

УДК 539.3

**В.В. Каракулов, И.Ю. Смолин, В.А. Скрипняк****ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТОХАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ  
ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ  
С УЧЁТОМ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ**

Разработана методика численного исследования механического поведения и прогнозирования эффективных механических свойств стохастических композиционных материалов в условиях высокоскоростного деформирования при ударно-волновом нагружении с учётом эволюции структуры композитов. По результатам моделирования механического поведения металлокерамического композита с алюминиевой матрицей и упрочняющими включениями из карбида бора при нагружении плоскими ударными волнами определены эффективные значения механических параметров материала.

**Ключевые слова:** *композиционные материалы, структура, эффективные свойства, ударно-волновое нагружение, численное моделирование.*

При моделировании высокоскоростной деформации элементов конструкций из композиционных материалов в условиях интенсивных динамических воздействий композиты часто рассматривают как однородные или квазиоднородные. Вместе с тем эти материалы представляют собой комплекс компонентов с различными физико-механическими свойствами. Компоненты, объединённые между собой по отчётливо выраженным внутренним контактными поверхностям (границам между компонентами), образуют структуру композитов. Структура и её эволюция в процессе высокоскоростной деформации может оказывать существенное влияние на механическое поведение и свойства композиционных материалов.

Механические свойства стохастических металлокерамических композитов изучались в условиях высокоскоростного деформирования в экспериментах с применением методики мерного стержня Гопкинсона [1 – 3] и при нагружении плоскими ударными волнами [1, 2, 4]. Результаты исследований показали, что механическое поведение металлокерамических композиционных материалов при динамических воздействиях качественно отличается от поведения их компонентов – керамики и металла матрицы. Результаты анализа структуры экспериментальных образцов после динамического нагружения свидетельствовали о том, что специфика механического поведения металлокерамических композитов обусловлена влиянием эволюции их структуры при высокоскоростном деформировании. Однако степень и характер этого влияния в настоящее время до конца не изучены, поэтому остается актуальной проблема исследования механического поведения и прогнозирования механических свойств стохастических композиционных материалов в условиях интенсивных динамических воздействий.

В связи с этим целью настоящей работы – создание методики численного моделирования механического поведения и прогнозирования эффективных механических свойств стохастических композиционных материалов в условиях высокоскоростного деформирования при ударно-волновом нагружении с учётом эволюции структуры композитов.

### Моделирование механического поведения стохастического композиционного материала в условиях ударно-волнового нагружения. Способ определения эффективных параметров механического состояния

В работе моделировалось нагружение плоской ударной волной пластины из стохастического композиционного материала, состоящего из матрицы и упрочняющих включений. Для моделирования выбирался плоский прямоугольный фрагмент сечения пластины, расположенный вдоль направления распространения фронта ударной волны.

Механическое поведение композита в рассмотренных условиях нагружения описывалось посредством физико-математической модели двухфазной конденсированной структурно-неоднородной среды с явным описанием структуры [5–8].

В рамках применявшейся физико-математической модели структурно-неоднородная среда представлялась как совокупность взаимосвязанных элементов структуры: матрицы и включений. Включения имели произвольную форму и были хаотически распределены в матрице. Механическое взаимодействие между элементами структуры осуществлялось по внутренним контактным поверхностям – границам между матрицей и включениями. Внутри границ каждого структурного элемента среда рассматривалась как однородная и изотропная, при переходе через границы физико-механические свойства среды изменялись скачкообразно. Положение внутренних контактных поверхностей в моделируемой области среды определялось формой, размерами и взаимным расположением элементов структуры. Геометрические параметры моделируемой области и количество структурных элементов выбирались таким образом, чтобы обеспечить возможность определения эффективных значений параметров механического состояния среды (компонент вектора массовой скорости, тензора напряжений, тензора деформаций и др.) методом усреднения локальных расчетных значений. Моделируемая область двухфазной структурно-неоднородной среды с модельной структурой показана на рис. 1.

