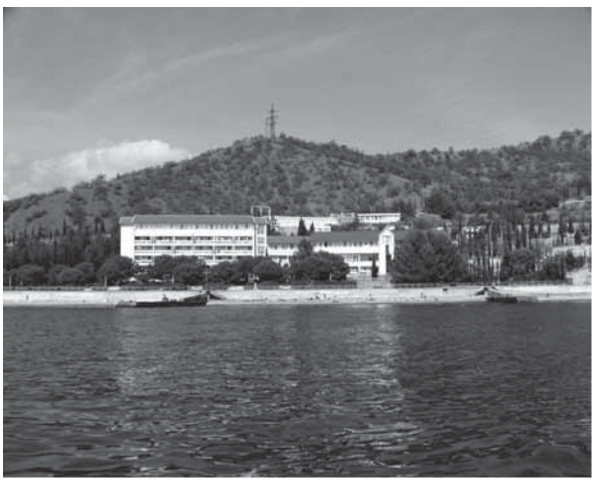
Dedicated to the memory of Ulian Gaikovich Pirumov

PROCEEDINGS OF THE XIX INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL MECHANICS AND MODERN APPLIED SOFTWARE SYSTEMS

CMMASS’2015

24–31 May, 2015
Alushta, Crimea



МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕГРАД

А. А. Козулин

ТГУ, Томск, Россия

Применение перспективных керамических композитов в защитных преградах оправдано их высокими прочностными свойствами. Роль керамического слоя в многослойных преградах заключается в поглощении основной части кинетической энергии ударника, разрушению и смятию его головной части для увеличения площади воздействия на последующие слои преграды. Последующие слои преграды, как правило, выполняются из упругопластических материалов, и должны гасить остатки кинетической энергии ударника, задерживая при этом осколки разрушенного керамического слоя от разлета. Из-за специфического хрупкого поведения керамики после однократного высокоскоростного воздействия на монолитную пластину происходит ее полное разрушение [1]. Поэтому стоит проблема создания перспективных сложных защитных композиций из отдельных керамических элементов способных сопротивляться многократным динамическим воздействиям.

В работе проводили оценку баллистической стойкости перспективных керамических преград методом моделирования высокоскоростного взаимодействия стального сферического ударника диаметром 6 мм с керамокомпозитной многослойной мишенью при различных начальных скоростях нагружения. Два первых слоя совокупной толщиной 10 мм представлены дискретными пластинами из оксидной керамики на основе Al_2O_3, третий слой — пластина толщиной 2 мм из алюминиевого сплава АД31. Дискретные керамические пластины состоят из набора многогранников, заполняющих слой сплошным образом без зазоров и пустот.

Основные уравнения расчетной модели, предназначенной для описания процесса ударного взаимодействия деформируемых тел, базируется на математическом аппарате механики сплошных сред. Для описания механического поведения керамики в элементах преграды выбрана модель Джонсона–Холмквиста (1), использующая концепцию, согласно которой разрушение представляет собой процесс зарождения и развития повреждений в хрупком материале [2, 3]

$$\sigma_{ij} = (1 - D)[-P\delta_{ij} + S_{ij}], \tag{1}$$

где P — давление; S_{ij} — девиатор тензора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; $D = \varepsilon^p/\varepsilon_f$ — параметр поврежденности среды; $\varepsilon_f = D_1(P^* + T^*)D_2$; $\varepsilon^p = \int_0^t \dot{\varepsilon}_u^p\,dt$; $\dot{\varepsilon}_u^p$ — интенсивность скорости пластической деформации; D_1, D_2 — постоянные материала; $T = (T - T_r)/(T_m - T_r)$; T_m — температура плавления конденсированной фазы; $T_r = 293$ K; $P = P/P_{HEL}$; P_{HEL} — давление, соответствующее пределу упругости Гюгонио.

Давление P представлено в виде:

$$P = K_1\theta + K_2\theta^2 + K_3\theta^3 + \Gamma\rho_0 E,$$

при сжатии $\theta > 0$; $P = K_1\theta$, при растяжении $\theta < 0$; где K_1, K_2, K_3 — постоянные материала, $\theta = (\rho/\rho_0) - 1$ — функция объемного сжатия, Γ — коэффициент Грюнайзена.

Девиатор напряжения вычисляется в рамках модели Друккера–Прагера с пластическим потенциалом Джонсона–Холмквиста:

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = 2\mu\left(\dot{\varepsilon}_{ij}^d - \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}_{kk}\delta_{ij}\right),$$

где μ — модуль сдвига конденсированной фазы; $\dot{\varepsilon}^d_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}^p_{ij}$; $\dot{\varepsilon}^p_{ij} = \dot{\lambda}(dg/d\sigma_{ij})$; $\dot{\lambda}$ — коэффициент; $g = [(1/2)S_{ij}S_{ij}]^{1/2} - \sigma_s$.

Производная по времени Яумана тензора вычисляется в соответствии с определением:

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = \dot{S}_{ij} - S_{ik}\dot{\omega}_{jk} - S_{jk}\dot{\omega}_{ik},$$

$$\sigma_s = A(P^* + T^*)^m(1 + C\ln\dot{\varepsilon}),$$

где A, C, m — постоянные материала; $\dot{\varepsilon}$ — нормированная интенсивность тензора скорости деформации. Параметры уравнений получены из экспериментальных работ по ударно-волновому нагружению.

