкции. Ограниченный объем экспериментальных исследований статической трещиностойкости порошковых структурно-неоднородных материалов делает работу актуальной.

1. Экспериментальное исследование. В качестве объекта исследования выбраны спеченные порошковые материалы на основе железа. Уплотнение порошка железа (ОС.Ч.6-2) или многокомпонентной смеси (на основе порошка железа, углерода, хрома, никеля и молибдена) проводилось в закрытой пресс-форме при комнатной температуре, заготовки имели форму параллелепипеда с размерами $90 \times 16 \times 16$ мм. Спекание порошка производилось при температуре 1200°C в защитной атмосфере (водород) в течение 2 ч для железа и 4 ч для материалов ПК100Н4М и ЖГр1,5Х2Н. В зависимости от давления прессования остаточная пористость материалов составляла 0,4–26,5 % [8].

Образцы для испытаний получены из заготовок, имевших форму параллелепипеда, путем механической обработки. Предварительно образец подвергался нагружению по схеме консольного изгиба для получения усталостной трещины в кончике вершины V-образного надреза. В зависимости от приложенного усилия испытания образцов проводились на испытательной машине 2055Р-0,5, обеспечивающей максимальную нагрузку до 500 кг, либо на машине для статических испытаний Р-10 (максимальное усилие 10 000 кг). Результаты экспериментов представлены в виде диаграмм деформирования и используются при

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 99-01-00910).

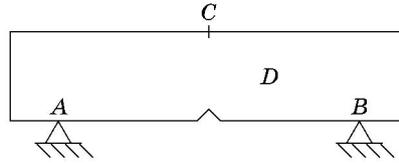


Рис. 1. Схема образца с надрезом

дальнейшем расчете статической трещиностойкости функциональных порошковых материалов.

Обработка результатов испытаний проводится с использованием моделей механики деформирования и разрушения макроизотропных структурно-неоднородных материалов и включает анализ напряженно-деформированного состояния на макроскопическом уровне образца из порошкового композита. Сформулируем линейную краевую задачу механики деформирования и разрушения образца с концентратором, который будем рассматривать как двумерную область D (рис. 1), ограниченную замкнутым контуром, конфигурация которого изменяется по мере роста трещины при нагружении. В области D справедливы уравнения

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad \varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2, \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl},$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; ε_{ij} — компоненты тензора деформаций; u_i — компоненты тензора перемещений; C_{ijkl} — компоненты тензора упругости. На границе области выполняются краевые условия

$$\sigma_{ij}n_j = 0, \quad u_i|_{A,B} = 0, \quad u_1|_C = 0, \quad u_2|_C = v, \quad (1.1)$$

где v — перемещение приложения нагрузки в точке C (прогиб); n_j — компоненты внешней нормали к поверхности. Первое условие в (1.1) выполняется всюду на границе области D , за исключением точек A, B, C .

Для численного решения задачи о равновесной трещине используется метод граничных элементов. При этом в результате аппроксимации получаем систему разрешающих уравнений вида

$$A\mathbf{g} = B\mathbf{G}, \quad (1.2)$$

где A, B — матрицы граничных коэффициентов влияния; \mathbf{g}, \mathbf{G} — глобальные векторы граничных перемещений и усилий, некоторые компоненты которых известны. Решение системы линейных алгебраических уравнений (1.2) позволяет определить неизвестные напряжения и смещения на поверхности тела, а следовательно, вычислить вектор сил в любой точке поверхности:

$$\mathbf{F}\mathbf{r}_i = \sigma_n S.$$

Здесь σ_n — нормальное напряжение на поверхности тела; S — площадь площадки, на которой действует напряжение σ_n .

Так как в начальный момент времени разрушение в теле отсутствует и длина трещины равна нулю, упругая энергия в теле по теореме Клапейрона может быть выражена через напряжения и перемещения на поверхности тела, часть которых определяются из граничных условий (1.1), а часть являются зависимыми величинами и определяются из решения системы (1.2):

$$W_0 = 0,5 \int (u_s \sigma_s + u_n \sigma_n) dS, \quad (1.3)$$

Материал	K_{Ic} , МПа · м ^{1/2}		
	Эксперимент	Расчет в предположении макрооднородности	Расчет в предположении неоднородности
ПК100Н4М	73,9–100,5	81,6–108,8	—
ЖГр1,5Х2Н	68,5–85,2	74,9–92,8	—
ОС.Ч.6-2	25,2–38,9	27,1–43,1	28,0–44,4

где u_s, u_n — касательные и нормальные перемещения на поверхности тела; σ_s, σ_n — касательные и нормальные напряжения на поверхности тела.

Для условий нагружения в эксперименте упругая энергия определяется как

$$W_i = 0,5 \int (u'_s \sigma'_s + u'_n \sigma'_n) dS, \tag{1.4}$$

где u'_s, u'_n — касательные и нормальные перемещения на поверхности тела; σ'_s, σ'_n — касательные и нормальные напряжения на поверхности тела.

