ISSN: 1999-6691 e-ISSN: 2782-3709 DOI: 10.7242/1999-6691/2026.19.3.19

Научная статья

Определение динамического предела текучести гетерогенных преград с заданной пористостью

А.Е. Краус, А.Е. Бузюркин, И.И. Шабалин, Е.И. Краус

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация

Эффективность современных защитных структур на основе высокотвердых материалов и легких сплавов определяется динамическим откликом системы при высокоскоростном нагружении. Понимание механизмов диссипации энергии в таких преградах требует разработки точных методов экспериментальной регистрации и верификации моделей внедрения и разрушения материалов в реальном времени. Работа направлена на исследование динамического взаимодействия стального сферического тела с монолитными и комбинированными преградами. Найдены значения динамического предела текучести материалов, входящих в состав керамических и металлокерамических слоистых систем, и описаны механизмы разрушения последних. Результаты численного моделирования, реализованного в российском программном комплексе «Reactor3D», сопоставлены с профилограммами кратеров, полученными в высокоскоростных натурных экспериментах. Анализ скорости внедрения выявил ступенчатый характер торможения сферического ударника, что согласуется с волновым характером динамического сопротивления материала. Установлено, что динамический предел текучести алюминиевой подложки существенно возрастает в фазе интенсивного деформирования. У комбинированных преград обнаружен двухступенчатый механизм формирования кратера: высокотвердый лицевой слой (керамика или металлокерамика) поглощает основной импульс и фрагментируется, после чего под воздействием потока высокоскоростных частиц разрушенного слоя в подложке образуется каверна. Показано, что предложенный подход позволяет оценить динамический предел текучести алюминиевого сплава Д16Т с расхождением не более 10% относительно экспериментального значения, а также вычислить эффективный динамический предел текучести комбинированной слоистой преграды.

Ключевые слова: аддитивные материалы, слоистые преграды, динамический предел текучести, высокоскоростное взаимодействие, ударные волны, интенсивность пластических деформаций, модель Джонсона–Кука

Получение: 11.06.2026 / *Принятие:* 13.08.2026 / *Публикация онлайн:* 31.10.2026 УДК 531.395

1. Введение

Современное развитие конструкционных материалов связано с переходом от однородных систем к материалам с целенаправленно сформированной гетерогенной структурой. Аддитивные технологии [1–3], ударно-волновое компактирование [4, 5], плазменно-искровое спекание [6], электронно-лучевая наплавка [7, 8], лазерное ударное упрочнение [9, 10] и различные методы армирования [11, 12] позволяют управлять распределением фаз, пористостью, размерами включений и пространственной неоднородностью материала. В результате свойства таких систем обусловливаются не только химическим составом, но и особенностями их внутреннего строения.

Теоретической основой создания структур с заданными свойствами являются физическая мезомеханика и концепция компьютерного конструирования материалов [13], согласно которым механический отклик определяется совокупными свойствами компонентов и их пространственной организацией. Это подтверждается исследованиями металлокерамических композитов [14, 15], показывающими существенное влияние формы, размеров и распределения армирующих включений на эффективные упругие и динамические характеристики даже при одинаковой объемной доле фаз.

Для анализа подобных материалов широко применяются численные методы, поскольку локальные концентрации напряжений, межфазные взаимодействия, неоднородность пластического течения и процессы разрушения трудно описываются аналитическими моделями. В настоящее время активно развиваются мезомасштабные модели, модели повреждения и частично-дискретные подходы [16–19], которые дают возможность учитывать реальную структуру материала и изучать механизмы его деформирования.

Особый интерес представляют металлокерамические композиты на основе карбида бора, карбида кремния и металлических матриц. Высокая твердость керамических компонентов обеспечивает эффективное сопротивление прониканию ударников [20, 21], а хрупкость монолитной керамики стимулирует создание функционально-градиентных и металломатричных систем. В работах [22, 23] показано, что изменение концентрации и размеров керамических частиц существенно влияет на микротвердость и структуру материала, что открывает доступ к управлению его свойствами.

Исследования многослойных и градиентных защитных систем демонстрируют, что их эффективность определяется не только характеристиками отдельных компонентов, но и архитектурой материала: последовательностью слоев, их толщиной, способом сопряжения и распределением армирующих фаз [24, 25]. Поэтому прогнозирование защитных свойств требует учета реальной микроструктуры, а не только усредненных параметров компонентов.

При моделировании металломатричных композитов используются два основных подхода: первый базируется на вычислительной гомогенизации, при которой материал рассматривается как эффективная однородная среда [26]; второй предполагает явное описание включений в матрице [25], что позволяет учитывать локальные поля

©Авторы 2026 Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

напряжений и деформаций, а также принимать во внимание влияние морфологии структуры на макроскопическое поведение материала. Для новых гетерогенных материалов, свойства которых заранее не известны, такой подход представляет особую ценность.

