

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

© В.П. Ефремов, А.И. Потапенко, Ю.С. Соломонов, В.Е. Форттов

Институт теплофизики экстремальных состояний РАН

В приближении многокомпонентной среды разработана математическая модель для исследования установления теплового равновесия между частицами наполнителя и связующего композиционного материала. Получено, что время тепловой релаксации составляет от 0,1 мкс до 10 мкс в зависимости от структуры композита.

MATHEMATICAL SIMULATION OF NON STEADY HEAT PROCESSES IN MULTICOMPONENT MEDIUM

V.P. Efremov, A.I. Potapenko, Yu.S. Solomonov, V.E. Forttov

Institute for High Energy Density Russia Academy of Science

In an approximation of multicomponent medium the model of reach of steady state temperature between particles of a filling and a binder of composite was designed. It was obtained, that the time of a thermal relaxation is 0,1 ... 10 ms in depending on a structure of composite.

Воздействие на композиционный материал (КМ) объемно поглощаемых потоков энергии сопровождается неравномерным разогревом его компонентов. Корректная оценка последствий такого воздействия на композиты с характерными размерами компонентов порядка единиц и десятков микрометров предполагает учет теплообмена между ними. Важность учета этого процесса заключается во влиянии температурной неравновесности в зоне энерговыделения на формирующееся давление [1] и в наличии эффекта кратковременной термоустойчивости связующих композита, приводящего к изменению характеристик гидродинамических процессов в материале по сравнению с приближением независимости температуры разложения от внешних факторов. В настоящей работе приводятся результаты исследования динамики тепловых процессов в многокомпонентных материалах различного дисперсного состава, подвергнутых действию потоков энергии.

Рассматривался многокомпонентный материал, представляющий собой органическое резиноподобное связующее, заполненное микросферическим стеклянным полым наполнителем с нанесенным на наружную поверхность металлом [2]. Проведенные микроструктурные исследования [3] показывают, что в исследуемом материале металл покрытия обладает низкой адгезией и в композите наблюдается значительное количество отслоившихся «чешуек» металла, а полый наполнитель можно рассматривать как пористое стекло. Размеры частиц могут варьироваться в широких пределах.

Пусть элементарная ячейка материала состоит из связующего, заполненного сферическими частицами металла, стекла и воздуха с диаметрами d_i ($i = 1 \dots 3$ номер компонента) и концентрацией n_i . Массовые доли компонентов в ячейке полагаются равными средним массовым долям компонентов в материале, частицы наполнителя друг с другом контакта не имеют. В одномерном случае при отсутствии движения компонентов уравнение баланса тепла записывается в виде

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial m} (r^{v-1} W) + q, \quad (1)$$

$$\tau_r \frac{\partial W}{\partial t} + W = -r^{v-1} \rho \lambda \frac{\partial T}{\partial m}, \quad (2)$$

где C – удельная теплоемкость, t – время, W – плотность теплового потока, m – удельная масса, ρ – плотность, τ_r – время тепловой релаксации, ν – показатель вида симметрии (1 – плоской, 2 – цилиндрической 3 – сферической), λ – коэффициент теплопроводности, q – удельная мощность тепловыделения.

При $\tau_r=0$ и отсутствии источников тепла тепловое взаимодействие связующего с температурой T_c и элемента наполнителя с температурой T_i в предположении постоянства температур компонентов по объему описывается системой уравнений

$$C_c \frac{dT_c}{dt} = -S_{ci} \alpha_{ci} (T_c - T_i),$$

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = S_{ci} \alpha_{ci} (T_c - T_i),$$

где C_c, C_i – теплоемкости связующего и элемента наполнителя, S_{ci} – площадь контактной поверхности элемента наполнителя, α_{ci} – коэффициент теплообмена связующего с i -м элементом наполнителя.

Решение указанной системы имеет вид

$$T_c = \frac{C_c T_c^0 + C_i T_i^0 + C_i (T_c^0 - T_i^0) \exp^{-t/t^*}}{C_c + C_i}, \quad (3)$$

$$T_i = \frac{C_c T_c^0 + C_i T_i^0 - C_c (T_c^0 - T_i^0) \exp^{-t/t^*}}{C_c + C_i}, \quad (4)$$

$$t^* = \frac{1}{S_{ci} \lambda_{ci} \left(\frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_i} \right)}, \quad (5)$$

где T_i^0, T_c^0 – начальные температуры наполнителя и связующего.

Коэффициент теплообмена между n_i частицами i -го компонента и связующим определяется площадью поверхности частицы S_{ci} , коэффициентом теплообмена на границе одной частицы α_{ci}^1 и количеством частиц n_i

$$\alpha_{ci} = S_{ci} \alpha_{ci}^1 n_i. \quad (6)$$

Для сферических частиц наполнителя коэффициент теплообмена на границе одной частицы может быть оценен как

$$\alpha_{ci}^1 = \frac{\lambda_c}{d_i}, \quad (7)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности связующего.

