

УДК 539.3

МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ^{*)}

© 2012 г.

А.И. Садырин

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

as-rapid@mail.ru

Поступила в редакцию 26.09.2012

Рассмотрены формулировки компьютерных моделей накопления повреждений в традиционных конструкционных материалах (металлы, сплавы) и критерии разрушения материала при решении прикладных задач динамического деформирования. Сформулированы кинетические уравнения накопления повреждений и критерии разрушения для квазихрупких и пластичных материалов. Представлены схемы прогнозирования пространственной ориентации макроразрушения (компоненты нормали к площадке разрушения) и типа разрушения (отрыв, сдвиг).

Ключевые слова: пластичность, накопление повреждений, разрушение, хрупкий отрыв, вязкий отрыв, вязкое разрушение срезом.

Введение

Общепризнано, что состояние локального разрушения для традиционных конструкционных материалов (стальных, титановых, алюминиевых и других сплавов) является финальной стадией деформирования материала и определяется историей деформирования, физико-механическими характеристиками и структурой материала. Математические модели, описывающие возникновение и развитие рассеянных микроповреждений, и критерии образования макроразрушения в материале формулируются, как правило, в рамках механики поврежденной сплошной среды. Указанные модели позволяют локализовать в материале конструкции наиболее вероятные зоны наступления макроразрушений, не выходя при этом за пределы гипотез механики сплошной среды. Наступление макроразрушения приводит к образованию несплошностей (макротрещин) в конструктивном элементе. Однако некоторая начальная стадия деформирования элемента с возникшими в нем локальными макроразрушениями может быть описана в рамках механики сплошной среды при условии проведения локальных коррекций тензорных полей напряженно-деформированного состояния (НДС) материала в расчетных ячейках с макроразрушениями.

В статье описывается подход к формулировке моделей накопления повреждений и разработке алгоритмов их компьютерной реализации, ориентированных на

^{*)} Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №11-08-00545-а, 10-01-00585) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

анализ НДС и локализацию зон возможных разрушений в прикладных инженерных задачах. Предполагается, что для указанных приложений можно обойтись сравнительно простыми компьютерными моделями динамического деформирования и разрушения материала.

1. Моделирование накопления повреждений и динамического разрушения конструкционных материалов

При анализе процессов разрушения традиционных конструкционных материалов (стальных, титановых, алюминиевых и других сплавов) принято выделять класс пластичных материалов и класс квазихрупких материалов [1–12]. Экспериментально наблюдаемые различия в схемах разрушения квазихрупких и пластичных материалов довольно условны, и связывают их обычно с проявлением следующих эффектов. Квазихрупкие материалы разрушаются при одноосном сжатии, образцы же пластичных материалов при одноосном сжатии теряют устойчивость, не разрушаясь. Предельные пластические деформации при одноосном растяжении для квазихрупких материалов не превышают пределов 3–5%. Пластичные материалы по сравнению с квазихрупкими при разрушении менее чувствительны к надрезу.

Поскольку для квазихрупких материалов необратимые деформации малы, то наступление разрушения в них контролируется преимущественно параметрами напряженного состояния. Напротив, для пластичных материалов определяющая роль при накоплении повреждений и разрушении связывается с предельным уровнем накопленных пластических деформаций. Экспериментальные данные свидетельствуют, что на разрушение и квазихрупких, и пластичных материалов сильное влияние оказывает вид напряженного состояния и история его изменения. В качестве величин, характеризующих вид напряженного состояния, в моделях разрушения используются различные параметры. Наиболее употребительными являются жесткость напряженного состояния ψ_σ [4, 5, 11], угол фазы девиатора напряжений φ_σ [13] и параметры Лоде–Надаи $\mu_\sigma, \mu_\varepsilon$, определяемые следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \psi_\sigma &= \frac{3\sigma_0}{\sigma_i}, \quad \cos 3\varphi_\sigma = 13,5 \frac{D'_\sigma}{(\sigma_i)^3}, \\ \mu_\sigma &= \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad \mu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь σ_i, σ_0 – интенсивность девиатора напряжений и среднее напряжение соответственно; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные напряжения и главные деформации, а D'_σ – детерминант матрицы девиатора напряжений $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}$. В работе [10] в качестве характеристики вида напряженного состояния используется параметр ζ_σ , связанный с параметром ψ_σ следующей зависимостью:

$$\zeta_\sigma = \frac{\sqrt{3}\psi_\sigma}{\sqrt{2 + (\psi_\sigma)^2}}. \quad (2)$$