Наиболее сложной задачей является анализ поведения гетерогенных материалов при ударно-волновом нагружении. В этих условиях волны напряжений многократно отражаются и преломляются на межфазных границах, формируются сложные поля напряжений, деформаций и повреждений. Экспериментальные и численные исследования показывают, что динамический отклик существенно зависит от внутренней структуры материала и условий нагружения [27, 28].

Классические теории осреднения, включая метод самосогласования [29], вириальное разложение [30], теорию смесей [31], модели многослойных конструкций [32] и асимптотическое осреднение [33], остаются важными инструментами оценки эффективных свойств неоднородных сред. Однако при высокоскоростном деформировании и разрушении возрастает роль микроструктурно-ориентированных численных моделей, способных учитывать локализацию повреждений, зарождение трещин и реальную морфологию фаз, а также многоуровневых конечно-элементных и гибридных моделей [34].

Таким образом, из обзора литературы следует, что для гетерогенных материалов структура служит одним из ключевых факторов, определяющих их механические и защитные свойства. В связи с этим инструментом, который может прогнозировать эффективные характеристики материала, анализировать механизмы разрушения и решать задачи направленного проектирования новых композиционных систем, является численное моделирование.

2. Цель работы и постановка задачи

Цель работы состоит в создании методики оценки динамического предела текучести гетерогенных материалов с заданной пористостью по измеряемым геометрическим параметрам зоны деформирования и разрушения. Методика опирается на экспериментальные данные и результаты численного моделирования высокоскоростного взаимодействия сферического ударника с преградой в российском программном комплексе «Reactor3D» [35].

Математическая постановка задачи, начальные и контактные условия, уравнение состояния на основе соотношений Ренкина–Гюгонио и критерии разрушения описаны в работах [25, 36]. Модель прямого численного моделирования гетерогенной среды представлена в [37, 38]. Если деформация растяжения ε_1 (или сдвига ε_τ) превышает соответствующее предельное значение ε_1^* (или ε_τ^*), материал считается разрушенным, то есть он перестает сопротивляться растяжению (сдвигу), но сохраняет сопротивление сжатию. Прочностные характеристики материала включают в себя предельные напряжения при растяжении, сжатии и сдвиге. Материал утрачивает целостность, когда максимальное главное (или максимальное касательное) напряжение становится больше соответствующего предельного значения: $\sigma_1 > \sigma_1^*$ или $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 > \sigma_\tau^*$. При высокоскоростном взаимодействии необходимо учитывать инерционность процессов накопления повреждений. Это особенно актуально при анализе откольного разрушения в керамических материалах. Для моделирования данного процесса применяется модифицированный критерий Тулера–Бучера [26, 39], базирующийся на оценке среднего перенапряжения за рассматриваемый интервал времени нагружения Δt_i:

$$\sigma_t = \frac{\sum(\sigma_1 - \sigma_1^*)_i \Delta t_i}{\sum \Delta t_i} > \Delta\sigma^*, \tag{1}$$

где $\Delta\sigma^*$ — предельное напряжение. Накопление поврежденности на временных шагах Δt_i производится только при выполнении условия $\sigma_1 - \sigma_1^* > 0$.

Для описания пластического деформирования алюминиевой подложки из сплава Д16Т в условиях высокоскоростного нагружения использована модель Джонсона–Кука [40], в которой температурное разупрочнение не учитывалось:

$$Y_{jc} = \left(A + B(\varepsilon_{eq}^p)^n\right)(1 + C\ln(\dot{\varepsilon}_{eq}/\dot{\varepsilon}_0)), \tag{2}$$

где Y_{jc} — предел текучести согласно модели Джонсона–Кука, A, B, C, n — константы, определяемые свойствами материала и находимые по экспериментальным данным, ε_{eq}^p — эквивалентная истинная пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}_{eq}$ — скорость эквивалентной истинной пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_0$ — отсчетная или базовая скорость деформации. При этом эквивалентная истинная пластическая деформация и ее скорость имеют вид:

$$\begin{gathered} \varepsilon_{eq}^p = \sqrt{(2/9)\left[(\varepsilon_1^p - \varepsilon_2^p)^2 + (\varepsilon_2^p - \varepsilon_3^p)^2 + (\varepsilon_3^p - \varepsilon_1^p)^2\right]}, \\ \dot{\varepsilon}_{eq} = \sum \Delta\varepsilon_{eq}^p / \Delta t. \end{gathered} \tag{3}$$

Для учета разрушения применена модель накапливаемых повреждений Джонсона–Кука [40]:

$$D = \sum \Delta\varepsilon_{eq}^p / \varepsilon_f \leqslant 1.$$

Здесь $\Delta\varepsilon_{eq}^p$ — приращение интенсивности пластических деформаций в истинных координатах, ε_1^p, ε_2^p, ε_3^p — главные пластические деформации, ε_f — пластические деформации разрушения. При выполнении условия $D > 1$

считается, что материал разрушен:

$$\varepsilon_f = \left[D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}\right][1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}_{eq}/\dot{\varepsilon}_0)],$$
$$\sigma^* = \frac{P}{\sqrt{(3/2)\left[S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2\left(S_{xy}^2 + S_{zy}^2 + S_{xz}^2\right)\right]}},$$

где D_1, D_2, D_3 — константы материала, определяющие влияние трехосности напряжений, D_4 — коэффициент влияния скорости деформации, S_{ij} — компоненты девиатора тензора напряжений.