Для описания упругопластического поведения (2) и разрушения (3) алюминиевого слоя преграды из сплава АД31 использованы модели Джонсона–Кука [4]

$$\sigma = [A + B\varepsilon_p^n]\left[1 + C\log\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0}\right]\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right], \tag{2}$$

где ε_p — эффективная пластическая деформация; T_m — емпература плавления; T_r — комнатная температура; A, B, C, n, m, ε — параметры модели.

$$D = \frac{1}{\varepsilon_f}\sum_i \Delta\varepsilon_p^i, \tag{3}$$

где ε_f — величина предельной деформации в материале, $\Delta\varepsilon_p^i$ — приращение эффективной пластической деформации в элементе на i-м шаге интегрирования по времени вычисляется по формуле

$$\Delta\varepsilon_p^i = \left[D_1 + D_2\exp\left(D_3\frac{P}{\sigma_{ef}}\right)\right]\left(1 + D_4\ln\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right)\left(1 + D_5\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right),$$

где $D_1, \ldots, D_5$ — параметры материала, σ_{ef} — эффективное напряжение; P — давление в рассматриваемом элементе. Разрушение конечного элемента происходит, если параметр поврежденности $D = 1$. Значения параметров для моделей выбраны из сертифицированной базы программного комплекса Ansys Autodyn [5].

В результате проведения ряда численных экспериментов исследованы о защитные свойства рассматриваемой композиционной преграды при взаимодействии со сферическим ударником при его начальных скоростях до 1600 м/с. Проведена оценка эффективности и баллистической стойкости преграды, изменения кинетической энергии ударника и запреградных скоростей при пробивании.

1. *Григорян В. А., Кобылкин И. Ф., Маринин В. М., Чистяков И. Н.* Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / Под ред. В. А. Григоряна. — М: РадиоСофт, 2008. — 408 с.

2. *Скрипняк В. А., Скрипняк Е. Г., Козулин А. А., Пасько Е. Г., Скрипняк В. В., Коробенков М. В.* Влияние поровой структуры хрупкой керамики на разрушение при динамическом нагружении // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315, №2. — С. 113–117.

3. *Скрипняк В. А., Скрипняк Е. Г., Козулин А. А., Скрипняк В. В., Коробенков М. В.* Влияние эволюции структуры оксидной керамики на ее поведение при динамическом нагружении // Изв. вузов. Физика. — 2009. — Т. 52, №12. — С. 46–53.

4. *Johnson G. R.*, *Holmquist T. J.* A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressure // Shock Wave and High Strain Rate Phenomena in Materials / Ed. by M. A. Meyers, L. E. Murr, K. P. Staudhammer, M. Dekker. — N.Y.: AIP Press, 1992. — 1075 p.

5. ANSYS AUTODYN Explicit software for nonlinear dynamics. Theory manual [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.autodyn.org. — 29.06.2009.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С РАЗНЫМ ОБЪЕМОМ ПЛАСТИЧНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ*

Ив.С. Коноваленко, Иг. С. Коноваленко, С. Г. Псахье

ИФПМ СО РАН, Томск, Россия

На основе построенных ранее в рамках метода подвижных клеточных автоматов многоуровневых моделей [1] в работе проведено исследование прочностных и упругих свойств керамических композитов с разной степенью заполнения их порового пространства пластичным наполнителем при сдвиговом нагружении. Сгенерирован модельный материал, механические свойства которого соответствуют нанокристаллической керамике $ZrO_2(Y_2O_3)$ со средним размером пор, превосходящим средний размер зерна. Функция распределения пор по размерам этой керамики содержала два четко выраженных пика. Общая пористость керамики C_t изменялась от 0,225 до 0,345. Пористость, связанная с первым пиком C_1 составляла 0,085, со вторым пиком C_2 — изменялась от 0,14 до 0,26. Средний размер пор второго пика составлял 210 мкм. Для краткости изложения описание модели и результаты расчетов приведены только для мезомаштабного уровня, где поры материала (соответствующие второму максимуму гистограммы распределения пор по размерам) содержат наполнитель и его влияние на отклик наиболее выражено. В качестве наполнителя композита использовался модельный пластичный материал с функцией отклика, соответствующей диаграмме нагружения с билинейным упрочнением. Функция отклика автоматов матрицы композита соответствовала диаграмме нагружения керамики $ZrO_2(Y_2O_3)$ с пористостью 0,085. Модуль упругости для клеточного автомата наполнителя $E_{\text{нап}}$ составлял 20 ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_{\text{нап}} = 0{,}31$ предел упругости $\sigma_{\text{т\_нап}} = 123$ МПа, предел прочности $\sigma_{\text{c\_нап}}$ и соответствующая ему деформация $\varepsilon_{\text{c\_нап}}$ составляли 135 МПа и 0,03. Для модельной керамики — $E_{\text{кер}} = 105$ ГПа, $\nu_{\text{кер}} = 0{,}3$, $\sigma_{\text{c\_кер}} = 780$ МПа и $\varepsilon_{\text{c\_кер}} = 0{,}74\%$. На границе раздела матрицы и включений приняты условия идеального контакта.

Были сгенерированы три группы плоских пористых модельных образцов с величиной $C_2 = 0{,}14$, 0,2, 0,26 и одинаковыми размерами. Форма и размеры образцов — прямоугольник 8,4 мм $\times$ 4,2 мм. Каждая группа была разделена на восемь подгрупп. Каждая подгруппа включала в себя восемь образов, с одинаковым содержанием пластичного наполнителя, но индивидуальным расположением пустот в образце. Заполнение пустот наполнителем проводилось по всей длине образца на одинаковую глубину от его верхней поверхности. Степень заполнения пор наполнителем характеризовалась относительной частью высоты образца χ, где поры были заполнены. Рассматривались образцы с $\chi = 0$, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,6, 0,8, 1. Полагалось, что все пустоты реального материала равноосные, с размером

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.