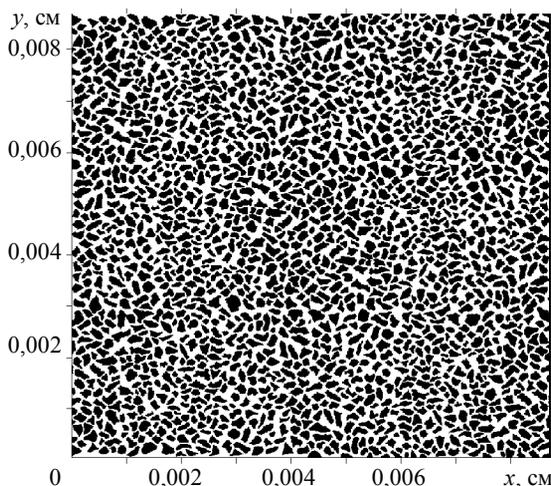


Рис. 1. Моделируемая область двухфазной структурно-неоднородной среды с модельной структурой стохастического композита, состоящего из матрицы (светлая область) и включений произвольной формы (тёмные области). Средний характерный размер включений – 5 мкм, объёмная концентрация – 50 %

Система уравнений математической модели механического поведения структурно-неоднородной среды при ударно-волновом нагружении состояла из уравнений законов сохранения импульса, массы и энергии, соотношений для определения компонента тензора скорости деформаций в локальных точках среды, уравнений состояния фаз, граничных условий на внешних поверхностях моделируемой области и на внутренних контактных поверхностях, начальных условий [5–8].

Численное решение системы уравнений модели позволяет определить поля локальных значений параметров механического состояния структурно-неоднородной среды и структурные изменения (локализацию деформации, образование блоков, разрушения элементов структуры) в процессе деформирования [5–9].

Усреднение локальных значений параметров механического состояния структурно-неоднородной среды в условиях нагружения плоской ударной волной в настоящей работе было предложено проводить в объёмах тонких плоских слоёв, расположенных перпендикулярно направлению распространения фронта ударной волны. Разбиение моделируемой области на слои показано на рис. 2.

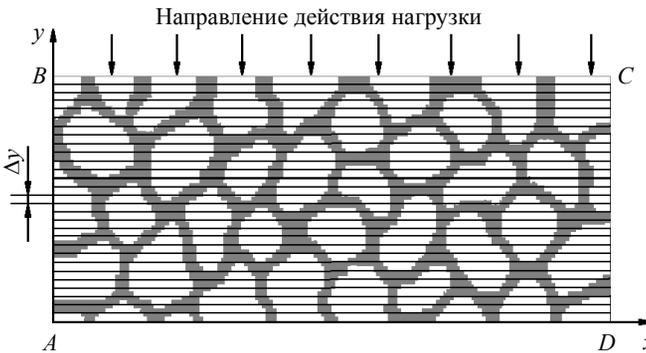


Рис. 2. Фрагмент моделируемой области структурно-неоднородной среды с разбиением на слои толщиной  $\Delta y$ . Расчётные локальные значения продольной компоненты массовой скорости  $U_y$  усреднялись в объёме каждого слоя

Эффективное значение продольной компоненты массовой скорости  $\langle U_y \rangle$  определялось посредством усреднения локальных значений  $U_y$  по объёму слоя  $\langle V \rangle$ :

$$\langle U_y \rangle = \frac{1}{\langle V \rangle} \int_{\langle V \rangle} U_y d\langle V \rangle. \quad (1)$$

Эффективная скорость деформации слоя  $\langle \dot{\epsilon}_{yy} \rangle$  определялась из следующего соотношения:

$$\langle \dot{\epsilon}_{yy} \rangle = \frac{\partial \langle U_y \rangle}{\partial y}. \quad (2)$$

Уравнение сохранения внутренней энергии слоя записывалось в следующем виде:

$$\langle \dot{E} \rangle = \langle \dot{E}_1 \rangle + \langle \dot{E}_2 \rangle, \quad \langle \dot{E}_1 \rangle = -\langle p \rangle \langle \dot{V} \rangle, \quad \langle \dot{E}_2 \rangle = \langle S_{yy} \rangle \langle \dot{\epsilon}_{yy} \rangle \langle V \rangle, \quad (3)$$

где  $\langle p \rangle$  – эффективное давление в слое,  $\langle S_{yy} \rangle$  – компонента девиатора тензора эффективных напряжений.

Значения  $\langle E_1 \rangle$  и  $\langle E_2 \rangle$  определялись суммированием локальных значений  $E_1$  и  $E_2$  по объёму слоя, значения  $\langle p \rangle$  и  $\langle S_{yy} \rangle$  находились из уравнений (3). Эффективное значение напряжения  $\langle \sigma_{yy} \rangle$  определялось из соотношения

$$\langle \sigma_{yy} \rangle = -\langle p \rangle + \langle S_{yy} \rangle. \quad (4)$$

Предложенный способ усреднения позволяет определить эффективные значения параметров механического состояния моделируемой области структурно-неоднородной среды при нагружении плоскими ударными волнами.