Совместное использование нескольких критериев прочности позволяет учитывать различные механизмы разрушения и оценивать поведение как хрупких, так и пластичных сред.

3. Модель гетерогенного материала

Для описания неоднородных материалов применяется подход прямого численного моделирования, учитывающий гетерогенную структуру материала явным образом. Материал представляет собой композицию с заданными концентрациями компонентов смеси, распределенных по объему расчетной области [25]. Минимальный размер гетерогенного «включения» — одна ячейка конечно-разностной сетки. В каждой ячейке известны физико-механические свойства компонентов гетерогенного материала, которые при переходе из одной ячейки к другой могут изменяться скачком. На границах ячеек выполняются условия совместности перемещений узлов, принадлежащих компонентам гетерогенного материала. Уравнения в частных производных преобразуются в разностную схему на тетраэдрической сетке вдоль траектории каждой материальной частицы. Разностная сетка в произвольных многосвязных областях строится динамическим способом [25]. Переход от дифференциальных уравнений к дискретным описан в [36].

В трехмерном случае рассматриваются векторные уравнения баланса импульса:

$$\begin{aligned}
\iiint\limits_{V_c} \rho \frac{\partial u}{\partial t} dV &= \iiint\limits_{V_c} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) dV, \\
\iiint\limits_{V_c} \rho \frac{\partial v}{\partial t} dV &= \iiint\limits_{V_c} \left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} \right) dV, \\
\iiint\limits_{V_c} \rho \frac{\partial w}{\partial t} dV &= \iiint\limits_{V_c} \left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dV.
\end{aligned} \tag{4}$$

Каждой компоненте скорости (u, v, w) в объеме тетраэдра V_c соответствует уравнение из (4). Масса узла K_i складывается из долей масс всех прилегающих к узлу тетраэдров.

Для перехода от объема к сумме по граням тетраэдра используется теорема Гаусса–Остроградского:

$$\iiint\limits_{V_c} (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}) dV = \oint\limits_{S_c} (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}) dS \approx \sum_{k=1}^{4} \boldsymbol{\sigma}^k \cdot \mathbf{n}^k A_k. \tag{5}$$

В выражении (5) k — номер грани тетраэдра, A_k — площадь k-й грани, $\mathbf{n}^k$ — внешняя единичная нормаль к ней, $\boldsymbol{\sigma}^k$ — тензор напряжений, усредненный по k-й грани.

Применимость уравнений (4), (5) к гетерогенным телам, в том числе к пористым средам, базируется на фундаментальном принципе аддитивности интегральных мер и выполнении условий сопряжения на внутренних границах раздела материалов Γ_{int}. Для представительного объема V, содержащего N материалов, полное изменение импульса определяется как сумма вкладов отдельных материалов:

$$\sum_{i=1}^{N} \iiint\limits_{V_i} (\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_i) dV_i = \sum_{i=1}^{N} \oint\limits_{S_i} (\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \mathbf{n}_i) dS_i, \tag{6}$$

где i — номер материала. Математическая корректность (6) обусловливается совместностью перемещений и динамическим равновесием:

$$[\mathbf{u}] = \mathbf{u}_\chi - \mathbf{u}_\theta = 0, \qquad x \in \Gamma_{\chi\theta},$$
$$[\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}] = (\boldsymbol{\sigma}_\chi - \boldsymbol{\sigma}_\theta) \cdot \mathbf{n}_{\chi\theta} = 0, \qquad x \in \Gamma_{\chi\theta}.$$

Здесь для произвольной пары тетраэдров χ указывает на материал одного из них (материал 1), θ — на материал другого (материал 2), $\Gamma_{\chi\theta}$ — граница между тетраэдрами (Рис. 1). При суммировании поверхностных интегралов по всем ячейкам внутренние интегралы по границам $\Gamma_{\chi\theta}$ взаимно уничтожаются вследствие выполнения третьего закона Ньютона в континуальной форме. Таким образом, глобальное уравнение баланса для гетерогенного