Далее рассматриваются формулировки двух- или трехконстантных так называемых механических теорий прочности [5] со скалярной мерой повреждения, ориентированные на использование в вычислительных комплексах при проведении прикладных исследований. При таком подходе к формулировке для оснащения моделей прочности материальными функциями и константами не требуется проведе-

ния специальных или высокотратных экспериментальных исследований, существенно отличающихся от «стандартных» [2–4] методов механических испытаний материала.

Краткий обзор формулировок механических теорий прочности содержится в монографиях [1–4, 9–11]. В справочнике [2] приведено более двух десятков моделей прочности, относящихся к классу механических теорий прочности, для начально изотропных конструкционных материалов при статических нагрузках. В качестве величин, характеризующих предельный уровень прочностного состояния, обычно используются некоторые локальные скалярные характеристики НДС (эквивалентные напряжения, эквивалентные деформации, эквивалентные энергии и т.п.). При сложных непропорциональных историях изменения НДС для вычисления меры повреждения формулируются кинетические уравнения, характеризующие скорость накопления повреждений в материале, зависящую от текущих параметров НДС и скорости деформирования. При этом накопленный уровень повреждений (мера повреждения) становится функционалом историй изменения НДС и скорости деформаций.

Учет зависимости разрушения от скорости деформаций

$$\dot{\epsilon}_i^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{mn}^p \dot{\epsilon}_{mn}^p},$$

где $\dot{\epsilon}_{mn}^p$ – тензор скорости пластических деформаций, обычно производится модификацией моделей разрушения, используемых для описания разрушения при статических нагрузках, путем введения так называемых «коэффициентов динамичности» K^d . Типичными примерами корректирующих множителей K^d являются зависимости, используемые в формулировках пластических потенциалов при динамических нагрузках:

$$\begin{aligned} K_1^d &= 1 + D \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0}; & K_2^d &= 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{C} \right)^{1/h}; \\ K_3^d &= (1 + Q \dot{\epsilon}_p); & K_4^d &= \exp(R_1 + R_2 \ln(\dot{\epsilon}_p)). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $D, \dot{\epsilon}_0, Q, C, h, R_1, R_2$ – константы материала, нахождение которых в нужном диапазоне скоростей деформаций сопряжено с проведением определенного набора нестандартных экспериментальных исследований.

Таким образом, общая схема формулировки компьютерных моделей накопления повреждений и критериев динамического разрушения, принятая в статье, сводится к последовательности следующих этапов:

- формулировка кинетических уравнений накопления повреждений для конструкционных материалов и разработка алгоритмов их интегрирования;
- формулировка критериев разрушения;
- разработка алгоритмических схем прогнозирования пространственной ориентации макроразрушения (компоненты нормали к площадке разрушения) и типа разрушения (отрыв, сдвиг) и схем локальной коррекции тензорных полей в соответствии с типами и ориентацией разрушения.

1.1. Кинетическая модель накопления повреждений и динамического разрушения квазихрупких конструкционных материалов. В работах [4, 5] детально проанализирован линейный критерий кратковременной прочности Писаренко –

Лебедева, полученный при использовании обоснованных физических представлений о прочности квазихрупких конструкционных материалов:

$$\chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_1 = \sigma_p, \quad (4)$$

где σ_i , σ_1 – интенсивность девиатора и наибольшее главное значение тензора напряжений σ_{ij} соответственно; $\chi \in [0, 1]$ и σ_p – константы материала (коэффициент пластичности и предел прочности материала при одноосном растяжении). Ориентировочные значения χ , рекомендованные в работах [2, 4], для ряда квазихрупких материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материалы	χ	Материалы	χ
Чугуны:		Баббиты	0,5–0,8
высокопрочные	0,2–0,3	Металлокерамика	0,1–0,4
ковкие	0,7–0,95	Термореактивные	
модифицированные	0,4–0,5	пластмассы	0,2–0,5
серые	0,2–0,4	Углеграфитовые	
Стали:		композиции, графиты	0,2–0,6
углеродистые	0,9–1,0	Стекло, ситаллы	0,07–0,2
инструментальные			
после термообработки	0,4–0,5		

