

Применение вязкопластических моделей при моделировании деформирования материалов с высокой скоростью деформации

В. В. Харченко

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены некоторые особенности деформирования материалов при импульсном нагружении. Проанализированы применяемые в расчетах вязкопластические модели материалов и методики динамических испытаний, используемые для определения их параметров. Приведены примеры практических задач (проникание, сварка взрывом), при решении которых следует учитывать эффекты, связанные с высокими скоростями деформации.

Ключевые слова: деформирование, импульсное нагружение, скорость деформации, вязкопластические модели материалов, численное моделирование.

Для многих распространенных на практике процессов нестационарного нагружения элементов конструкций интенсивное пластическое деформирование материала происходит в локальной области с достаточно высокой скоростью деформации ($10^3 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$) [1, 2]. В качестве примеров можно привести проникание бойка в преграду, распространение трещин, технологические процессы сварки взрывом, обработки металлов резанием и давлением. В таких задачах характер изменения напряженно-деформированного состояния по пространству и во времени сложный, поэтому для его определения предпочтительно применение численных методов и вычислительных программ.

В подобных расчетах сопротивление материалов деформированию обычно описывалось упругопластическими моделями. В последнее время существенное влияние скорости деформации на сопротивление материалов деформированию общепризнанно, и при решении вышеуказанных задач во многих компьютерных программах учитывается их упруговязкопластическое поведение. Самый простой вариант учета влияния деформации, ее скорости, температуры состоит в корректировке предела текучести путем введения множителей, содержащих эти параметры. В подавляющем большинстве случаев деформационное упрочнение и термическое разупрочнение описываются степенной зависимостью, а влияние скорости деформации учитывается в виде логарифмической или степенной функции. Наиболее распространенная модель подобного рода – уравнение Джонсона–Кука [3]:

$$\sigma = \sigma_Y (1 + A \varepsilon^n) (1 + B \ln \varepsilon' / \varepsilon'_0) (1 - C T_*^m), \quad (1)$$

где σ_Y – предел текучести материала при статическом нагружении; T_* – гомологическая температура; $A, n, B, \varepsilon'_0, C, m$ – коэффициенты, учитывающие влияние деформации, скорости деформации и температуры.

Более сложный, но более корректный путь – применение дифференциальных физических уравнений Пэжины [4] либо аналогичных, учитывающих реологические эффекты в материале:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} &= \dot{s}_{ij} / 2G + \langle \Phi(F) \rangle s_{ij} / [J_2(D_\sigma)]^{1/2}; & \dot{\varepsilon}_{ij} &= \dot{\sigma}_{ij} / 3K; \\ \dot{\varepsilon}_{ij} &= \dot{\varepsilon}_{ij} + \dot{\varepsilon}_{ii} \delta_{ij}; & F &= ([J_2(D_\sigma)]^{1/2} - \tau_{st}) / \tau_Y, \end{aligned} \quad (2)$$

где G – модуль сдвига; K – модуль объемного сжатия; e_{ij} и s_{ij} – девиаторы; ε_{ij} и σ_{ij} – тензоры деформаций и напряжений соответственно; τ_Y – статический предел текучести при сдвиге; τ_{st} – статическое сопротивление сдвигу; $J_2(D_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений; $J_2 = s_{ij}s_{ij}/2$; δ_{ij} – символ Кронекера; $\Phi(F)$ – функция перенапряжения.

Следует заметить, что не все расчетные программы позволяют учесть влияние скорости деформации путем использования дифференциальных физических уравнений без существенной модификации программ, в частности это относится к эйлеровым кодам.

При использовании уравнений Пэжины важное значение имеет вид функции перенапряжения Φ , для описания которой обычно применяются достаточно простые линейные или степенные соотношения, хотя с их помощью можно описать реальное поведение материалов в достаточно узких диапазонах изменения скорости деформации. Более сложные вязкопластические модели, предложенные Армстронгом–Зерилли [5] и рядом других авторов, содержат значительное количество параметров. Ранее [6, 7] в результате анализа экспериментальных данных о высокоскоростном поведении материалов было также предложено несколько зависимостей, в частности

$$\Phi = [\mu_{\tau 0} / F + D / \text{sh}(F / K_\tau)]^{-1}. \quad (3)$$

Приведенное соотношение позволяет описать нелинейное интенсивное изменение сопротивления материала деформированию в широком интервале скоростей деформации ($10^{-3} \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$) при использовании минимального количества констант материала ($\mu_{\tau 0}$, D , K_τ).