Далее, используя известные соотношения механики разрушения, трещиностойкость материала можно определить через интенсивность освобождаемой энергии:

$$G = -dW/dl \approx \Delta W/\Delta l, \tag{1.5}$$

где $\Delta W = W_i - W_0$; $\Delta l = l_i - l_0$, и рассчитать коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_I = \sqrt{GE/(1 - \mu^2)}, \tag{1.6}$$

где E, μ — эффективные упругие постоянные порошкового материала.

Алгоритм численной обработки результатов эксперимента на компьютере описан в работе [9]. Экспериментальные значения вязкости разрушения спеченных материалов представлены в таблице.

2. Фрактографический анализ. На рис. 2 представлена зависимость трещиностойкости от пористости образцов из порошкового структурно-неоднородного материала ПК100Н4М, изготовленного по методике, описанной в п. 1. Видно, что зависимость имеет немонотонный характер, в отличие от монотонной зависимости прочности и упругости от пористости. Минимальное значение трещиностойкости исследуемых порошковых материалов ПК100Н4М, ЖГр1,5Х2Н, ОС.Ч.6-2 находится в интервале значений пористости 5–9 %. В общем виде зависимость, полученная из анализа экспериментальных данных, может быть записана в виде $\chi = \chi_0(1 - \Theta)^m$, где χ — какая-либо характеристика пористого материала; χ_0 — та же характеристика материала без пор; Θ — объемная доля пор;

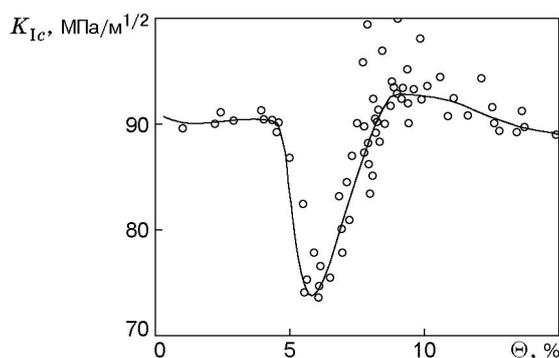


Рис. 2. Влияние пористости на трещиностойкость порошкового материала ПК100Н4М

m — коэффициент, принимающий различные значения для разных характеристик (например, для прочности $m = 3 \div 6$). Зависимость трещиностойкости пористых структурно-неоднородных материалов от объемной доли пор принимает следующий вид:

$$K_{Ic} = a(1 - \Theta)K_{Ic}^0 + b\Theta\sigma\sqrt{\xi},$$

где a, b — постоянные; K_{Ic}^0 — критический коэффициент интенсивности напряжений; σ — прочность материала без пор; ξ — средний диаметр пор.

Для изучения микроструктуры поверхности разрушения проведено фрактографическое исследование на базе сканирующего устройства типа SCANNEX IIc, дополненного компьютером, обеспечивающим автоматическую оцифровку и запись результатов. При проведении фрактографического анализа важным моментом является сохранение поверхности разрушения. Если поверхности разрушения подвергнутся механическому или химическому воздействию, то полноценный фрактографический анализ станет невозможен. Поэтому изучение поверхности разрушенных образцов проводилось непосредственно после эксперимента. Детальному фрактографическому анализу подвергались поверхности излома всех образцов, испытанных на трещиностойкость, в том числе образцы из порошковой стали марки ЖГр1,5Х2Н с пористостью 1,6–15,1 %, партия образцов из порошковой стали ПК100Н4М с пористостью 1,1–14,9 % и партия образцов из порошкового материала ОС.Ч.6-2 с пористостью 0,4–26,5 %.

На рис. 3 показана микроструктура поверхности разрушения излома образца из порошкового материала ОС.Ч.6-2 с пористостью $\Theta \approx 2$ %. В структуре всех испытанных порошковых материалов можно выделить несколько зон. Разрушение начинается от поверхности надреза и сначала распространяется под углом к оси образца (зона 1). Следует отметить, что в зависимости от пластичности материала размеры указанной зоны могут варьироваться. Наибольшие размеры характерны для материала ОС.Ч.6-2. Зона 2 расположена в плоскости, нормальной к оси образца, и представляет собой часть поверхности, образующуюся отрывом. Боковые скосы (зона 3), как и долом (зона 4), расположенные под углом 45° к оси образца, образуются в результате действия касательных напряжений.

Общим в микроструктурах образцов порошковых материалов ПК100Н4М, ЖГр1,5Х2Н и ОС.Ч.6-2, испытанных на трещиностойкость, независимо от их пористости является то, что разрушение происходит путем скола. Следует отметить, что поверхность разрушенных образцов имеет ямочную структуру. При этом доля участков поверхности разрушения с ямочным рельефом растет пропорционально увеличению пористости материала.