В работе [5] проведен подробный анализ условия (4) и указаны ссылки на независимые литературные источники, подтверждающие высокие предсказательные качества критерия (4) по наступлению разрушения для широкого класса конструкционных материалов при квазистатических сложных видах НДС. Авторы работ [2, 4, 5] подчеркивают, что критерий (4) разрабатывался для описания предельных состояний именно квазихрупких материалов. Предельные значения параметра $\chi = 1$ и $\chi = 0$ в выражении (4) описывают прочность идеально пластичных и идеально хрупких материалов соответственно. В зависимости от вида НДС разрушение квазихрупких материалов может сопровождаться пластическим деформированием с соответствующей кинетикой накопления повреждений. Возможно также хрупкое разрушение материала при отсутствии макроскопических пластических деформаций. Заметим, что уравнение (4) часто используется [2, 5] в виде, явно включающем параметр жесткости напряженного состояния ψ_σ :

$$\chi\sigma_i + (1 - \chi)\sigma_1 A^{1-\psi_\sigma} = \sigma_p. \quad (5)$$

Переходя к формулировке кинетического уравнения накопления повреждений при упругопластическом деформировании материала, запишем выражение для максимального главного напряжения σ_1 через инвариантные характеристики вида текущего напряженного состояния:

$$\sigma_1 = \frac{1}{3}\sigma_i[2\cos\varphi_\sigma + \psi_\sigma]. \quad (6)$$

С учетом (6) условие (4) и скорость накопления повреждений \dot{q}_σ при упругопластическом деформировании представляются в виде:

$$\sigma_i[3\chi + 2(1 - \chi)\cos\varphi_\sigma + (1 - \chi)\psi_\sigma] = 3\sigma_p, \quad (7)$$

$$\dot{q}_\sigma = \begin{cases} \frac{\dot{\sigma}_i}{\sigma_i^* - \sigma_{T0}} & \text{при } \dot{e}_i^p > 0, \\ 0, & \text{при } \dot{e}_i^p = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $\dot{\sigma}_i$ и σ_{T0} – скорость роста интенсивности напряжений и начальный предел текучести материала соответственно, а величина $\sigma_i^*(\chi, \sigma_p, \psi_\sigma, \varphi_\sigma)$ характеризует интенсивность напряжений на поверхности разрушения как функцию констант материала χ , σ_p и параметров вида напряженного состояния, введенных в (4) в соответствии с равенством:

$$\sigma_i^*(\chi, \sigma_p, \psi_\sigma, \varphi_\sigma) = \frac{3\sigma_p}{3\chi + 2(1-\chi)\cos\varphi_\sigma + (1-\chi)\psi_\sigma}. \quad (9)$$

Очевидно, что при постоянных скоростях деформаций \dot{e}_i^p и простых (лучевых) путях упругопластического деформирования интеграл по времени от функции (8) до момента времени, соответствующего выходу интенсивности напряжения на поверхность разрушения, равен 1, поскольку параметры ψ_σ , φ_σ при таких историях нагружения фиксированы.

Для непропорциональных историй нагружения с промежуточными разгрузками и последующими нагрузками текущий уровень повреждений является функционалом истории изменения параметров ψ_σ , φ_σ и скорости деформаций. Поверхность разрушения (9) используется в этом случае как элемент схемы суммирования повреждений при интегрировании выражения (8). Зависимость скорости \dot{q}_σ от скорости пластических деформаций \dot{e}_i^p учитывается путем коррекции констант материала χ , σ_p экспериментально установленными корректирующими множителями K^d , представленными в (3).

Для интегрирования выражения (8) наиболее распространенными и часто используемыми являются алгоритмы линейного суммирования повреждений, в которых отсутствуют зависимости величины \dot{q}_σ от уровня накопленных повреждений q_σ (меры повреждений) и последовательности приращений повреждений.