Особое внимание следует уделять адекватности применяемых вязкопластических моделей материала их реальному поведению при высоких скоростях деформации (до 10^6 с^{-1}) и методам получения характеристик материалов при таких скоростях. Численное моделирование динамических испытаний различного вида (растяжение, сжатие, сдвиг, одноосное деформирование в плоских волнах) и анализ полученных результатов позволили уточнить границы применимости этих испытаний для получения достоверных характеристик материалов при высоких скоростях деформации (выше 10^3 с^{-1}) [2].

Некоторые известные методики (например, метод разрезного стержня Гопкинсона) не позволяют получать надежные экспериментальные данные по сопротивлению материалов деформированию при скоростях деформации

выше 10^4 с^{-1} и обычно используемых параметрах испытаний, другие, в частности метод Тейлора, требуют тщательного выбора таких параметров.

Анализ применимости метода Тейлора показал, что только существенное уменьшение (по сравнению с общепринятой) длины стержня-образца дает возможность четко выявить повышение сопротивления, обусловленное влиянием скорости деформации. В противном случае деформационное упрочнение и термическое разупрочнение вуалируют эффект скоростного упрочнения.

Путем численного моделирования установлено, что при использовании метода Тейлора значительное влияние на точность результатов и характер зависимости сопротивления деформированию от скорости нагружения оказывают применяемые методики обработки первичной экспериментальной информации. В [2] предложено соотношение для определения усредненного сопротивления деформированию, которое имеет преимущества перед большинством известных соотношений по точности и может быть сравнимо с формулами Джонса–Джиллиса, но гораздо проще последних.

Испытания материалов на высокоскоростное растяжение довольно сложны в методическом плане для реализации и обработки получаемой информации, особенно при высоких скоростях деформации (выше 10^3 с^{-1}), но крайне необходимы в связи с ограниченностью имеющихся экспериментальных данных, полученных при этом виде испытаний. Существующие предельные соотношения [1] накладывают довольно жесткие ограничения на размеры образца и динамометра либо на допустимую скорость деформации. Так, при обычно применяемых параметрах испытаний скорость деформации не должна превышать 10^3 с^{-1} .

Для более высоких скоростей достоверность получаемой информации должна быть всесторонне обоснована с применением численного моделирования. В частности, наибольшие расхождения между реальным состоянием материала образца и информацией, регистрируемой датчиком на динамометре, имеют место на начальном участке упругопластического деформирования. Скорость деформации на пределе текучести существенно ниже номинальной, и это различие возрастает с повышением скорости нагружения (до пяти раз при $V_0 = 40 \dots 200 \text{ м/с}$ в зависимости от методики обработки экспериментальных данных). Согласно принятым методикам испытаний и обработки их результатов, наиболее достоверные данные по сопротивлению деформированию могут быть получены в диапазоне умеренных деформаций (выше 0,1). Так, достоверные значения предела прочности можно получать до скоростей деформации $5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Разработанный в Институте проблем прочности НАН Украины [1] способ испытаний на ударное сжатие материала тонкого диска с прорезями объединяет достоинства стержня Гопкинсона и плосковолновых схем нагружения. Проведенное с использованием численного моделирования обоснование такой методики для получения данных по сопротивлению деформированию при скоростях деформации выше 10^5 с^{-1} показало, что:

однородное напряженно-деформированное состояние в образце имеет место до прихода волн разгрузки от боковых и тыльных поверхностей;

возмущение от деформируемых полосок диска-образца, распространяясь в подкладной плите, становится однородной плоской волной, пригодной для регистрации, на расстоянии одного-двух шагов решетки, т.е. задолго до тыльной поверхности плиты, где происходит регистрация информации;

расхождение между напряжением, полученным путем обработки зарегистрированной информации на тыльной стороне подкладной плиты, и осевым и эквивалентным напряжениями в образце не превышает 10 и 20% соответственно.

