

О моделировании поведения пористых материалов в элементах многослойных конструкций при кратковременных нагрузках

© Т.А. Бутина, В.М. Дубровин
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предложена модель поведения пористого материала при интенсивном нагружении. Рассмотрено влияние наличия пористых материалов в многослойных оболочках на напряженно-деформированное состояние при действии кратковременного механического импульса.

Ключевые слова: динамическое нагружение, напряженно-деформированное состояние, пористые материалы, фронт ударной волны.

Введение. В современной технике важное место занимает проблема надежности и прочности многослойных конструкций и их элементов при воздействии интенсивных кратковременных нагрузок, которое характеризуется резким возрастанием нагрузок, их интенсивностью и коротким временем действия. В результате образуются ударные волны (волны напряжения), взаимодействие которых приводит к перераспределению поля напряжений и деформаций.

Современные конструкции являются, как правило, многослойными, причем материалы слоев могут сильно отличаться по своим физико-механическим свойствам. Сложное взаимодействие ударных волн нередко приводит к внезапному отказу изделия, вызванному отколами, расслоениями, разрушением материалов.

Очевидно, что обеспечение стойкости и работоспособности конструкций представляет собой важнейшую задачу. В связи с тем, что экспериментальная отработка прочности и надежности изделия является сложной технической задачей, важную роль в обеспечении стойкости и работоспособности изделия играет моделирование протекающих процессов, кроме того, надежность конструкций во многом определяется правильным выбором материалов.

В настоящее время широкое применение находят пористые материалы, они по своей структуре могут быть различными: грунты, порошки, волокнистые материалы, материалы с внутренними пустотами и т. д. Материалы являются пористыми либо в естественном состоянии, либо в силу технологических особенностей, они имеют участки сплошного вещества (материала костяка) и пустоты. Поэтому средняя плотность пористого материала меньше материала костяка, а удельный объем больше, чем сплошного.

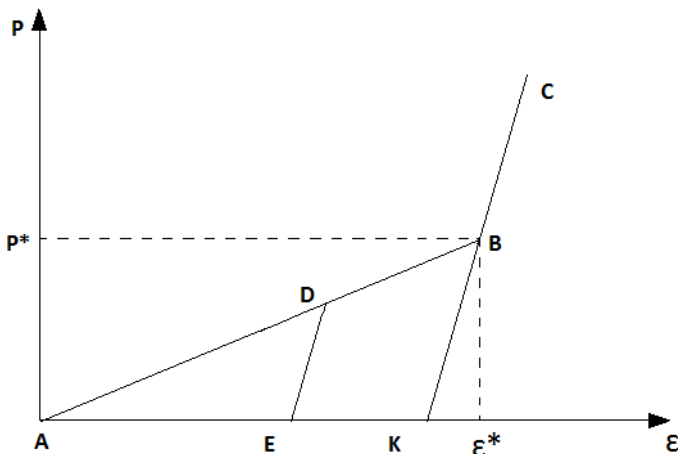
Использование пористых материалов, например, пенопластов, пенополистеролов и т. д. объясняется тем, что они обладают высокими характеристиками поглощения энергии и хорошо подходят в качестве защиты от импульсных воздействий.

Исследованию пористых материалов посвящено большое число публикаций, однако они оказываются мало информативными при проведении практических расчетов, поскольку, как правило, в них отсутствуют необходимые экспериментальные данные по свойствам материалов, а описываемые подходы к решению рассматриваемого вопроса чрезмерно общие. В данной работе предлагается модель поведения пористого материала и методика численного расчета волновых процессов в конструкциях с защитными слоями из пористых материалов.

Модель поведения материала. В процессе ударного воздействия все необратимые изменения, происходящие в материале, должна отражать модель поведения материала. Механизм деформирования пористого материала можно представить следующим образом. При импульсном воздействии в материале распространяется ударная волна, по мере распространения которой пористый материал сжимается. Сначала ломаются перегородки пустых ячеек материала, затем происходит его уплотнение. При достижении плотности материала костяка происходит закрытие пустот, затем начинается сжатие материала костяка, из которого изготовлен пористый материал.

Как показывает эксперимент, на начальной стадии деформирования требуется сравнительно небольшое давление (порядка десятков килобар), при котором материал полностью уплотняется. Практически же важный диапазон давления составляет десятки, сотни килобар, поэтому нельзя считать, что полное уплотнение пористых материалов происходит при давлении, близком к нулю. Под полным уплотнением пористого материала подразумевается такое его сжатие, при котором текущая плотность достигает значения, равного плотности материала костяка. При этом считается, что поры материала сообщаются между собой, находящийся в порах воздух выходит наружу при сжатии перегородок. Предполагается, что после достижения полного уплотнения пористого материала начинается сжатие материала костяка. Исходный пористый материал, сжатый до сплошного, имеет начальную плотность, равную начальной плотности материала костяка. На рисунке показана зависимость деформации от давления.