### **Прогнозирование эффективных механических свойств стохастического металлокерамического композита Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C при ударно-волновом нагружении**

Описанные в предыдущем разделе модель механического поведения стохастического композита в условиях ударно-волнового нагружения и способ определения эффективных параметров состояния применялись для прогнозирования эффективных механических свойств металлокерамического композита Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C при нагружении плоскими ударными волнами с амплитудами от 0,5 до 30 ГПа. Для описания механического поведения керамических включений из карбида бора В<sub>4</sub>C применялась модель упруго-хрупкой повреждаемой среды Джонсона – Холмквиста, для металлической матрицы из алюминия – модель упруго-вязкопластической среды Джонсона – Кука.

На рис. 3 показаны пространственные распределения расчётных эффективных значений массовой скорости  $\langle U_y \rangle$  и напряжения  $\langle \sigma_{yy} \rangle$  в композите Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C при нагружении плоской ударной волной с амплитудой 2,05 ГПа, построенные для двух моментов времени.

На рисунке видно, что в композиционном материале Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C формируется двухволновая структура фронта волны нагрузки. На профилях отчётливо выделяется фронт упругой волны (упругий предвестник) и фронт пластической (ударной) волны, распространяющейся за упругим предвестником. Эти расчётные данные позволили определить значения эффективной амплитуды и скорости распространения упругого предвестника, а также значения эффективных скоростей распространения ударных волн.

Эффективная скорость распространения упругого предвестника, равная эффективной продольной скорости звука  $\langle C_L \rangle$ , вычислялась с использованием следующего соотношения:

$$\langle C_L \rangle = \frac{\langle \Delta Y_A \rangle}{\Delta t}, \quad (5)$$

где  $\langle \Delta Y_A \rangle = \langle Y_A(t_2) \rangle - \langle Y_A(t_1) \rangle$  – расстояние, пройденное упругой волной за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Для композита Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C значение  $\langle C_L \rangle$  оказалось равным 0,883 см/мкс.

Эффективная скорость ударной волны  $\langle D \rangle$  определялась как скорость распространения средней точки профиля пластического фронта из соотношения

$$\langle D \rangle = \frac{\langle \Delta Y_B \rangle}{\Delta t}, \quad (6)$$

где  $\langle \Delta Y_B \rangle = \langle \Delta Y_A \rangle = \langle Y_B(t_2) \rangle - \langle Y_B(t_1) \rangle$  – расстояние, пройденное ударной волной за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