Критерием локального разрушения материала в элементе конструкции является достижение мерой повреждения предельного значения $q_\sigma = q_\sigma^*$, соответствующего выполнению одного из двух условий:

$$\int_0^{t^*} \frac{\dot{\sigma}_i}{\sigma_i^* - \sigma_{T0}} dt = 1, \quad (10)$$

$$\sigma_i [3\chi + 2(1-\chi)\cos\varphi_\sigma + (1-\chi)\psi_\sigma] \geq 3\sigma_p.$$

Выполнение первого условия в (10) означает исчерпание способности материала упругопластически деформироваться (состояние предельной пластичности), а второе условие указывает на то, что текущая величина интенсивности напряжений достигает предельного значения в области упругого деформирования. Во втором случае предполагается, что разрушение материала происходит с большой скоростью, соизмеримой со скоростью распространения упругих волн сдвига.

1.2. Кинетическая модель накопления повреждений и динамического разрушения пластичных конструктивных материалов. Кинетика накопления повреждений при динамическом деформировании пластичных конструктивных материалов определяется преимущественно процессом накопления пластических де-

формаций. В работах [6–12, 14–16] подчеркивается, что на кинетику повреждений при упругопластическом деформировании существенное влияние оказывает вид напряженного состояния. Различные формулировки функций, описывающих влияние параметров вида напряженного состояния, представлены в работах [6–10, 12, 14–16]. Один из вариантов схемы рассуждений при определении предельной пластичности с использованием эмпирических функций влияния вида напряженного состояния, зависящих, например, от параметра ψ_σ из выражения (1), следующий.

Обозначим критическую (предельную, разрушающую) длину траектории пластического деформирования

$$e_i^p(\psi_\sigma) = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^p \dot{e}_{ij}^p} dt,$$

где \dot{e}_{ij}^p – тензор скорости пластических деформаций, при некотором виде напряженного состояния ψ_σ и лучевом пути нагружения через $e_i^{p*}(\psi_\sigma)$. Пусть предельная длина траектории при одноосном напряженном состоянии (растяжение стержня, $\psi_\sigma = 1$) есть \hat{e}_i^{p*} , т.е. $e_i^{p*}(1) = \hat{e}_i^{p*}$. Определение разрушающих значений пластических деформаций при произвольных величинах ψ_σ производится путем пересчета разрушающих деформаций при одноосном растяжении образца с помощью соответствующей функции влияния $f(\psi_\sigma)$, а именно:

$$e_i^{p*}(\psi_\sigma) = f(\psi_\sigma) \hat{e}_i^{p*}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что равным приращениям интенсивности пластических деформаций будут соответствовать разные величины приращений повреждения в зависимости от вида напряженного состояния при деформировании. Этот вывод справедлив также при сравнении скоростей пластических деформаций и соответствующих им скоростей накопления повреждений.

Выражение (11) позволяет сформулировать соотношения для определения приращений повреждения $\Delta q_e(\psi_\sigma)$ и функции скорости накопления повреждений $\dot{q}_e(\psi_\sigma)$ для пластичных конструкционных материалов, используя функцию влияния $f(\psi_\sigma)$:

$$\Delta q_e(\psi_\sigma) = \frac{\Delta e_i^p(\psi_\sigma)}{\hat{e}_i^{p*} f(\psi_\sigma)}, \quad (12)$$

$$\dot{q}_e(\psi_\sigma) = \frac{\dot{e}_i^p(\psi_\sigma)}{\hat{e}_i^{p*} f(\psi_\sigma)}. \quad (13)$$

В работах [6, 12] функцию влияния предлагается использовать в виде:

$$f_1(\psi_\sigma) = B^{(\psi_\sigma - 1)}. \quad (14)$$

Константа B в (14) полагается равной отношению предела прочности при одноосном растяжении $\hat{e}_i^{p*}(1)$ к пределу прочности при чистом сдвиге $\tilde{e}_i^{p*}(0)$:

$$B = \frac{\hat{e}_i^{p*}(1)}{\tilde{e}_i^{p*}(0)}.$$

Выражение (14) обеспечивает приемлемый уровень аппроксимации предельной пластичности в интервале $0 \leq \psi_\sigma \leq 1$. Для значений $\psi_\sigma \leq 0$, учитывая результаты исследований [8–10, 16], целесообразно использовать функции влияния вида

$$f_2(\psi_\sigma) = B^{(r\psi_\sigma - 1)}, \quad (15)$$

где константа $r \geq 1$.