Таким образом, методика позволяет получать достоверные данные о сопротивлении материала деформированию при умеренных деформациях в диапазоне скоростей деформации $10^4 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Методика испытаний материалов на сжатие со сдвигом при соударении пластин под углом, предложенная Р. Клифтоном с соавторами [8], получила распространение при испытании материалов в диапазоне скоростей деформации $10^4 \dots 10^7 \text{ с}^{-1}$. Проведенная в результате численного моделирования оценка влияния трения на контактных поверхностях образца на получаемое при таких испытаниях изменение сопротивления в зависимости от скорости деформации показала, что полученные с использованием рассматриваемой методики результаты могут оказаться некорректными при определенных условиях. В частности, уровень сдвигового сопротивления материала образца, определяемый по регистрируемому сигналу, при моделировании не изменяется с ростом скорости удара при недостаточной величине коэффициента трения, несмотря на заложенную в расчеты модель с сильной чувствительностью сопротивления к скорости деформации. В связи с этим необходимы дальнейшие исследования для уточнения границ применимости этой методики и возможной погрешности результатов испытаний материалов на сжатие со сдвигом.

Испытания на одноосное деформирование материалов при плосковолновом нагружении образца, хотя и получили широкое распространение ввиду простоты их проведения, все же характеризуются значительной неоднородностью напряженно-деформированного состояния по объему образца вследствие распространения и взаимодействия упругих и вязкопластических волн. Поэтому для правильной интерпретации получаемых результатов следует хорошо знать и учитывать особенности процесса деформирования материала при таких испытаниях. Например, путем вычислительных экспериментов установлено, что затухание возмущения (волны) ступенчатой формы при распространении в материале, находящемся в пластическом состоянии, происходит по-разному из-за вязких эффектов, обусловленных линейной и логарифмической зависимостями сопротивления от скорости деформации. Поэтому следует учитывать, что размытие упругого предвестника волны разгрузки, четкость выделения двухволновой структуры упругой разгрузки на полном профиле плоской волны связаны с проявлением эффектов вязкости материала при взаимодействии прямых и отраженных от тыльных поверхностей пластин упругопластических волн. В связи с этим в результате оценки сдвиговой прочности материала по амплитуде упругой разгрузки на поверхности образца без учета вязких эффектов

может быть получена величина, составляющая 5...90% действительного значения, и сделаны ошибочные выводы об изменении прочностных характеристик при ударном нагружении.

При деформировании материала с высокими скоростями деформации ($10^3 \dots 10^6 \text{ с}^{-1}$) процесс в большинстве случаев можно считать адиабатическим. Следовательно, необходимо учитывать разогрев материала, а также возникающие вследствие этого дополнительные термические напряжения, что приводит не только к количественным, но и качественным изменениям получаемых результатов.

Поэтому наблюдаемое в ряде случаев при динамических испытаниях на растяжение со скоростями деформации выше 10^3 с^{-1} повышение пластичности обусловлено не столько влиянием скорости деформации, сколько существенным разогревом материала в процессе деформирования. Например, анализ результатов испытаний на высокоскоростное растяжение армко-железа, стали 45 и высокопрочных сталей, проведенный по данным [1, 9], показал, что при больших пластических деформациях, особенно в шейке растягиваемого образца, повышение температуры может составить 200...600°C.

При испытаниях образцов типа Шарпи на ударную вязкость интенсивное пластическое деформирование имеет место в локальной области у вершины надреза. Пластическая деформация перед иницированием трещины достигает высоких значений даже при низких температурах испытаний (порядка -100°C), а скорость пластической деформации по разным оценкам составляет $10^2 \dots 10^3 \text{ с}^{-1}$ при стандартной скорости нагружения 5 м/с. В этом случае деформирование в локальной области можно считать адиабатическим процессом, и разогрев материала, по нашим оценкам, составляет 100...300°C, что согласуется с известными литературными данными [10]. Такое повышение температуры приводит к возникновению дополнительных термических напряжений. В частности, для стали они составляют 200...1000 МПа и существенно снижают жесткость напряженного состояния у вершины надреза, что вызывает увеличение предельной пластичности и вязкости разрушения материала.