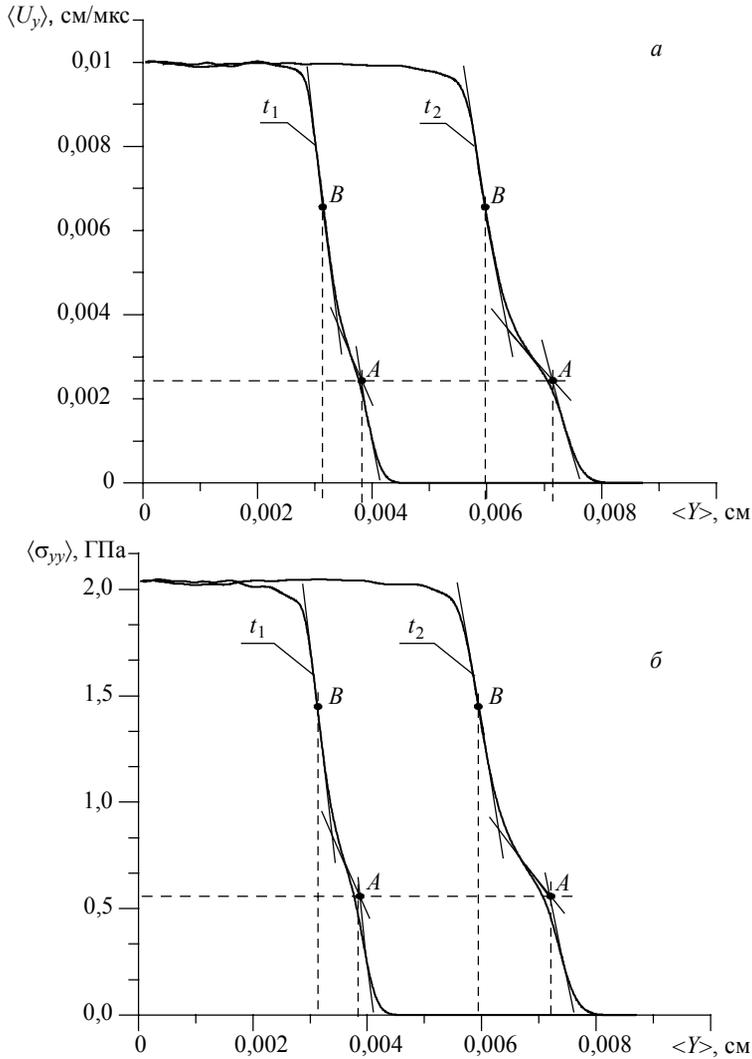


Рис. 3. Пространственные распределения: *а* – эффективной массовой скорости  $\langle U_y \rangle$ , *б* – эффективного напряжения  $\langle \sigma_{yy} \rangle$  в стохастическом металлокерамическом композите Al – 50 об.% В<sub>4</sub>С при нагружении плоской ударной волной с амплитудой 2,05 ГПа. Значения  $\langle U_y \rangle$  и  $\langle \sigma_{yy} \rangle$  определены для двух моментов времени  $t_1 = 4,38 \cdot 10^{-3}$  мкс и  $t_2 = 8,25 \cdot 10^{-3}$  мкс. Точка *A* соответствует верхней точке профиля упругой волны (упругого предвестника), точкой *B* обозначена средняя точка профиля фронта пластической (ударной) волны

Результаты моделирования распространения ударных волн с амплитудами от 0,5 до 30 ГПа в композите Al – 50 об.% В<sub>4</sub>С были использованы для построения зависимости эффективной скорости ударной волны  $\langle D \rangle$  от эффективной массовой скорости  $\langle U_y \rangle$ . Эта зависимость показана на рис. 4.

Полученная зависимость в рассмотренном диапазоне ударного сжатия имеет линейный характер  $D = C_0 + \lambda U_y$ , что хорошо согласуется с экспериментальными и теоретическими данными.

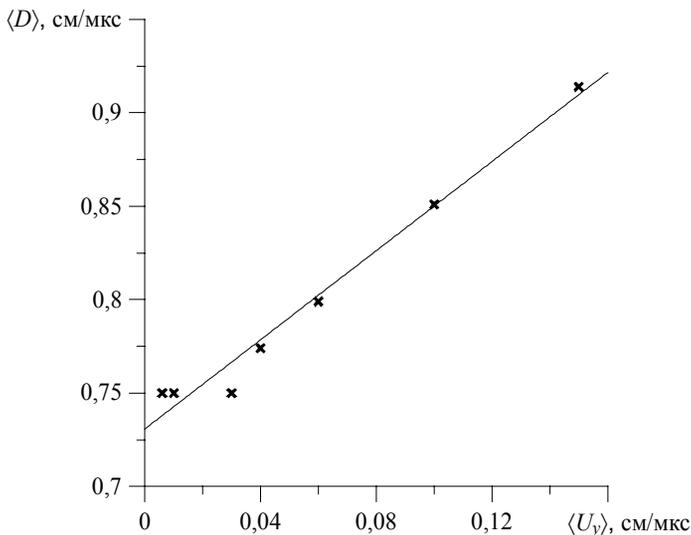


Рис. 4. Зависимость эффективной скорости ударной волны  $\langle D \rangle$  от эффективной массовой скорости  $\langle U_y \rangle$  в металлокерамическом композите Al – 50 об.% V<sub>4</sub>C. Точками обозначены результаты расчётов, непрерывной линией – аппроксимационная зависимость  $\langle D \rangle = 0,723 + 1,246 \langle U_y \rangle$ .

Величина эффективной объемной скорости звука  $\langle C_B \rangle$  принималась равной величине  $C_0$  и для композита Al – 50 об.% V<sub>4</sub>C составила 0,723 см/мкс.

Значения  $\langle C_L \rangle$  и  $\langle C_B \rangle$  были использованы для определения эффективной сдвиговой скорости звука  $\langle C_s \rangle$  из соотношения

$$\langle C_s \rangle^2 = (3/4)(\langle C_L \rangle^2 - \langle C_B \rangle^2). \quad (7)$$

Для исследованного композита расчётная величина эффективной сдвиговой скорости звука  $\langle C_s \rangle$  составила 0,432 см/мкс.