В работах [8, 9] по аналогии с интенсивностью напряжений σ_i вводится эквивалентная величина поврежденного материала σ^* :

$$\sigma^* = \sigma_i \alpha,$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}(1 + \nu) + \frac{1}{3}(1 - 2\nu) \cdot (\psi_\sigma)^2},$$

ν – коэффициент Пуассона. Функция влияния, определяемая для значений $\psi_\sigma \geq 0$, представляется в этом случае так:

$$f_3 = f_3(\alpha, \nu, \hat{e}_i^{p*}). \quad (16)$$

Если известны пределы прочности материала при одноосном растяжении \hat{e}_i^{p*} и при чистом сдвиге \tilde{e}_i^{p*} , то величина α может быть записана в виде:

$$\alpha = \sqrt{B^2 + (1 - B^2)(\psi_\sigma)^2},$$

где $B = \hat{e}_i^{p*} / \tilde{e}_i^{p*}$. С учетом этого функция влияния (16) принимает вид:

$$f_4 = f_4(\alpha, \hat{e}_i^{p*}, \tilde{e}_i^{p*}). \quad (17)$$

При использовании параметра вида напряженного состояния ζ_σ выражения для α и соответствующей функции влияния могут быть представлены в виде:

$$\alpha = \sqrt{B^2 + (1 - B^2) \frac{3\psi_\sigma^2}{2 + (\psi_\sigma)^2}}, \quad (18)$$

$$f_5 = f_5(\zeta_\sigma, \alpha, \hat{e}_i^{p*}, \tilde{e}_i^{p*}).$$

Таким образом, использованием различных представлений для функций влияния из соотношений (14)–(18) в характерных поддиапазонах изменения параметра ψ_σ $\{\psi_\sigma < -1; -1 < \psi_\sigma < 0; 0 < \psi_\sigma < 1; 1 < \psi_\sigma < 2; 2 < \psi_\sigma\}$ можно добиться приемлемого согласия аппроксимации (13) с экспериментальными данными о разрушении пластичных материалов.

Для учета влияния скорости деформаций на накопление повреждений следует провести коррекцию пределов прочности на одноосное растяжение \hat{e}_i^{p*} и сдвиг \tilde{e}_i^{p*} в соотношениях (14), (15) и (17), (18) с помощью экспериментальных зависимостей коэффициента K^d от скорости деформаций \dot{e}_i^p . Критерием локального разрушения материала в элементе конструкции в этом случае является условие достижения текущим значением меры повреждения q_e предельной величины q_e^* :

$$q_e^* = \int_0^{t^*} \dot{q}_e dt = \int_0^{t^*} \frac{\dot{e}_i^p(\psi_\sigma)}{\hat{e}_i^{p*} f_n(\psi_\sigma)} dt = 1, \quad n \in \overline{1, 5}. \quad (19)$$

В выражениях (10) и (19) при интегрировании по времени скорости накопления повреждений полагаем, что параметры ψ_σ и ϕ_σ – функции текущего напряженного состояния, и, следовательно, подынтегральные выражения являются неявными функциями времени.

2. Схема прогнозирования пространственной ориентации и типа разрушения

Как было отмечено, состояние разрушения традиционных конструкционных материалов является финальной стадией деформирования материала, определяется историей деформирования, структурой и физико-механическими характеристиками материала. В классических работах [1, 3] указано, что макроразрушение конструкционных металлов и сплавов возможно по хрупкому типу (отрыв по площадкам с наибольшей компонентой нормального напряжения) и вязкому типу (на площадках с наибольшей сдвиговой компонентой напряжений). При деформировании сдвиговая упругопластическая деформация создает благоприятные условия для разрыхления материала и образования микротрещин, а на образование макротрещин определяющее влияние оказывают растягивающие нормальные напряжения [1, 3].

