

Л. А. Мерзиевский, А. Д. Реснянский, Е. И. Роменский

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ КОМПОЗИТАХ

В работе на основе ранее сформулированной модели анализируются ударно-волновые процессы в однонаправленных композитах. Установлены эффекты расщепления ударных волн, вызванные различием скоростей распространения импульсов сжатия по материалам компонентов композитов. Эффекты связываются с выявленными ранее особенностями диаграмм динамического сжатия композитных материалов.

Основу современных представлений о прочностных свойствах композитных материалов составляют экспериментальные исследования в условиях статического или квазистатического нагружения. Эти представления отражены и в многочисленных моделях композитных материалов, чаще всего являющихся разновидностями линейной неанізотропной теории упругости. В настоящее время все более актуальными становятся задачи, в которых необходимо описывать поведение композитных материалов при динамическом нагружении с высокими скоростями деформации, в том числе при ударно-волновых нагрузках. Как показывают немногочисленные экспериментальные исследования, реакция композитных материалов на динамическое нагружение может существенно отличаться от поведения в квазистатических условиях.

Наблюдающиеся в динамических процессах особенности не удается описать в рамках известных моделей, поэтому необходима разработка новых, применимых в случае динамических нагрузок. Построению такой модели для двухкомпонентных композитов были посвящены работы [1, 4]. В основе модели — максвелловские представления о упруговязком характере деформирования твердых тел. Для получения эффективных характеристик состояния композита как целого предложен и реализован метод феноменологического осреднения, позволяющий обойтись без обычно принимаемой гипотезы о периодичности структуры. Кроме стандартных характеристик состояния материала, введена характеристика (в общем случае — тензорная) неоднородности упругих деформаций вдоль волокон или слоев. В данной работе модель применяется для численного анализа ударно-волновых процессов в однонаправленных композитных материалах. Развитие модели на случай совместных термоупругоупругих деформаций осуществлено в [2]. Аналогичные идеи для анализа поведения композита на основе правила смесей использовались в работе [3].

Основные соотношения модели

Будем считать, что известны объемные концентрации компонентов композита и все необходимые механические характеристики каждого из образующих композит материалов. Для составляющих композита справедливы соотношения [1, 4, 8] (α — номер компонента):

$$\rho^\alpha \frac{\partial u_i^\alpha}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}^\alpha}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^\alpha}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^\alpha}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^\alpha}{\partial x_i} \right) = \frac{\sigma_{ij}^\alpha - \frac{1}{3} (\sigma_{11}^\alpha + \sigma_{22}^\alpha + \sigma_{33}^\alpha) \delta_{ij}}{2\mu^\alpha \tau^\alpha}.$$

Здесь ρ^α — плотность; u_i^α — скорость; σ_{ij}^α — тензор напряжений; ε_{ij}^α — тензор упругих деформаций; τ^α — время релаксации касательных напряжений; μ^α — модуль сдвига. Напряжения связаны с деформациями

законом Гука

$$\sigma_{ij}^{\alpha} = \lambda^{\alpha} (\varepsilon_{11}^{\alpha} + \varepsilon_{22}^{\alpha} + \varepsilon_{33}^{\alpha}) \delta_{ij} + 2\mu^{\alpha} \varepsilon_{ij}^{\alpha} \quad (2)$$

и могут быть также вычислены по упругому потенциалу E^{α} с помощью формул Мурнагана

$$\sigma_{ij}^{\alpha} = \rho^{\alpha} \frac{\partial E^{\alpha}}{\partial \varepsilon_{ij}^{\alpha}}. \quad (3)$$

Для вычисления осредненных по элементарному объему характеристик состояния композита использовано правило смесей.

В случае волокнистых композитных материалов для средних величин из (1) и ряда гипотез [1] получаем

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) &= -\varphi_{ij}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial t} = -\psi, \end{aligned} \quad (4)$$

где Δ — разность упругих деформаций составляющих композита вдоль направления волокон (параметр, характеризующий неравновесность упругих деформаций); φ_{ij} , ψ — релаксационные функции; ε_{ij} — упругие макродеформации композита, отсчитываемые от разгруженного состояния. Детальная структура уравнений (4) поясняется в [1].