В численном расчете на каждом временном шаге t определяются изменение температуры компонентов за счет теплообмена и за счет поглощения энергии излучения

$$dT_{c(i)} = dE_{c(i)} / C_{c(i)}. \quad (8)$$

Исследования проводились для двух вариантов наполнителя с различными размерами частиц вольфрама, стекла и воздуха:

- 1) $d_w=4$ мкм, $d_{cm}=6$ мкм, $d_s=20$ мкм;
- 2) $d_w=1$ мкм, $d_{cm}=1$ мкм, $d_s=20$ мкм.

Рассматривалось поглощение КМ рентгеновского излучения бетатрона. Длительность облучения принималась 100 нс, величина поглощенной энергии в ячейке для обоих вариантов наполнителя одинакова.

По результатам исследований можно сделать вывод, что для рассматриваемого материала с микросферическим наполнителем найденные времена тепловой релаксации существенно меньше полученной в [3] оценки $t < 100$ мкс. Для мелкодисперсного наполнителя (вариант 2) время установления температурного равновесия в ячейке (рис.1) составляет 0,12 мкс, максимальное отношение температур наполнителя к связующему составляет для вольфрама 1,25, для стекла 1,07. Для крупнодисперсного наполнителя температурное равновесие (рис.2) устанавливается за 0,7 мкс, а соответствующие отношения температур составляют 2,1 и 1,5.

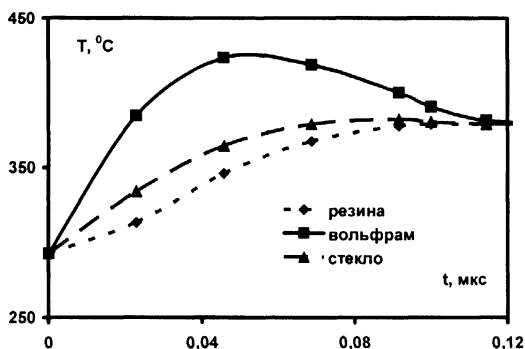


Рис.1. Выравнивание температуры между компонентами КМ с мелкодисперсным микросферическим наполнителем.

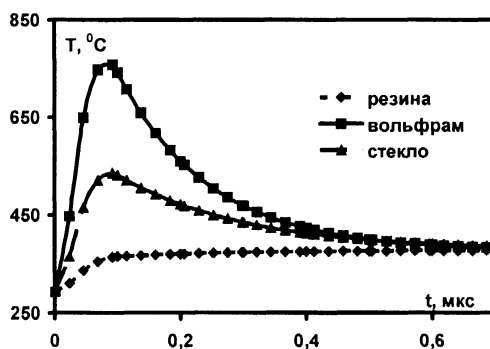


Рис.2. Выравнивание температуры между компонентами КМ с крупнодисперсным микросферическим наполнителем

В относительных координатах ($t_{\text{отн}} = t / t_{\text{равн}}$, t – текущее время, $t_{\text{равн}}$ – время выравнивания температуры) температуры компонентов приведены на рис.3. Из результатов видно, что для мелкодисперсного наполнителя выравнивание температуры происходит без ярко выраженных максимумов, вызванных нарушением баланса между количеством тепла, подводимого излучением к стеклу и вольфраму и отводимого к менее нагретому связующему. Положения максимумов температуры для случаев воздействия на КМ с наполнителем различной дисперсности не совпадают.

Предложенный методический аппарат был использован для исследования установления теплового равновесия для облученного композиционного материала на основе эпоксидной смолы, имеющего в качестве наполнителя частицы окислов олова или церия диаметром от 1 мкм до 4 мкм. При исследовании тепловых процессов получено, что в зависимости от диаметра частиц наполнителя и их материала время установления термического равновесия между наполнителем и связующим составляет от 0,2 мкс для окислов церия диаметром 1 мкм до 20 мкс для окислов олова диаметром 4 мкм. В результате коэффициент Грюнайзена материала, следовательно, и давление в зоне поглощения являются нестационарными величинами.

Рост давления в зоне поглощения после окончания действия излучения является причиной, отмеченной в исследованиях многоволновой структуры волны напряжений [5]. При большой длительности установления теплового равновесия между компонентами вслед за основной волной сжатия наблюдается вторая, меньшая по амплитуде волна положительных напряжений. При свободной облучаемой поверхности эта волна приводит к уменьшению величины отрицательных напряжений, в результате их амплитуда вне зоны энерговыделения становится существенно меньше амплитуды волны сжатия (рис.4). Следует отметить, что при уменьшении диаметра наполнителя амплитуды положительной и отрицательной волн возрастают.