Полученное значение эффективной объемной скорости звука  $\langle C_B \rangle$  использовалось для определения эффективного значения модуля объемного сжатия  $\langle K \rangle$  при нормальных условиях. Эффективный модуль объёмного сжатия  $\langle K \rangle$  вычислялся как

$$\langle K \rangle = \langle C_B \rangle^2 \langle \rho_0 \rangle, \quad (8)$$

где  $\langle \rho_0 \rangle$  – эффективная массовая плотность композита при нормальных условиях, которая определялась по модели механической смеси.

Расчётная величина эффективного модуля объемного сжатия  $\langle K \rangle$  для композита Al – 50 об.% V<sub>4</sub>C составила 138,8 ГПа.

В работе проводилось сопоставление полученного в рамках предложенной методики эффективного значения модуля объемного сжатия  $\langle K \rangle$  с оценками по хорошо известным и часто применяемым моделям Фойгта – Рейса, и Хашина – Штрикмана. Полученное по предложенной методике значение модуля  $\langle K \rangle$  лежит внутри диапазона оценок по указанным моделям. Это свидетельствует о том, что в предельном случае (для нормальных условий) полученные по предложенной методике оценки модуля  $\langle K \rangle$  имеют точность прогноза, сопоставимую с моделью Хашина – Штрикмана.

Для оценки эффективного модуля сдвига  $\langle \mu \rangle$  использовалось вычисленное эффективное значение сдвиговой скорости звука  $\langle C_s \rangle$ . Эффективный модуль сдвига для нормальных условий вычислялся из следующего соотношения:

$$\langle \mu \rangle = \langle C_s \rangle^2 \langle \rho_0 \rangle. \quad (9)$$

Для композита Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C величина  $\langle \mu \rangle$  составила 49,3 ГПа.

Расчетное значение модуля сдвига  $\langle \mu \rangle$ , полученное по предлагаемой методике для нормальных условий, так же как и значение модуля  $\langle K \rangle$ , сопоставлялось с теоретическими оценками по моделям Фойгта – Рейса и Хашина – Штрикмана. Сравнение показало, что полученное по предлагаемой методике значение модуля сдвига  $\langle \mu \rangle$  при нормальных условиях коррелирует с оценками по модели Фойгта – Рейса.

Эффективные значения модулей сдвига  $\langle \mu \rangle$  и объемного сжатия  $\langle K \rangle$  были использованы для оценки эффективного значения модуля Юнга  $\langle E \rangle$ . Модуль Юнга вычислялся по соотношению

$$\langle E \rangle = \langle \mu \rangle (3\langle \lambda \rangle + 2\langle \mu \rangle) / (\langle \lambda \rangle + \langle \mu \rangle), \quad (10)$$

где  $\langle \lambda \rangle = \langle K \rangle - (2/3)\langle \mu \rangle$ .

Для композиционного материала Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C величина эффективного модуля Юнга  $\langle E \rangle$  составила 132,3 ГПа. Сравнение этого значения с оценками по моделям Фойгта – Рейса и Хашина – Штрикмана показало, что полученная величина  $\langle E \rangle$  лежит внутри диапазона оценок по модели Фойгта – Рейса.

Эффективное значение предела упругости на ударной адиабате Гюгонио  $\langle \sigma_{HEL} \rangle$ , равное амплитуде упругого предвестника, определялось непосредственно по профилям напряжения  $\langle \sigma_{yy} \rangle$ . Для исследованного композита это значение составило 0,54 ГПа.

Величина  $\langle \sigma_{HEL} \rangle$  использовалась для определения динамического предела упругости  $\langle \sigma_{SD} \rangle$  из следующего соотношения:

$$\langle \sigma_{SD} \rangle = ((1 - 2\langle \nu \rangle) / (1 - \langle \nu \rangle)) \langle \sigma_{HEL} \rangle, \quad (11)$$

где  $\langle \nu \rangle = \langle \lambda \rangle / (2(\langle \lambda \rangle + \langle \mu \rangle))$ .