В случае слоистого композита число параметров, характеризующих неравновесность, увеличивается до трех, а система соответствующих уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) &= -\varphi_{ij}, \\ \frac{\partial \Delta_1}{\partial t} &= -\psi_1, \quad \frac{\partial \Delta_2}{\partial t} = -\psi_2, \quad \frac{\partial \Delta_{23}}{\partial t} = -\psi_{23}, \\ \Delta_1 &= (\Delta_{22} + \Delta_{33})/2, \quad \Delta_2 = (\Delta_{22} - \Delta_{33})/2. \end{aligned} \quad (5)$$

Системы (4), (5) дополняются соотношениями для обобщенного упругого потенциала, формулами Мурнагана и зависимостями для времени релаксации касательных напряжений для каждого компонента композита [5].

Для численного решения конкретных задач ударно-волнового деформирования использовалась специально разработанная модификация метода распада разрывов.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых сжатия

Прежде чем перейти к анализу ударно-волновых процессов, необходимо убедиться в том, что предлагаемая модель отражает свойства реальных материалов. Ввиду отсутствия экспериментальных данных о протекании ударно-волновых процессов в композитах, для тестирования модели воспользуемся данными о диаграммах динамического сжатия. Такие диаграммы для модельного волокнистого композитного материала, представляющего собой тонкие медные проволоочки в матрице из эпоксидной смолы, построены и сравнивались с расчетом в [1, 6]. В данной работе сравнение проводится для однонаправленного стеклопластика, экспериментальные данные о сжатии которого вдоль волокон и в перпендикулярном направлении приведены в [7].

Для сравнения с экспериментальными данными использовалось решение задачи о растяжении тонкого стержня. Соответствующие системы уравнений получаются из (4), (5) в предположении, что все функции

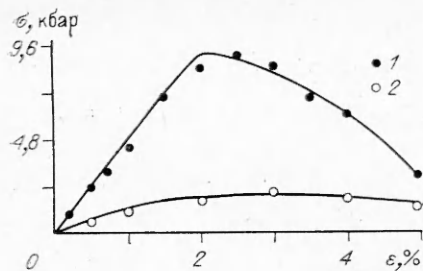


Рис. 1.

зависят только от времени. Результатом решения является зависимость $\sigma(t) = \sigma_1(t)$ или, так как скорость деформации известна и входит в задаваемые исходные данные задачи, $\sigma(\epsilon) = \sigma_1(\epsilon_1)$.

Данные экспериментов [7] (точки) и соответствующих расчетов (кривые) приведены на рис. 1 (1 — нагружение вдоль волокон; 2 — поперек волокон). Характерная особенность диаграмм — наличие участка разупрочнения, на котором рост деформации ведет

к убыванию напряжения. Реально это связано с разрушением армирующих волокон, приводящем к уменьшению прочности композитного материала. Для феноменологического описания этого эффекта зависимости для времен релаксации касательных напряжений материалов компонентов композита были модифицированы описанным в [9] способом.

В [1, 6] для медно-эпоксидного композита установлена важная с точки зрения дальнейшего анализа ударно-волновых процессов особенность диаграмм сжатия композитных материалов. Рассчитанные при постоянной скорости деформации ($\sigma - \epsilon$)-диаграммы имеют три четко выраженных участка, два из которых соответствуют упругому деформированию композита в целом и упругому деформированию связующего (при пластической деформации волокон), а третий — пластическому деформированию композита в целом. Эта особенность может быть более или менее ярко выражена, но обязательно присутствует и в ($\sigma - \epsilon$)-диаграммах других композитов.

Анализ распространения ударных волн

Рассмотрим решение задачи о распространении и эволюции плоских ударных волн в волокнистом композите, когда волна распространяется по направлению вдоль волокон, задаваемому пространственной осью x . Соответствующая система уравнений получается из (4) в предположении, что все функции зависят только от времени и одной пространственной переменной.

На рис. 2 показаны расчетные профили ударных волн в модельном медно-эпоксидном композите [6] в координатах (σ, x) и профили зависимостей характеристики несовместности Δ упругих деформаций материалов армирующих волокон и связующего на различные моменты времени (расчет на рис. 2, а проведен при начальной неравновесности $\Delta_0 = -0.005$, концентрации волокон $c = 0.5$ и амплитуде массовой скорости $u_1 = 50$ м/с, на рис. 2, б — при $\Delta_0 = 0.005$, $c = 0.5$, $u_1 = 200$ м/с).