В еще большей степени подобное поведение материала наблюдается при движении трещин, когда разогрев в локальной области образца может достигать температуры плавления, что было зафиксировано экспериментально [11, 12].

С использованием разработанных моделей, учитывающих реальное изменение сопротивления материалов при высоких скоростях деформации, проанализировано высокоскоростное деформирование материалов при проникании, импульсном нагружении трещин, сварке взрывом, резании и установлена существенная роль вязкопластических эффектов [2]. Например, расчеты проникания стального цилиндрического бойка диаметром 10 мм с конической головной частью в преграды из алюминиевого сплава и высокопрочной стали при скоростях 700...1000 м/с показали, что влияние вязкости на сопротивление деформированию материала приводит к увеличению сопротивления прониканию выше статического в 2-3 и 1,5 раза соответственно [2, 7, 13].

Путем численного моделирования зафиксировано волнообразование на контактной поверхности соударяющихся под углом пластин при их сварке взрывом и установлена зависимость его параметров от вязкости материала [2]. На основе результатов вычислительных экспериментов подтверждено существование “бугра” деформации впереди точки контакта свариваемых пластин, прогнозируемое некоторыми теоретическими моделями процесса сварки взрывом. Отмечены вихревой характер скорости перемещения и высокий уровень скорости деформации (выше 10^4 с^{-1}) в области контакта соударяемых пластин, значительная локализация в ней удельной энергии деформирования и существенное влияние вязкости материала на деформирование.

Резюме

Розглянуто деякі особливості деформування матеріалів при імпульсному навантаженні. Проаналізовано в'язкопластичні моделі матеріалів і методики динамічних випробувань, що використовуються для визначення їхніх параметрів. Наведено приклади практичних задач (проникання, зварення вибухом), при розв'язанні яких необхідно враховувати ефекти, що зв'язані з високими швидкостями деформації.

1. Степанов Г. В. Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
2. Харченко В. В. Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов. – Киев: ЛОГОС, 1999. – 280 с.
3. Johnson G. R. and Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures // Eng. Fract. Mech. – 1985. – **21**, No. 1. – P. 31 – 48.
4. Пэжина П. Основные вопросы вязкопластичности. – М.: Мир, 1968. – 176 с.
5. Zerilli F. J. and Armstrong R. W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations // J. Appl. Phys. – 1987. – **61**, No. 5. – P. 1816 – 1825.
6. Степанов Г. В., Харченко В. В. Особенности деформирования металлов при скоростях деформации выше 10^4 с^{-1} // Пробл. прочности. – 1985. – № 8. – С. 59 – 64.
7. Харченко В. В. Учет влияния высоких скоростей нагружения на сопротивление деформированию материалов и элементов конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1987. – 16 с.
8. Clifton R. J. and Klopp R. W. Pressure-shear plate impact testing // Mechanical Testing, Metals Handbook. Vol. 8, 9th ed., ASM International, Metals Park, OH, 1985. – P. 230 – 239.

9. *Tanguy B., Piques R., Laiarinandrasana L., and Pineau A.* Mechanical behavior of A508 steel based on double nonlinear viscoplastic constitutive equation / EUROMAT 2000, Advances in Mechanical Behavior. Plasticity and Damage, Elsevier, 2000. – P. 499 – 504.
10. *Ващенко А. П.* Механические свойства конструкционных материалов при динамическом нагружении в широком диапазоне температур / НАН Украины, Ин-т пробл. прочности. – Препр. – Киев, 1992. – 54 с.
11. *Zender A. T. and Rosakis A. J.* On the temperature distribution at the vicinity of dynamically propagating cracks in 4340 steel // J. Mech. Phys. Solids. – 1991. – **39**, No. 3. – P. 385 – 415.
12. *Mason J. J. and Rosakis A. J.* On the dependence of the dynamic crack tip temperature fields in metals upon crack tip velocity and material parameters // Mech. Mater. – 1993. – **16**. – P. 337 – 350.
13. *Stepanov G., Kharchenko V., and Kruszka L.* Computer simulation of a steel rod penetration into heavy plates from steel and aluminum alloy at elevated velocity // Inzynieria srodowiska w eksploatacji kompleksow wojskowych. – Zakopane: WAT, 2001. – P. 363 – 371.

Поступила 14. 11. 2001