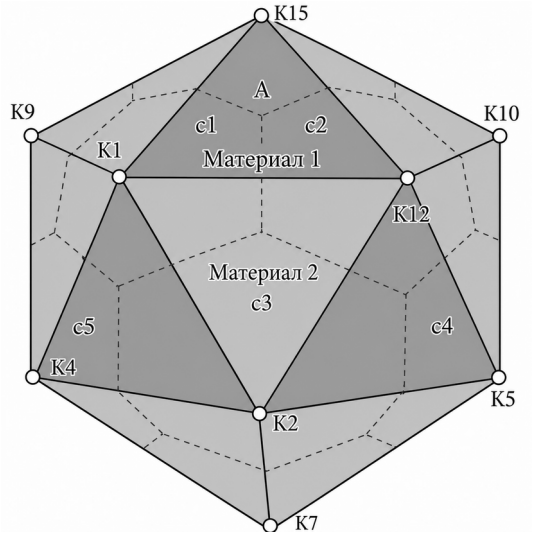

Рис. 1. Схема представительного объема, образованного соседними тетраэдрами (общий узел расположен в центре рисунка)

тела сводится к интегралу по внешней границе S, что делает его математически эквивалентным уравнению для гомогенного материала.

В данной постановке уравнения состояния и реологические модели пластичности и разрушения задаются локально для каждого материала внутри тетраэдральных ячеек. Гетерогенность среды учитывается в явном виде через пространственную вариацию плотности и других физико-механических параметров материалов. Благодаря совместному движению узлов на гранях элементов метод непосредственно принимает во внимание скачки импеданса на границах включений, что крайне важно для корректного описания динамики ударных волн в композитных структурах. Прямое численное моделирование позволяет проводить расчеты гетерогенного материала только на основе физико-механических свойств гомогенных компонентов гетерогенного материала.

4. Рассмотренные материалы и их геометрические характеристики

Эксперимент и валидация моделей материалов Д16Т, B_4C, CrB_2 подробно изложены в работе [41] о высокоскоростном нагружении массивной преграды налетающим сферическим телом из стали ШХ15 радиусом 0.24 см и массой 0.441 г. Свойства перечисленных материалов приведены в таблице 1, где ρ — плотность материала, C_0 — объемная скорость звука в материале, λ — наклон прямой ударной волны в соотношении Ренкина–Гюгонио, G — модуль сдвига, K — объемный модуль сжатия, Y — начальный предел текучести, σ_{sp} — предельное откольное напряжение.

Таблица 1. Параметры использованных материалов

Материал	ρ, г/см^3	C_0, км/с	λ	G, ГПа	K, ГПа	Y, ГПа	σ_sp, ГПа
ШХ15	7.81	4.59	1.38	80.0	163.91	3.2	8.8
Д16Т	2.77	5.39	1.32	27.70	60.01	-	-
B_4C	2.52	8.11	1.61	178.94	214.81	10.85	10.85
CrB_2	5.2	6.92	1.33	175.05	240.21	5.2	6.11

Процедура валидации реализована по каскадному принципу, основанному на постепенном усложнении конфигурации преграды. Исследованы три ее принципиально разных варианта:

1) Преграда из алюминия Д16Т в виде цилиндра диаметром 5 см и толщиной 4 см (натурные и вычислительные эксперименты под номерами 0.1 и 0.2).

2) Двухслойная преграда, состоящая из лицевой керамической пластины B_4C и алюминиевой подложки Д16Т. Подложка имела форму цилиндра диаметром 5 см и толщиной 3.15 см, керамическая пластина — форму диска диаметром 5 см и толщиной 0.85 см (эксперименты под номерами 1.1 и 1.2).

3) Гетерогенная металлокерамическая преграда из смеси B_4C + CrB_2 и алюминиевой подложки из Д16Т. Диаметры алюминиевой и металлокерамической частей составляли 5 см, а толщины изменялись в зависимости от концентрации CrB_2 в B_4C так, что общая масса преграды оставалась равной 215 г. Концентрация CrB_2 варьировалась: 3% CrB_2 (эксперименты под номерами 1.3 и 1.4); 10% CrB_2 (эксперименты 1.5 и 1.6); градиент CrB_2 от 3 до 17% (эксперимент 1.7); градиент CrB_2 от 17 до 3% (эксперимент 1.8).

Для алюминия Д16Т использована модель пластичности Джонсона–Кука (2) из работы [42] с параметрами разрушения, уточненными в соответствии с натурным экспериментом: $A = 360$ МПа, $B = 682$ МПа, $C = 0.0083$, $n = 0.73$, $D_1 = 0.36$, $D_2 = 0.142$, $D_3 = 1.23$, $D_4 = 0.007$.