Выражения нормальных σ_n и касательных τ_n напряжений на произвольной площадке с компонентами единичной нормали n_1, n_2, n_3 для тензора напряжений σ_{ij} записываются в виде:

$$\sigma_n = \sigma_{ij}n_i n_j; \quad \tau_n = \sqrt{(\sigma_{1i}n_i)^2 + (\sigma_{2i}n_i)^2 + (\sigma_{3i}n_i)^2 - (\sigma_n)^2}. \quad (20)$$

Рассмотрим линейную комбинацию величин σ_n и τ_n :

$$d = \vartheta \tau_n + (1 - \vartheta) \sigma_n, \quad (21)$$

где $0 \leq \vartheta(\psi_\sigma, \varphi_\sigma, \zeta_\sigma) \leq 1$ – некоторый параметр, характеризующий свойства материала. Разрушение материала возникает в момент времени, когда меры повреждений из выражений (10) или (19) достигли критических величин q_σ^* или q_e^* соответственно. Можно предположить, что образование макротрещины произойдет на той площадке с нормалью n_1^*, n_2^*, n_3^* , на которой величина d достигает максимума $d_{\max} = \max_{n_i} (d)$.

Из (21) следует, что при $\vartheta = 0$ разрушение материала произойдет по хрупкому типу от действия наибольшего растягивающего напряжения σ_n , а при $\vartheta = 1$ произойдет вязкое разрушение от действия напряжений τ_n . При значениях $0 < \vartheta < 1$ компоненты нормали n_1^*, n_2^*, n_3^* будут зависеть от величины ϑ , определяемой параметрами $\psi_\sigma, \varphi_\sigma, \zeta_\sigma$. Таким образом, с использованием представления (21) возможно провести идентификацию основных типов разрушения [1, 3, 17] (хрупкий отрыв, вязкий отрыв и вязкое разрушение срезом) и найти компоненты нормали n_1^*, n_2^*, n_3^* площадки с разрушением.

Опуская детали анализа алгоритмов определения d_{\max} и компонент нормали n_1^*, n_2^*, n_3^* , отметим, что данные о пространственной ориентации макроразрушения и типе разрушения материала могут быть использованы в прикладных расчетах для локальной коррекции НДС в расчетной ячейке и (или) для анализа направления возможного роста образовавшейся макротрещины. В частности, если на площадке с нормалью n_1^*, n_2^*, n_3^* нормальная компонента вектора напряжений $\sigma_n > 0$, то на такой площадке обе компоненты вектора напряжений σ_n и τ_n полагаются равными нулю. При значениях $\sigma_n < 0$ корректировать следует только компоненту $\tau_n > 0$, исходя из условия скольжения с трением.

3. Результаты модельных расчетов деформирования и разрушения стержня Тейлора

Для иллюстрации процесса локализации возможных зон появления первых разрушений рассматривается динамическое деформирование и накопление повреждений в лабораторном образце в виде цилиндрического стержня диаметром 1,5 см и длиной 6,4 см, используемом в экспериментах теста Тейлора. Компьютерное моделирование осуществляется в рамках расчетного пакета программ «Рapid» для решения задач динамического деформирования в переменных Лагранжа в осесимметричной постановке [18]. Все параметры процесса деформирования образца в этом случае обладают осевой симметрией, но характеристики разрушения такой симметрией уже не обладают. По этой причине проведение анализа разрушений стержня в цилиндрической системе координат Z, R, θ (осевая, радиальная и окружная координаты соответственно) является условным.

Диаграмма деформирования материала стержня, близкого по механическим свойствам к отожженному сплаву АМгб, задается в виде: $\sigma_i = \sigma_{T0} + g e_i^p$. Механические характеристики сплава: плотность $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$; модуль объемного сжатия $K = 61,0 \text{ ГПа}$; модуль сдвига $G = 26,4 \text{ ГПа}$; предел текучести $\sigma_{T0} = 140 \text{ МПа}$; модуль упрочнения $g = 110 \text{ МПа}$; пределы прочности $\tilde{e}_i^{p*} = 0,4$, $\tilde{e}_i^{p*} = 0,45$. Скорость соударения стержня с жесткой преградой составляет 250 м/с. На фрагменте исходной расчетной сетки, примыкающей к плоскости удара, представленном на рис. 1а, маркерами (квадрат, круг) отмечены характерные зоны на ударяемой поверхности стержня: ячейка на оси вращения (квадрат – точка 1) и ячейка на боковой поверхности стержня (круг – точка 2).

Для модели накопления повреждений пластичного материала (13)–(19) на рис. 1б показаны истории роста во времени меры повреждения q_1 и q_2 в указанных ячейках и история изменения радиальной координаты R узловой точки из ячейки 2.