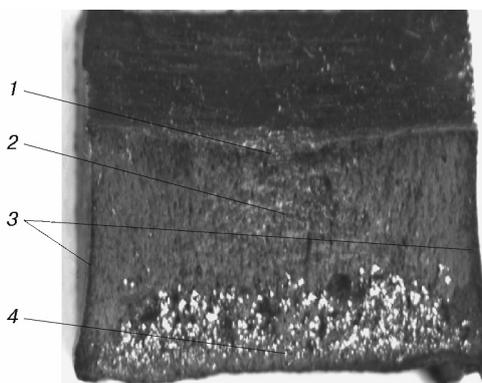


Рис. 3. Микроструктура поверхности разрушения образца из порошкового материала ОС.Ч.6-2 ($\Theta \approx 2$ %)

Некоторое различие имеется также в строении зон, показанных на рис. 3. В зонах 1, 3, 4 наблюдаются преимущественно параболические ямки, характерные для разрушения срезом, на поверхности боковых скосов (зона 3) — сильно вытянутые ямки. Здесь встречаются участки гладких расслоений, которые также являются типичными элементами микрорельефа при разрушении срезом. Для зоны 2 характерны как параболические ямки внецентренного отрыва, так и равноосные ямки нормального отрыва. Следует отметить, что с увеличением в образцах содержания углерода число участков квазискола увеличивается, а их энергоёмкость уменьшается, что заметно на части исследованных образцов из порошковых материалов ПК100Н4М и ЖГр1,5Х2Н. На этих же образцах отчетливо видны элементы межзеренного разрушения. Наблюдаемые на поверхности излома участки хрупкого межзеренного разрушения характерны для образцов с $\Theta = 5 \div 9$ %. Образцы с $\Theta < 5$ % подвергаются хрупкому разрушению по телу зерен (рис. 3), что обусловлено перераспределением примесей в порошковых материалах с различной пористостью. Примесным атомам энергетически выгодно располагаться на свободной поверхности пор. По мере уплотнения спекаемого материала и захлопывания пор они переходят в матрицу металла. Первоначально примесные атомы концентрируются на границах зерен. При этом увеличивается склонность материала к хрупкому разрушению по границам зерен. Поэтому на поверхности разрушения следует ожидать появления участков хрупкого межзеренного разрушения. Дальнейшее уплотнение материала приводит к более равномерному распределению примесных атомов в объеме зерен. В данном случае хрупкими становятся сами зерна, и разрушение материала имеет транскристаллитный характер, что соответствует результатам фрактографического анализа (рис. 3).

Из фрактографического анализа поверхностей разрушения спеченных порошковых образцов следует, что наличие плоских пор вызывает уменьшение их трещиностойкости. Однако это влияние незначительно, так как плоские поры в зависимости от технологии получения материала образуются не всегда.

3. Численное моделирование. При решении задач о распространении трещин в деформируемом теле важным является определение в нем напряженно-деформированного состояния. Для численного решения задачи используется программный пакет ANSYS. Задача решалась методом конечных элементов (использовались 6228 прямоугольных элементов и 7749 узлов). Фронт трещины окружался сингулярными элементами. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния в момент разрушения образца из материала ПК100Н4М с модулем упругости $E = 200$ ГПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,27$ и пористостью $\Theta = 9,4$ %. Геометрические параметры образца: длина 90 мм, высота 16 мм, толщина 16 мм, расстояние между точками опоры образца 75 мм, глубина V-образного выреза 4 мм. На основе полученных данных вычислена трещиностойкость порошкового материала по формулам (1.5)–(1.8). Результаты вычислений K_{Ic} порошковых материалов ОС.Ч.6-2, ЖГр1,5Х2Н и ПК100Н4М, полученные в предположении макрооднородности, приведены в таблице.

При исследовании напряженно-деформированного состояния в окрестности трещин среда считалась однородной. Уточнение и развитие теории разрушения связано с учетом структуры среды. В качестве объекта исследования выбран материал ОС.Ч.6-2. Приведем математическую формулировку задачи, состоящую из замкнутой системы уравнений

$$\sigma_{ij,j}(\mathbf{r}) = 0, \quad \sigma_{ij}(\mathbf{r}) = f_{ij}(a_{kl}(\mathbf{r}), \varepsilon_{kl}(\mathbf{r})), \quad \varepsilon_{ij}(\mathbf{r}) = [u_{i,j}(\mathbf{r}) + u_{j,i}(\mathbf{r})]/2 \quad (3.1)$$

и граничных условий

$$u_i(\mathbf{r})|_{\Gamma} = u_i^{(0)}(\mathbf{r}), \quad (3.2)$$

где $u_i^{(0)}(\mathbf{r})$ — вектор заданных смещений точек поверхности Γ .