Результаты численного моделирования и экспериментальные данные из работы [41] представлены в таблице 2, в которой приняты обозначения: U — начальная скорость удара; d_e, d_c и Δd — диаметр кратера в эксперименте, расчете и погрешность между данными эксперимента и расчета; h_e, h_c и Δh — общая глубина пробития в эксперименте, расчете и погрешность ее определения; V_e, V_c и ΔV — объем кратера в эксперименте, расчете и погрешность. При расчете погрешности разность относится к экспериментальному значению. Из таблицы видно, что максимальное расхождение числовых значений, полученных разными способами, не превышает 15%.

Предполагая, что рассчитанные поля интенсивности пластических деформаций адекватно воспроизводят натурный эксперимент в пределах выявленной погрешности, оценим динамический предел текучести по балансу кинетической энергии ударника и работы пластического деформирования. В рамках энергетического подхода примем допущение, что кинетическая энергия ударника расходуется на работу пластической деформации,

Таблица 2. Результаты эксперимента и моделирования

Номер опыта/ расчета	U, м/с	d_e, см	d_c, см	Δd, %	h_e, см	h_c, см	Δh, %	V_e, см^3	V_c, см^3	ΔV, %
0.1	1182	0.55	0.60	9	0.86	0.77	10	0.1575	0.1691	7.7
0.2	1533	0.59	0.62	5	0.95	0.93	2	0.1878	0.2050	9.1
1.1	1370	0.69	0.64	7	0.02	0.017	10	0.0033	0.0034	2
1.2	1641	0.60	0.64	7	0.147	0.160	8	0.0244	0.0254	4
1.3	1515	0.80	0.70	12	0.0875	0.083	5	0.0136	0.0132	3
1.4	1485	0.70	0.60	14	0.038	0.032	15	0.0087	0.0075	15
1.5	1517	1.00	0.90	10	0.11	0.12	9	0.0189	0.0208	10
1.6	1522	0.90	0.90	0	0.14	0.12	14	0.0196	0.0208	6
1.7	1510	0.86	0.73	15	0.08	0.08	0	0.0103	0.0094	9
1.8	1514	0.86	0.87	1	0.28	0.24	14	0.0543	0.0475	13

необходимую для образования кратера или формирования отверстия при условии, что при микросекундном масштабе взаимодействия ударника с преградой теплообмен с окружающей средой отсутствует и процесс можно рассматривать как локально адиабатический:

$$E_K = W_p = \int\limits_V \left(\int\limits_{\varepsilon^p_{eq}} Y_t(\varepsilon^p_{eq}) d\varepsilon^p_{eq} \right) dV,$$

где E_K — кинетическая энергия сферы, Y_t — динамический предел текучести преграды, ε^p_{eq} — интенсивность пластических деформаций (3).

5. Определение динамического предела текучести путем моделирования

Для идентификации динамического предела текучести воспользуемся валидированной численной моделью, достоверно описывающей эксперимент [41], который заключался в следующем. Для анализа эволюции полей напряжений, деформаций и диссипации кинетической энергии в расчетную область внедрялись виртуальные датчики (Рис. 2). Посредством датчиков отслеживались локальные параметры (Y, ε^p_{eq}) и вычислялись их интегральные характеристики в объеме зоны интенсивных пластических деформаций.

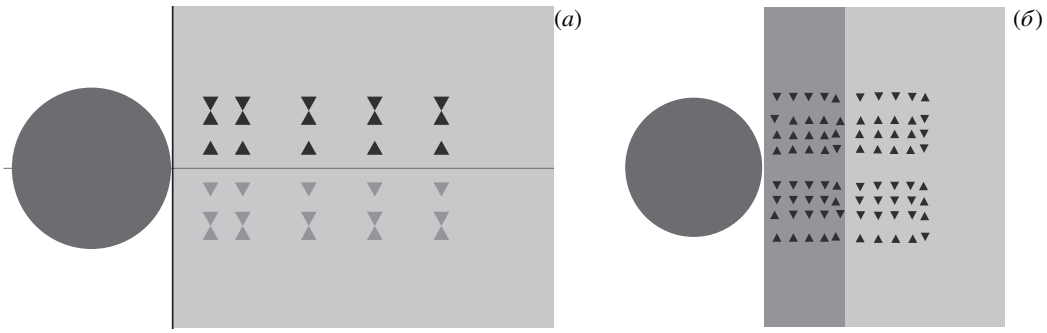

Рис. 2. Геометрическая модель задачи и схема расположения виртуальных датчиков: нагружение преграды из Д16Т (*а*); нагружение двуслойной преграды (*б*)

5.1. Моделирование нагружения преграды из Д16Т

В работе [41] эксперименты по нагружению монолитного образца из Д16Т обозначены номерами 0.1 и 0.2. По полученным профилограммам определены геометрические параметры кратеров (Табл. 2). Важно отметить, что сферический ударник в этих экспериментах не разрушался. Результаты моделирования нагружения Д16Т согласуются с экспериментальными данными: расхождения глубины, диаметра и объема кратера не превышают 10% (Рис. 3). При внедрении сферического тела в образце образуется вытянутый кратер (Рис. 4), форму которого можно аппроксимировать половиной эллипсоида (Рис. 5) с полуосями $a = h$ и $b = d/2$. Тогда для расчета объема кратера применима формула:

$$V_{calc} = \pi h d^2 / 6. \tag{7}$$

Проанализируем результаты экспериментов под номерами 0.1 и 0.2 и оценим динамический предел текучести Д16Т по соотношению, соответствующему методу, изложенному в [38] и базирующемуся на корреляции