Прямая AB соответствует линии нагрузки. Полное уплотнение исходного материала достигается в точке B . Разгрузка пористого материала до наступления полного уплотнения осуществляется по прямой DE . В точке D материал достигает определенной степени сжатия $V = \rho_0 / \rho$, достигнутой плотности ρ_D теперь соответствует начальная



Зависимость деформации от давления

плотность для состояния разгрузка – повторная нагрузка, осуществляемая по прямой DE . Таким образом, сколько раз материал ячейки разгружается до достижения плотности в точке D , столько раз мы имеем новую начальную плотность, соответствующую плотности в точке E . Это значение плотности считается начальным значением для промежуточного состояния материала, которое достигается при полной разгрузке по прямой DE . Дальнейшая нагрузка осуществляется по прямой D , при попадании вновь в точку D материал сжимается по закону, соответствующему прямой AB . В случае дальнейшего нагружения ему присваивается в качестве начальной исходная плотность пористого материала, поскольку при отсутствии промежуточных нагрузок конечному сжатию соответствовала бы плотность исходного пористого материала. Таким образом, алгоритм обеспечивает возврат материала в состояние, предшествующее разгрузке (точки $D-E-D$). Физико-механические характеристики материала, определяющие его состояние до наступления полного уплотнения (разгрузки на участке AB) вычисляются с помощью специально разработанной в программе процедуры.

Как указывалось выше, состояние полного уплотнения материала достигается в точке B (см. рисунок). В дальнейшем процесс нагрузки – разгрузки происходит по прямой CK . Уплотнение материала необратимо, т. е. все последующие изменения напряженно-деформированного состояния относятся лишь к материалу костяка. Кривые разгрузки не полностью уплотненного материала параллельны кривым разгрузки сплошного материала. Наклон прямой CK считается равным модулю объемного сжатия.

Как известно, зависимость давления от сжатия, вызванного импульсным нагружением, является существенно нелинейной [1]. В разработанной методике предусмотрен расчет напряженно-деформированного

состояния с учетом нелинейной сжимаемости полностью уплотненного материала, а именно, считается, что выше точки B материал будет сжиматься по кривой упругого давления материала костяка.

Задача определения напряженно-деформированного состояния в многослойных элементах конструкций, содержащих пористые материалы, ставится следующим образом. К внешней или внутренней поверхности многослойных оболочек (цилиндрических или сферических) либо пластин приложен зависящий от времени механический осесимметричный импульс давления произвольной формы. По толщине может быть задан произвольный профиль температурного поля. В разрешающую систему уравнений входят уравнения сохранения массы, импульса, энергии, уравнения состояния [2, 3].

Уравнение движения имеет вид

$$\frac{\rho_0}{\dot{V}} \frac{\partial U}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial \rho} (P - S_r) - \frac{S_r - S_0}{r} (k - 1),$$

где S_r , S_0 – радиальные и тангенциальные составляющие дивергента напряжения; r – текущий радиус; $k = 1, 2, 3$ для пластин, цилиндрической и сферической оболочек соответственно.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\dot{\bar{V}}}{\bar{V}} = - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{\partial (r^{k-1}) U}{\partial r},$$

где $\bar{V} = \rho_0 / \rho$ – сжимаемость.

В качестве деформаций используются деформации Альманзи

$$\varepsilon_r = \frac{\partial l}{\partial r} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial l}{\partial r} \right)^2,$$

$$\varepsilon_0 = \frac{l}{r} - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{r} \right)^2,$$

где l – перемещение.

Закон Гука в дифференциальной форме для расчета девиаторных составляющих записывается следующим образом:

$$\dot{S}_r = 2G \left(\dot{\varepsilon}_r - \frac{1}{3} \frac{\dot{\bar{V}}}{\bar{V}} \right),$$

$$\dot{S}_{\Theta} = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{\Theta} - \frac{1}{3} \frac{\dot{\bar{V}}}{\bar{V}} \right).$$

Характер деформирования устанавливается выбором соответствующего ограничения на девиатор напряжения [4]. Если интенсивность напряжений меньше предела текучести, то материал находится в упругом состоянии. Если же он превышен, то считается, что наступило пластическое течение, и проводится корректировка составляющих девиатора.

Для определения объемной составляющей напряжения используется уравнение Ми-Грюнайзена [5].

$$P = P_y + (E - E_y)\gamma\rho,$$

где E – внутренняя энергия; γ – коэффициент Грюнайзена; P_y , E_y – упругие составляющие давления и энергии соответственно (они являются функциями сжатия).

Для вычисления P_y , E_y используется следующее соотношение [6]:

$$P_y = P_0 e^{\gamma_0 \eta} + P_H - \gamma_0 R(\eta) - g(\eta).$$

Здесь функции $R(\eta)$ и $g(\eta)$ имеют вид

$$R(\eta) = \rho\alpha^2 \left[\frac{\eta^2}{2(1-\beta\eta)^2} - \frac{\eta}{\beta(1-\beta\eta)} - \frac{\ln(1-\beta\eta)}{\beta^2} \right],$$

$$g(\eta) = \gamma_0^2 e^{\gamma_0 \eta} \int_0^{\eta} e^{-\gamma_0 \eta} R(\eta) d\eta.$$

Среднее напряжение для пористых материалов рассчитывается указанным выше образом.