Таким образом, во всех рассмотренных композиционных материалах время установления температурного равновесия между компонентами превышает время действия излучения и соизмеримо с длительностью волновых процессов в преграде, что должно учитываться при исследовании механического действия излучения.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

ОСНОВАН В 1989 г., ВЫХОДИТ ЕЖЕМЕСЯЧНО
ЖУРНАЛ издается под руководством ОТДЕЛЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК РАН

Заместитель главного редактора
Н.Н. КАЛИТКИН
Институт математического
моделирования РАН

Главный редактор
А.А. САМАРСКИЙ
Институт математического
моделирования РАН

Ответственный секретарь
С.В. БОГОМОЛОВ
Московский государствен-
ный университет

Редакционная коллегия

К.В. БРУШЛИНСКИЙ
Институт прикладной
математики РАН

А.М. ДЕНИСОВ
Московский государст-
венный университет

А.А. ПЕТРОВ
Вычислительный центр
РАН

В.Ф. БУТУЗОВ
Московский государст-
венный университет

Е.П. ЖИДКОВ
Объединенный институт
ядерных исследований

В.Ф. ТИШКИН
Институт математического
моделирования РАН

П.Н. ВАБИЩЕВИЧ
Институт математического
моделирования РАН

А.В. ЗАБРОДИН
Институт прикладной
математики РАН

В.Е. ТРОЩИЕВ
Троицкий институт
инновационных и термо-
ядерных исследований

В.Я. ГОЛЬДИН
Институт математического
моделирования РАН

Д.П. КОСТОМАРОВ
Московский государст-
венный университет

А.С. ХОЛОДОВ
Московский физико-
технический институт

Е.А. ГРЕБЕНИКОВ
Вычислительный центр
РАН

А.П. МИХАЙЛОВ
Институт математического
моделирования РАН

Б.Н. ЧЕТВЕРУШКИН
Институт математического
моделирования РАН

Л.А. КРУКИЕР
Ростовский государст-
венный университет

Учредители журнала: *Российская академия наук*
Институт математического моделирования РАН

Зарегистрирован Министерством печати и информации РФ № 0110137 от 04.02.93.

Адрес редакции: *125047 Москва Миусская пл., 4а, Институт математического моделирования РАН*
E-mail: journal@imamod.ru, тел.: (095) 250-79-15, Fax: (095) 972-07-23

Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителям
- на отдельные статьи сохраняется за их авторами

Подготовлено к печати в Институте математического моделирования РАН
Компьютерный набор и макетирование *И.В. Ритус, Т.Г. Ермакова, В.П. Митякова*
Редактор и корректор *Н.В. Соколова*. Секретарь редакции *Л.Г. Корявова*

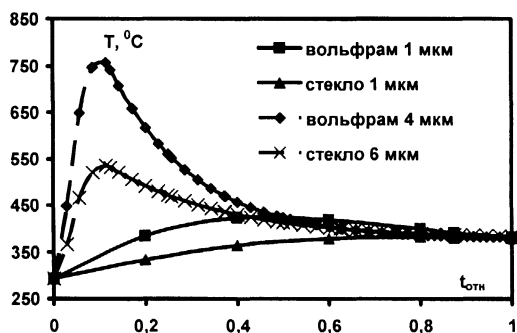


Рис.3. Сравнительная зависимость выравнивания температуры между компонентами КМ с микросферическим наполнителем различных размеров.

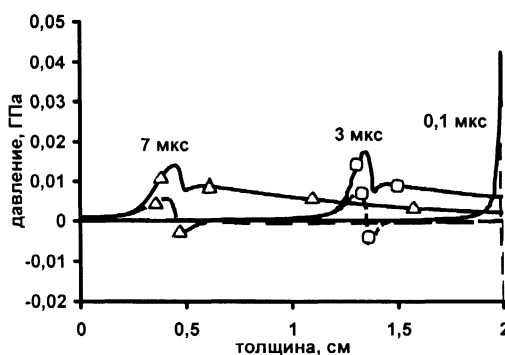


Рис.4. Профиль волны напряжений в материале с частицами окислов олова радиусом 1 мкм. Сплошные линии – облучаемая поверхность зафиксирована, штриховые – свободна.

В приближении многокомпонентной среды разработана модель установления температурного равновесия между связующим и элементами наполнителя КМ. Получено, что для КМ с полым микросферическим наполнителем время тепловой релаксации компонентов составляет 0,1...0,7 мкс, для КМ с частицы окислов церия и олова – 6...10 мкс. Указанные процессы приводят к многоволновому профилю волны напряжений, вызванных импульсным действием излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залюбовский И.И., Калининченко А.И., Лазурик В.Т. Введение в радиационную акустику. // Харьков: "Вища школа", 1986, 165с.
2. Демидов Б.А., Ефремов В.П., Ивкин М.В. и др. Генерация предвестника импульса давления в материалах, обладающих кластерной структурой // Журнал технической физики, 1997, т.67, № 11, с.19-25.
3. Efremov V.P., Potapenko A.I., Khishchenko K.V. Shock Waves in Composite Materials Caused by Volume Energy Absorption // International Conference "Shock Waves in Condensed Matter". High Pressure Center, Saint-Petersburg. 2002, p.46.
4. Ефремов В.П., Острик А.В., Потапенко А.И., Фортвов В.Е. Генерация давления при импульсном объемном энерговыделении в гетерогенном материале, содержащем полые микросферы // Химическая физика. 2000, т.19, №2, с.32-43.
5. Ефремов В.П., Потапенко А.И., Фортвов В.Е. Влияние нестационарных процессов в зоне энерговыделения на профиль волн напряжений при импульсном воздействии на многокомпонентные материалы // Тезисы научно-координационного совещания «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах». Новый Афон. 2003, с.21.