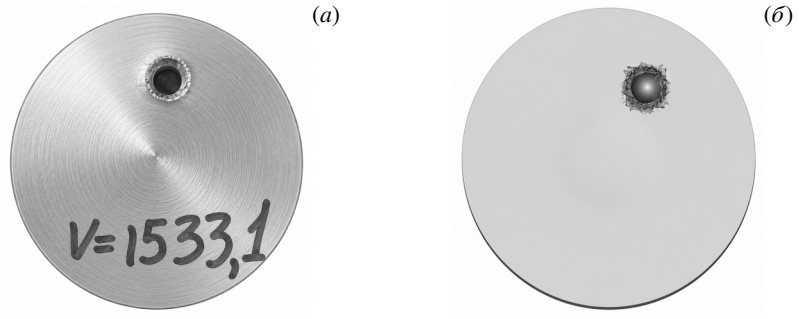

Рис. 3. Кратер в преграде из Д16Т: эксперимент 0.2 (*а*); трехмерный расчет (*б*)

Рис. 4. Трехмерное моделирование эксперимента 0.1 – кинограмма внедрения ударника в преграду в разные моменты времени t, мкс: 0.2 (*а*); 1 (*б*); 2 (*в*)

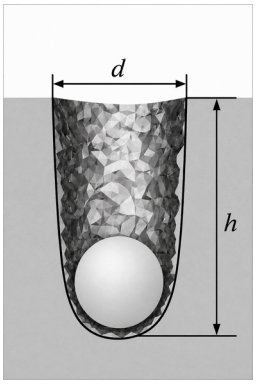

Рис. 5. Схема расчета среднего объема кратера на примере эксперимента 0.1

между объемом кратера, кинетической энергией взаимодействия и сопротивлением материала пластическому деформированию:

$$E_K/V = Y_t \varepsilon^p_{eq}. \tag{8}$$

На основе объемов кратеров, измеренных по профилограммам в экспериментах 0.1 и 0.2 (Табл. 2), по соотношению (8) рассчитано значение динамического предела текучести сплава Д16Т: $Y_t \approx 0.68$ ГПа. Полученное значение согласуется с данными [43, 44].

Рассмотрим результаты моделирования с применением виртуальных датчиков (Рис. 2), равномерно распределенных по всему объему деформируемой области для определения интегральных величин. Максимальное осредненное по объему значение динамического предела текучести материала Д16Т ($Y_t \approx 0.72$ ГПа) достигается при времени 9 мкс (Рис. 6). В этот же момент наблюдается выход интенсивности пластических деформаций на величину, равную 1.0 (Рис. 6), что инициирует фазу наиболее интенсивного торможения сферического тела. Рассчитанное значение динамического предела текучести 0.72 ГПа отличается от экспериментальной оценки (8) приблизительно на 6%.

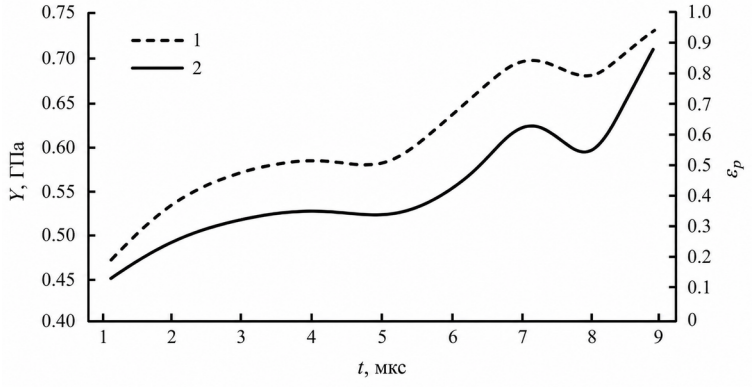

Рис. 6. Параметры образца из Д16Т, установленные с помощью виртуальных датчиков: *1* – динамический предел текучести Y_t; *2* – интенсивность пластических деформаций ε^p

5.2. Моделирование нагружения керамики B_4C

В экспериментах 1.1 и 1.2 исследовалась двухслойная преграда, состоящая из лицевой керамической пластины (карбид бора B_4C) и металлической подложки толщиной 3.15 см (алюминий Д16Т). На границе раздела слоев составной преграды (керамика/металлокерамика – подложка из Д16Т) склейка или иное адгезионное соединение отсутствовали, слои удерживались только за счет механического поджатия в оправе экспериментальной сборки без образования межфазного контакта, способного передавать растягивающие или сдвиговые напряжения.