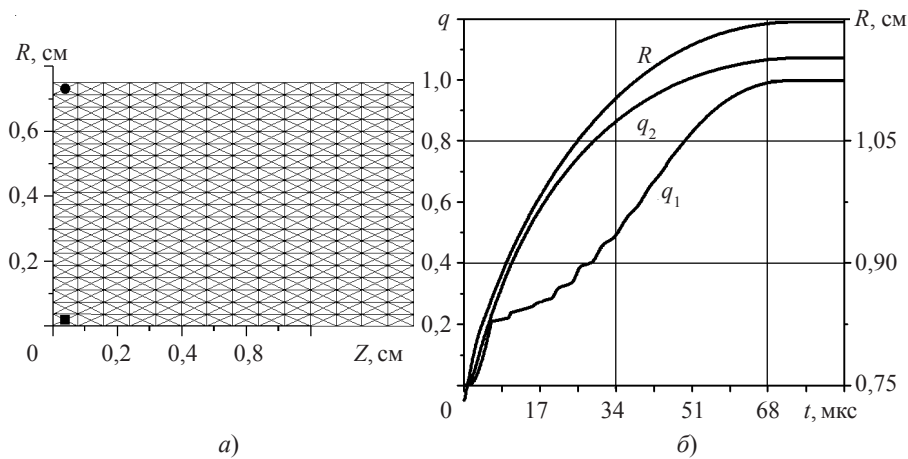


Рис. 1

Изменения зависимостей распределения поврежденности $q(Z)$ вдоль оси вращения стержня вблизи плоскости удара при $R = 0$ и поврежденности $q(R)$ вдоль радиуса стержня в плоскости удара при $Z = 0$ приведены на рис. 2а и 2б соответственно. Идентификация кривых распределения поврежденности на рисунках производится цифрами, указывающими время процесса соударения в микросекундах.

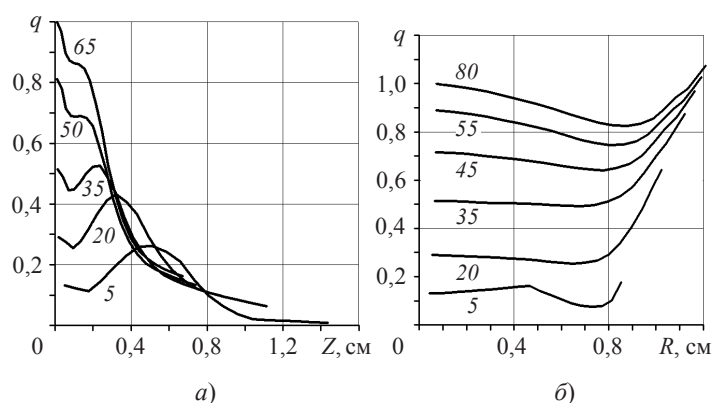


Рис. 2

Анализ НДС на финальных стадиях роста поврежденности показывает, что плоскость возможного разрушения в точке 1 ориентирована под углом примерно 45 градусов к оси вращения стержня (компоненты нормали к площадке: $n_1^* = \pm 1/\sqrt{2}$, $n_2^* = 1/\sqrt{2}$, $n_3^* = 0$). Отмеченное разрушение вполне соответствует начальной стадии разрушения при отделении фрагмента стержня, представленного на рис. 3а.

Плоскость возможного разрушения, соответствующая НДС в точке 2, – это плоскость, проходящая через ось вращения и образующую цилиндра, соответствует разрушению от растягивающих окружных напряжений (компоненты нормали $n_1^* = 0$, $n_2^* = 0$, $n_3^* = 1$). Подобные разрушения также наблюдаются в экспериментах с пластичными материалами (см. рис. 3б).

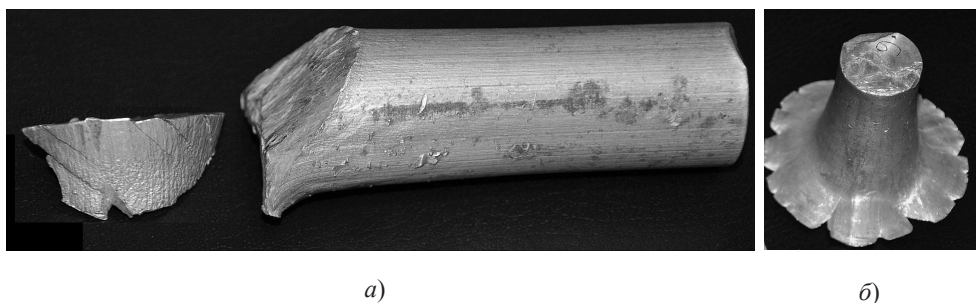


Рис. 3

Экспериментальные данные о разрушении образцов в тесте Тейлора, приведенные на рис. 3, любезно предоставлены автору профессором А.М. Браговым.