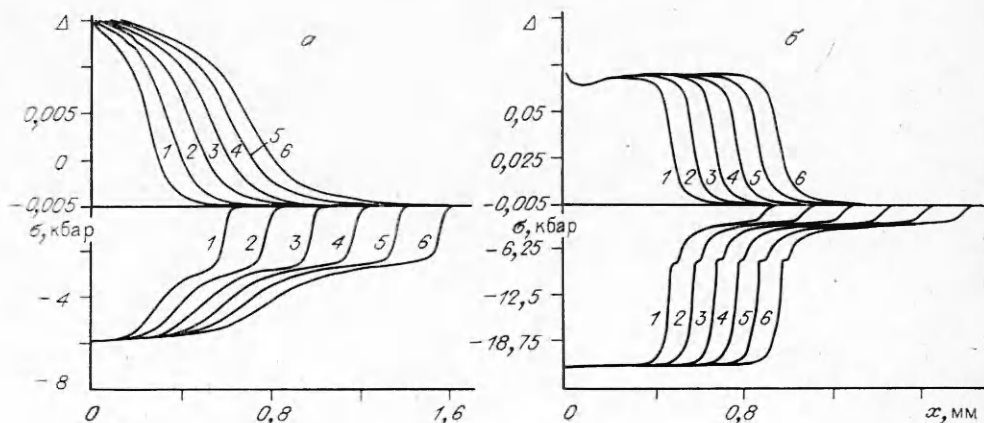


Рис. 2.

Одинаковые номера на всех рисунках присвоены зависимостям, полученным для одного и того же момента времени.

Наблюдающиеся в расчетах особенности структуры ударных волн находятся в полном соответствии с упоминавшимся выше характером диаграммы сжатия. Наличие трех участков на $(\sigma - \varepsilon)$ -диаграмме композита указывает на существование в материале трех типов возмущений, распространяющихся с различными скоростями: упругих, возмущений, при которых матрица деформируется упруго, а армирующее волокно — пластически, и пластических. Это определяет расщепление ударной волны в композите на три последовательных скачка. Упругие свойства данного композита определяются, в первую очередь, упругими свойствами волокон, а эффективный модуль упругости близок к модулю Юнга волокна. Вследствие этого основная работа пластического формоизменения осуществляется во второй волне и скорость ее распространения мало отличается от скорости пластической волны.

Величина напряжений в случае рис. 2, а не достигает предела текучести композита, и ударная волна расщепляется на две. Трехволновая структура ударной волны, полученная при более высокой амплитуде нагрузки, показана на рис. 2, б. В отличие от предыдущего случая, неравномерность Δ за фронтом волны велика, а процесс ее установления продолжается значительно дольше ударно-волнового перехода.

Менее четко проявляются в расчете особенности структуры фронта для материала, состоящего из стеклянных волокон и эпоксидного связующего (рис. 3). В этом случае на втором участке $(\sigma - \varepsilon)$ -диаграммы пластически деформируется матрица, основная часть работы пластического деформирования производится в третьей волне, а близкими являются скорости первой и второй волн. Положение второй волны можно указать, воспользовавшись тем обстоятельством, что в первой (упругой) волне полные и упругие деформации одинаковы, неравномерность $\Delta = \Delta_0$ и начинает меняться только с приходом второй волны. Особенно четко это демонстрируется в расчете на рис. 2, а.

Таким образом, в работе проведена дальнейшая апробация сформулированной ранее [1, 4] модели, описывающей поведение композитов при интенсивных динамических нагрузках, и продемонстрированы возможности модели в анализе достаточно тонких эффектов ударно-волнового деформирования композитных материалов.

Авторы благодарны фонду Сороса, при поддержке которого была выполнена данная работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Romensky E. I., Resnyansky A. D., Merzhievsky L. A. The model of viscoelastic composite // Journ. de Physique IV.—1991.—Coll. C3.—1.— P. 923—930.
2. Реснянский А. Д., Роменский Е. И. Модель динамического деформирования волокнутого термовязкоупругого композита // ФГВ.—1992.—28, № 4.— С. 120—126.
3. Kim S. J., Cho J. Y. Role of matrix in viscoplastic behavior of thermoplastic composites at elevated temperature // AIAA J.—1992.—30, N 10.— P. 2571—2573.
4. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д., Роменский Е. И. Модель динамического деформирования однонаправленных композитов // Докл. АН СССР.—1992.—327, № 1.— С. 48—54.
5. Мержиевский Л. А., Шамонин С. А. Построение зависимости времени релаксации касательных напряжений от параметров состояния среды // ПМТФ.—1980.— № 5.— С. 170—179.