Экспериментально установлено, что изготовленные керамические и металлокерамические образцы обладают пористостью порядка 20–30%. Этот структурный фактор является определяющим при формировании их динамического отклика, и его учет в численной модели обязателен. С этой целью была применена модель, явно описывающая гетерогенную структуру материала (Рис. 7). В рамках данной модели преграда рассматривалась как двухфазный композит, состоящий из твердотельной матрицы B_4C и распределенной в ней поровой фазы, объемное содержание которой соответствовало экспериментальным значениям.

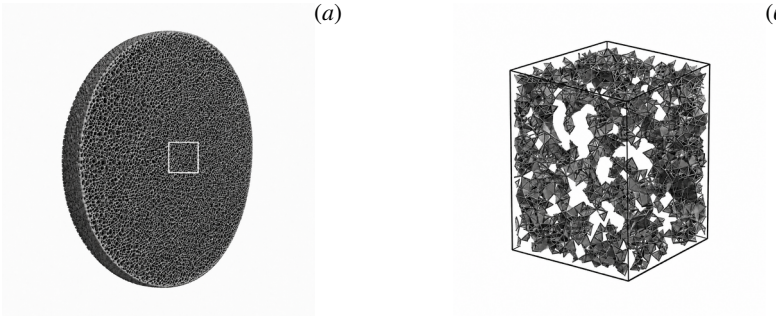

Рис. 7. Керамическая преграда (*а*) и вырезанный из нее представительный объем в увеличенном масштабе (*б*)

Создание расчетной пористой среды реализовано в программном коде «Reactor3D» (разработка ученых Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения РАН в Новосибирске). Точное распределение пор по объему композита из эксперимента не известно. В численной постановке задачи все поры задаются одинакового размера, определяемого выбранной расчетной сеткой, и подчиняются равномерному закону распределения по объему материала, при этом их суммарный объем соответствует пористости, зафиксированной в эксперименте. Чтобы оценить, насколько результаты чувствительны к конкретной пространственной реализации поровой структуры, проводились предварительные расчеты с реализациями равномерного и нормального распределений, а также распределения пор по закону Вейбулла с учетом сохранения пористости. Сравнение показало, что геометрические характеристики кратера и интегральные параметры процесса разрушения меняются незначительно, и расхождение между данными расчетов не превышает 3–5%. Следовательно, в рассматриваемом диапазоне свойств конкретная реализация закона распределения пор практически не влияет на результаты расчетов, и определяющим структурным параметром является именно объемная пористость материала.

Пористость порядка 30% обусловливает преимущественно хрупкий характер разрушения керамического слоя, в процессе которого диссипируется более 80% кинетической энергии ударника. В подложке из сплава Д16Т формируется незначительный кратер, объем которого мал в сравнении с общими масштабами повреждений преграды. Тем не менее, исходя из принципа аддитивности работы пластических сил и диссипируемой энергии, полный баланс системы может быть представлен в виде суммы компонент каждого слоя:

$$E_K = E_{L1} + E_{L2} = Y_{L1} V_{L1} \varepsilon^p_{eqL1} + Y_{L2} V_{L2} \varepsilon^p_{eqL2} = V^{crater} Y_t^{eff} \varepsilon_{eq}^{eff}, \qquad \varepsilon^p_{eqL1} = \varepsilon^p_{eqL2} = \varepsilon_{eq}^{eff}, \tag{9}$$

поскольку эффективная интенсивность пластических деформаций в обсуждаемом здесь случае определяется преимущественно откликом подложки из Д16Т, а послойный учет интенсивности деформаций замещается введением эффективных параметров всей преграды. В (9) обозначено: $L1$, $L2$ — номера слоев преграды, Y_L — предел текучести в соответствующем слое, ε^p_{eqL} — интенсивность пластических деформаций в соответствующем слое, V_L — объем зоны пластического нагружения в соответствующем слое, V^{crater} — объем образовавшегося кратера, $Y_t^{eff} \varepsilon_{eq}^{eff}$ — работа пластических деформаций на единицу объема всей слоистой конструкции преграды.

Разложим объемы кратера по слоям (Рис. 8). Преобразование выражения (9) приводит к соотношению:

$$Y_{L1} \omega_1 \xi_1 + Y_{L2} \omega_2 \xi_2 = Y_t^{eff}, \tag{10}$$

где i — номер слоя, $\omega_i = V_{Li}/V^{crater}$ — доля зоны пластического деформирования i-го слоя относительно общего объема кратера, $\xi_i = \varepsilon^p_{eqLi}/\varepsilon_{eq}^{eff}$ — нормированный коэффициент интенсивности пластических деформаций (отношение локальной деформации слоя к эффективной). Согласно (10) можно вычислить эффективный динамический предел текучести всей слоистой конструкции.