Эффективное значение динамического предела упругости  $\langle \sigma_{SD} \rangle$  для Al – 50 об.% В<sub>4</sub>C составило 0,26 ГПа. Полученное значение  $\langle \sigma_{SD} \rangle$  сравнимо со значением динамического предела упругости алюминиевой матрицы. Этот результат свидетельствует о том, что в композите с объёмным содержанием керамических включений 50 % развитие неупругих деформаций во фронте ударной волны обеспечивается за счёт пластического течения матрицы. Возможно, что при более высокой концентрации включений, когда толщина прослоек матрицы настолько мала, что её пластическая деформация уже не способна обеспечить релаксацию возрастающих напряжений, эффективное значение динамического предела упругости  $\langle \sigma_{SD} \rangle$  возрастёт.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена численная методика прогнозирования эффективных механических свойств (скоростей звука, модулей упругости, динамического предела упругости) стохастических композиционных материалов в условиях ударно-волнового нагружения с учётом эволюции структуры композитов. Показано, что в предельном случае (для нормальных условий) точность прогноза эффективных значений модулей упругости сопоставима с точностью оценок по известным моделям Фойгта – Рейса и Хашина – Штрикмана. Пре-

имущество предложенной методики заключается в возможности оценки эффективных значений модулей упругости для заданных давлений и возможности получения теоретических оценок зависимостей эффективных значений модулей упругости от давления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Blumenthal W.R., Gray III G.T.* Structure-property characterization of shock loaded B<sub>4</sub>C-AL // Proc. Int. Conf. Mech. Prop. Mater. at High Rates of Strain. Oxford. 1989. Int. Phys. Conf. Ser. 102. IOP Publ. LTd. 1989. P. 363 – 370.
2. *Gray III G.T., Hixson R.S., Johnson J.N.* Dynamic deformation and fracture response of Al 6061-T6 -50 vol.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> continuous reinforced composite // Proc. Int. Conf. Shock Waves in Condensed matter. 1996. P. 547 – 550.
3. *Vaidya R.U., Song S.G., Zurek A.K., Gray III G.T.* The effect of structural defects in SiC particles on the static and dynamic mechanical response of a 15 volume percent SiC/6061-A1 matrix composite // Proc. Int. Conf. Shock Waves in Condensed Matter. 1996. P. 643 – 646.
4. *Dandekar D.P., Lopatin C.M.* Shock response of SiC/2014-T4 aluminium composite // Shock Waves in Condensed Matter / Ed. by Gupta Y.M. N.Y.; London: Plenum Press, 1985. P. 365–369.
5. *Скрипняк В.А., Каракулов В.В.* Numeric simulation of cermet's behaviour under shock loading // Shock Waves in Condensed Matter. St. Peterburg, 1994.
6. *Платова Т.М., Скрипняк В.А., Каракулов В.В.* Об особенностях распространения ударных волн в гетерогенных средах с прочностью // Вычислительные технологии. 1995. Т. 4. № 1. С. 200–210.
7. *Скрипняк В.А., Каракулов В.В.* Локализация деформации при высокоскоростном нагружении металлокерамических материалов // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец. вып. Ч. 1. С. 329–331.
8. *Скрипняк В.А., Каракулов В.В.* О распределении массовой скорости в плоских ударных волнах, распространяющихся в металлокерамических композитах // Вестник ТГУ. 2005. № 50. С. 7–15.
9. *Скрипняк В.А., Каракулов В.В.* Повреждаемость металлокерамических композитов в условиях ударно-волновых воздействий // Физика экстремальных состояний вещества – 2007: сб. трудов. Черногловка: Ин-т проблем химической физики РАН, 2007. С. 125–127.

Статья поступила 13.04.2013 г.

*Karakulov V.V., Smolin I.Yu., Skripnyak V.A.* NUMERICAL PROCEDURE OF FORECASTING EFFECTIVE MECHANICAL PROPERTIES OF STOCHASTIC COMPOSITES UNDER SHOCK-WAVE LOADING WITH ALLOWANCE FOR THE STRUCTURE EVOLUTION. A procedure for numerical study of the mechanical behaviour and predicting effective mechanical properties of stochastic composites in high-rate deformation under shock-wave loading is worked out with allowance for the evolution of the structure of composites. Using obtained simulation results of the mechanical behaviour under plane shock wave loading, the effective values of the mechanical parameters of the Al-50vol.% B<sub>4</sub>C cermet composite are derived.

Keywords: composite materials, structure, effective properties, shock-wave loading, numerical modelling

*KARAKULOV Valery Vladimirovich* (Tomsk State University)

E-mail: valery@ftf.tsu.ru

*SMOLIN Igor Yurievich* (Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk State University)

E-mail: smolin@ispms.tsc.ru

*SKRIPNYAK Vladimir Albertovich* (Tomsk State University)

E-mail: skrp@ftf.tsu.ru