Решение задачи сводится к нахождению поля напряжений $\sigma(\mathbf{r})$, которое должно удовлетворять краевой задаче (3.1) с заданными граничными условиями первого рода (3.2). Следует отметить, что граничные условия индивидуальны для каждого образца и определяются в процессе вычислений в предположении макрооднородности материала. При вычислениях использовался программный пакет ANSYS. Задача решалась методом конечных элементов (использовались 16 000 конечных элементов и 18 491 узел). Фронт трещины окружался сингулярными элементами. Проведен расчет нормальных и касательных напряжений в одном из образцов для материала с $E = 160$ ГПа, $\mu = 0,26$.

Исследуем зависимость между микроскопическими и макроскопическими полями напряжений для порошковых структурно-неоднородных материалов с использованием широко распространенного подхода, основанного на определении осредненных плавных составляющих структурных полей деформирования [10]. Для этого системе уравнений структурно-феноменологической модели ставится в соответствие система уравнений для осредненных напряжений, деформаций и перемещений, которые называют макроскопическими. На физическом уровне от структурных переменных деформирования к макроскопическим можно перейти, используя понятие элементарного макрообъема [11, 12].

На основе изложенного выше алгоритма проведен расчет макрохарактеристик материала, в частности поля макронапряжений, что позволило определить коэффициент K_{Ic} порошкового материала ОС.Ч.6-2 по формулам (1.5)–(1.8). В таблице приведены значения критического коэффициента интенсивности напряжений, полученные в результате проведенных расчетов. Значения K_{Ic} получены с учетом неоднородной структуры материала и поэтому являются наиболее точными.

4. Обсуждение результатов. Экспериментальные и расчетные значения K_{Ic} для порошковых материалов ОС.Ч.6-2, ЖГр1,5Х2Н и ПК100Н4М приведены в таблице. Из таблицы следует, что результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными разработанного экспериментально-расчетного метода. Максимальное различие значений K_{Ic} , полученных при решении задачи в плоской постановке и пространственной постановке для однородного тела, составляет не более 11,2 %. Сравнение результатов, полученных при решении трехмерной задачи с учетом неоднородности материала ОС.Ч.6-2, с результатами решения двумерной задачи показывает, что они удовлетворительно согласуются. Различие численных результатов не превышает 15,8 %. Очевидно, что на увеличение разброса результатов влияет учет структурной неоднородности материала. Однако для некоторых образцов различие результатов не превышало 2,6 %. Это можно объяснить низкой пористостью материала данных образцов (0,4–2,8 %). Максимальная погрешность определения коэффициента интенсивности напряжений материала при решении трехмерной задачи составляла 4,6 % для образцов с большой неоднородностью в виде пор. Таким образом, различие численных результатов при решении плоской и пространственной задач для структурно-неоднородного тела увеличивается с увеличением пористости материала.

Заключение. Предложенная в работе методика позволяет определять статическую трещиностойкость порошковых структурно-неоднородных материалов. Использование данной методики дает возможность на основе простых и быстровыполняемых опытов получить оценку K_{Ic} с удовлетворительной точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевский Р. А. Порошковое материаловедение. М.: Металлургия, 1991.
2. Акименко В. Б., Буланов В. Я., Рукин В. В. и др. Железные порошки. М.: Наука, 1982.
3. Степанчук А. Н., Билин И. И., Бойко П. А. Технология порошковой металлургии. Киев: Вища шк., 1989.

4. **Либенсон Г. А.** Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1987.
5. **Collins J. A.** Failure of materials in mechanical design. N.Y., etc.: John Wiley and Sons, 1981.
6. **Партон В. З.** Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990.
7. **Болотин В. В.** Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990.
8. **Соколкин Ю. В., Федотов А. В., Чекалкин А. А.** Экспериментальное определение критических значений коэффициента интенсивности напряжений порошкового материала ПК100Н4М // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. IX Межвуз. конф., Самара, 25–27 мая 1999 г. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 1999. С. 178–182.
9. **Соколкин Ю. В., Федотов А. В., Чекалкин А. А.** Экспериментально-расчетный метод исследования распространения трещин в порошковых структурно-неоднородных материалах // Вестн. Перм. гос. техн. ун-та. Механика композитов. 1999. № 1. С. 100–105.
10. **Нигматулин Р. И.** Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
11. **Композиционные материалы:** В 8 т. Т. 2. Механика композиционных материалов / Под ред. Дж. Сендечки. М.: Мир, 1978.
12. **Богачев И. Н., Вайнштейн А. А., Волков С. Д.** Введение в статистическое металловедение. М.: Металлургия, 1972.

*Поступила в редакцию 30/III 2001 г.,
в окончательном варианте — 9/VII 2001 г.*