Заклучение

Предложенные компьютерные модели динамического разрушения пластичных и хрупких материалов позволяют в прикладных задачах достаточно достоверно проводить локализацию зон образования начальных макроразрушений в элементах конструкций, испытывающих интенсивные динамические воздействия.

Объем экспериментальных данных о физико-механических характеристиках материала, требующийся для оснащения моделей разрушения, минимален. Конс-

танты и материальные функции имеют четкий механический смысл и поддаются экспериментальному определению.

Предложенная схема прогнозирования пространственной ориентации макро-разрушения и его типа допускает определение компонент нормали n_1^* , n_2^* , n_3^* площадки с макроразрушением. В предположении, что решение прикладных задач производится в постановке с тремя независимыми пространственными переменными, возможно последующее проведение локальных коррекций тензорных полей в ячейках с макроразрушениями.

Список литературы

1. Давиденков Н.Н. Динамические испытания материалов. М.: ОНТИ, 1936. 396 с.
2. Механические свойства конструкционных материалов при сложном нагружении: Справочник / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Ф.Ф. Гигиняк, В.П. Ламашевский. Киев: Наукова думка, 1983. 366 с.
3. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. М.: Оборонгиз, 1952. 556 с.
4. Прочность материалов элементов конструкций в экстремальных условиях / Под ред. Г.С. Писаренко. Киев: Наукова думка, 1980. Т. 1. 536 с.; Т. 2. 771 с.
5. Лебедев А.А. Развитие теорий прочности в механике материалов // Проблемы прочности. 2010. №5. С. 127–146.
6. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75, №6. С. 52–59.
7. Кучер В.Н. Конкретизация параметров модели накопления рассеянных повреждений для описания деформирования стали // Проблемы прочности. 2010. №6. С. 146–160.
8. Леметр Ж. Континуальная теория повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1985. Т. 108, №1. С. 91–98.
9. Lemaitre J. Damage Mechanics. Paris: Rhe Bath Press, 1990. 556 p.
10. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций: Монография. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1999. 226 с.
11. Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках / Б.Л. Глушак, С.А. Новиков, А.И. Рузанов, А.И. Садырин. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1992. 193 с.
12. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Богданович А.З. Оценка предельных повреждений в материалах при статическом нагружении с учетом вида напряженного состояния // Проблемы прочности. 2002. №7. С. 35–40.
13. Новожилов В.В. О связи между напряжениями и деформациями в нелинейно-упругой среде // ПММ. 1951. Т. XV. Вып. 2. С. 183–194.
14. Chaboche J.L. Continuous damage mechanics – a tool to describe phenomena before crack initiation // Nuclear Engineering and Design. 1981. V. 64. P. 233–247.
15. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
16. Тиньгаев А.К. Уравнение предельной пластичности металла при сложном напряженном состоянии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68, №1. С. 37–42.
17. Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г. Методические основы исследований в механике разрушения // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68, №11. С. 84–88.
18. Садырин А.И. О вычислительной модели решения задач соударения деформируемых тел // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1984. С. 60–66.

DAMAGE ACCUMULATION MODELS AND FAILURE CRITERIA OF STRUCTURAL ELASTO-PLASTIC MATERIALS UNDER DYNAMIC LOADING

A.I. Sadyrin

A scheme for formulating computer models of damage accumulation in conventional structural materials (metals, alloys) and material failure criteria in analyzing applied problems of dynamic deformation is considered. Kinetic equations of damage accumulation and failure criteria for quasi-brittle and plastic materials are formulated. Schemes for predicting the spatial orientation of macro-failure (a component normal to the failure site) and the failure type (tear, shear) are presented.

Keywords: plasticity, damage accumulation, failure, brittle tear, ductile tear, ductile failure in shear.