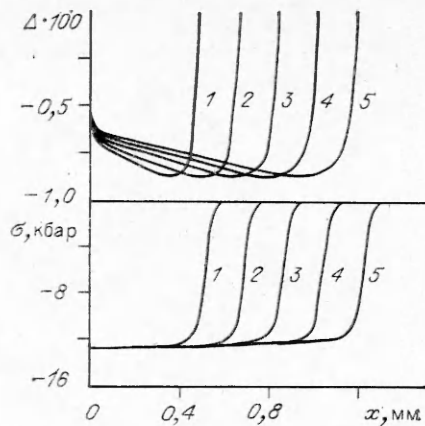


Рис. 3.

6. Мерзиевский Л. А., Нижников О. А. Динамическое сжатие модельного однонаправленного композита // ФГВ.— 1993.— 29. № 5.
7. Пластинин А. В., Сильвестров В. В., Горшков Н. П. Динамическое сжатие однонаправленного стеклопластика // Динамика сплошной среды.— 1989.— Вып. 93, 94.— С. 111—118.
8. Мерзиевский Л. А., Реснянский А. Д., Роменский Е. И. Модель вязкоупругого композита с микронапряжениями // Вычислительные проблемы в задачах математической физики: Тр. ИМ СО РАН.— Новосибирск: Наука, 1992.— Т. 22.— С. 151—167.
9. Merzhievsky L. A., Tyagel'sky A. V. Relation of dislocation kinetics with dynamic characteristics in modelling mechanical behaviour of materials // Journ. de Physique.— 1988.— 49.— Coll. C3, N 9.— P. 457—466.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 19/IV 1993

УДК 539.3

Л. А. Мерзиевский, О. А. Нижников

ДИНАМИЧЕСКОЕ СЖАТИЕ МОДЕЛЬНОГО ОДНОНАПРАВЛЕННОГО КОМПОЗИТА

Методом разрезного стержня Гопкинсона определены диаграммы динамического сжатия модельного композиционного материала (КМ). Экспериментальные зависимости сравниваются с расчетными, полученными на основе сформулированной ранее модели вязкоупругого композита. Отмечено, что наблюдаемые в опытах расхождения в данных об усредненных модулях упругости КМ могут объясняться наличием несоответствия деформаций компонентов.

Композиционные материалы достаточно часто используются в конструкциях, подвергающихся интенсивным импульсным нагрузкам. Для прогнозирования их реакции на динамическое нагружение необходимы соответствующие математические модели, ориентированные на описание особенностей поведения КМ в таких условиях. Примером может служить модель, построенная в [1]. Для их замыкания и апробации требуются базовые экспериментальные данные, полученные в соответствующих условиях. Известный обширный экспериментальный материал по определению прочностных характеристик композитов набран при статическом или квазистатическом нагружении. Установлено, однако, что реакция КМ на динамическое нагружение может как количественно, так и качественно существенно отличаться от поведения в квазистатических условиях. Перечисленными причинами обуславливается необходимость проведения экспериментальных исследований по определению свойств и характеристик композитов при динамических нагрузках.

С точки зрения использования экспериментальных данных для замыкания и первоначальной апробации строящихся моделей необходимы эксперименты с наиболее простыми по структуре КМ, например однонаправленными. Диаграмма динамического сжатия однонаправленного волокнистого стеклопластика построена в [2], но даже данных такого типа недостаточно для проверки применимости моделей, при построении которых, как в [1], постулировалась возможность предсказания свойств композита по известным свойствам его компонентов. Дело в том, что динамические характеристики прочности армирующих волокон и связующих в большинстве случаев изучены также недостаточно, как и характеристики самих композитов. Таким образом, для апробации моделей типа сформулированной в [1], нужны эксперименты с простыми по структуре КМ, состоящими из компонентов, поведение которых при динамических нагружениях было бы хорошо изучено. В противном случае исследование прочностных характеристик композита должно проводить-

© Л. А. Мерзиевский, О. А. Нижников, 1993.