Полная внутренняя энергия с учетом теплопроводности определяется с помощью уравнения

$$\dot{E} = -P\dot{V} + V \left(S_r \dot{\varepsilon}_r + (k-1) S_0 \dot{\varepsilon}_0 \right) + \frac{1}{r^{k-1}} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(r^{k-1} \alpha \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right),$$

где α – коэффициент теплопроводности; T – температура.

Выражение для упругой энергии имеет аналогичный вид. По значениям полной и упругой энергии выполняется расчет поля температур, вызванного ударным нагревом, и остаточное поле температур.

Параметры расчетов. Расчеты проводились для длинной цилиндрической оболочки, что позволило, не нарушая, общности выявить особенности протекающего процесса.

Действие протяженного импульса позволило исключить влияние разгрузки и отследить изменение во времени ударного фронта. Расчеты показали, что профиль напряжения, скорости и т. д. определяется временем нарастания нагрузки (время варьировалось от 0,3 до 0,8 мкс) и с ее ростом ступенчатый характер ударного фронта проявлялся быстрее. На формирование фронта существенное влияние оказывают форма действующего импульса, его амплитуда, время нарастания нагрузки, физико-механические свойства материала.

Применение пористых материалов в качестве демпферов предполагает достаточно быстрое затухание механического импульса при прохождении его по толщине слоя, выполненного из пористого материала. Поэтому выявление эффекта затухания импульса давления в пористом материале по мере распространения в нем ударной волны представляет наибольший интерес.

Эффект затухания импульса определяется особенностями пористых материалов, максимальной амплитудой действующего импульса, временем нарастания и спада нагрузки, а также ее длительностью.

В данной работе распространение импульса давления было исследовано по толщине оболочки, рассматривалось действие импульса, имеющего треугольную форму, время нарастания нагрузки составило 10 мкс, а максимальная амплитуда $8\ 000\ \text{кг/см}^2$.

Выводы. Расчеты показывают, что волна разгрузки с тыльной поверхности импульса приводит к быстрому затуханию амплитуды. Так, при проникновении импульса на глубину 2,5 мм по слою, выполненному из полистирола с начальной плотностью $0,5\ \text{г/см}^3$, его амплитуда составила 25 % исходной максимальной. Распространение того же импульса по толщине оболочек, выполненных из полистирола с исходными плотностями 0,3...0,7 носит аналогичный характер.

С увеличением плотности уменьшается значение массовой скорости, а затухание импульса в менее плотных материалах больше. Время, за которое наступает заметное затухание импульса, глубина слоя, на которой затухание ощутимо, зависят от амплитуды действующего импульса, времени его действия, физико-механических свойств материала. Необходимо учитывать соотношения модулей объемного сжатия, значения скоростей распространения фронта волны, определяемые секущим модулем материала. Взаимосвязь указанных факторов достаточно сложная, поэтому получение каких-либо обобщенных зависимостей требует проведения большого объема вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.Г. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. Москва, Наука, 1966.
- [2] Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. *Физика взрыва*. Станюкович К.П., ред. Москва, 1975, 704 с.
- [3] Димитриенко Ю.И. *Механика сплошной среды. Т. 2: Универсальные законы механики и электродинамики сплошной среды*. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011, с. 560.
- [4] Олдер Б., Ферихах С., Ротенберг Н., Уилкинс М.Л. *Вычислительные методы в гидродинамике*, Москва, Мир, 1967, с. 127.
- [5] Жарков В.Н., Калинин В.А. *Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах*. Москва, Наука, 1968, 314 с.
- [6] Бутина Т.А. Об оценке величин потенциального давления и температуры на ударной адиабате. *Физика горения и взрыва*, 1989, № 4, с. 43.
- [7] Мао Н.К., Bell P.M. Specific Volume Measurements of Cu, Pd and Ag and Calibration of the Ruby Fluorescence Pressure Gage From 0,06 to 1 Mbar. *J. Appl. Phys.*, 1978, vol. 49 (6).

Статья поступила в редакцию 27.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бутина Т.А., Дубровин В.М. О моделировании поведения пористых материалов в элементах многослойных конструкций при кратковременных нагрузках. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/solid/844.html>

Бутина Татьяна Александровна родилась в 1950 г., окончила факультет управления и прикладной математики Московского физико-технического института в 1974 г. Канд. физ.-мат. наук., доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области прочности и устойчивости деформируемых систем. Награждена медалями им. М.В. Келдыша и им. Ю.А. Гагарина. e-mail: butina_ta@mail.ru

Дубровин Виктор Митрофанович родился в 1935 г., окончил механико-математический факультет Саратовского государственного университета в 1958 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» и кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области прочности и устойчивости деформируемых систем. Область научных интересов: динамика прочность и устойчивость деформируемых систем; ползучесть конструкционных материалов. Автор пяти изобретений по закрытой тематике, награжден юбилейной медалью «За доблестный труд», медалью «Ветеран труда», а также двумя знаками заместителя министра обороны «Победитель социалистического соревнования». Принимал участие в испытаниях ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, ветеран подразделения особого риска РФ. e-mail: vmdubrovin@mail.ru