Предполагая, что деформационная картина в расчете соответствует эксперименту, проведем анализ интенсивности пластических деформаций (Рис. 9). Преграда из B_4C, как и ожидалось, практически не накапливает

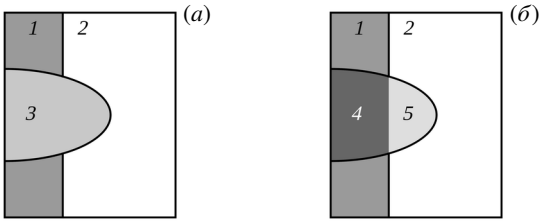

Рис. 8. Схематическое представление расчетных объемов кратера в слоистой преграде *1+2*: *3* – полный объем кратера V^{crater} (*а*); *4* и *5* – объемы кратера в первом (V_{L1}) и втором (V_{L2}) слоях; *1* – преграда конечной толщины, *2* – слой массивной преграды из Д16Т

пластических деформаций и теряет целостность преимущественно хрупко. Разрушение преграды происходит в течение 3 мкс, после чего основное сопротивление внедрению оказывает подложка из Д16Т.

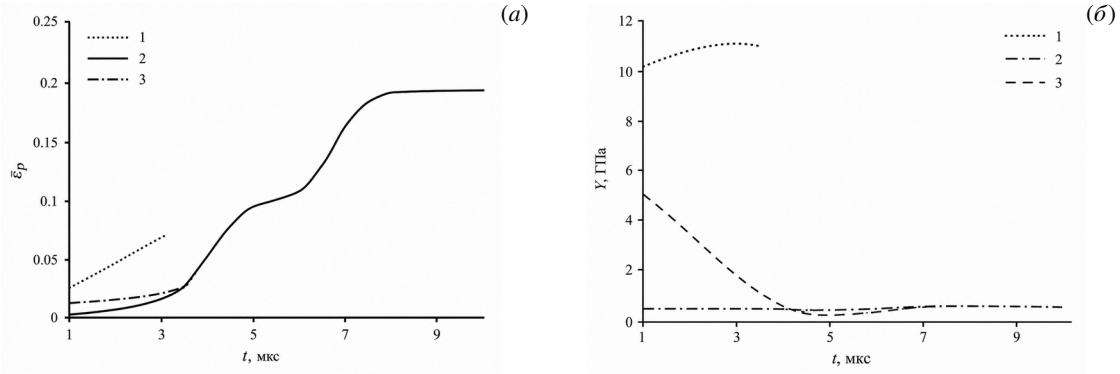

Рис. 9. Параметры составного материала B_4C + Д16Т, установленные при помощи виртуальных датчиков: интенсивность пластических деформаций (*а*); динамический предел текучести (*б*); *1* – слой B_4C; *2* – слой Д16Т; *3* – преграда B_4C+Д16Т

Поскольку в данном случае интенсивность пластических деформаций обусловливается вкладом подложки, следует выделить частный случай, когда интенсивность деформаций распределена равномерно: $\xi_i \approx 1$. В этих условиях определяющим фактором можно считать геометрический параметр — объем деформируемой зоны в каждом слое. Это допустимо, так как в керамике ввиду хрупкого разрушения интенсивность пластических деформаций мала, а в Д16Т основным механизмом поглощения остаточной энергии являются пластические деформации.

В силу того, что B_4C имеет пористую структуру, соотношение (10) необходимо уточнить с учетом концентрации пор:

$$Y_{B_4C}\omega_1(1-\beta_{pore})+Y_{D16T}\omega_2 = Y_t^{eff}, \tag{11}$$

где β_{pore} — доля пор в керамической преграде, Y_{B_4C}, Y_{D16T} — пределы текучести соответствующих материалов, ω_1, ω_2 — доли объемов кратеров в соответствующем слое относительно полного объема кратера.

На основе объемов кратеров, измеренных по профилограммам в экспериментах 1.1 и 1.2 (Табл. 2), и выражения (8) формула (11) позволяет вычислить эффективное значение динамического предела текучести слоистой преграды B_4C + Д16Т, а затем по соотношению (10) оценить вклад отдельных слоев. По полученному динамическому пределу текучести Д16Т при соответствующей интенсивности пластической деформации динамический предел текучести преграды определяется как $Y_t \approx 10.43$ ГПа. Формула (11) дает результат 10.85 ГПа, что имеет отклонение от эксперимента менее 2%.

5.3. Моделирование нагружения металлокерамики $B_4C + CrB_2$

По аналогии с монолитными керамическими панелями исследовано поведение комбинированных преград, состоящих из B_4C и CrB_2 и алюминиевой подложки Д16Т. Рассмотрение фокусировалось на двух типах структурной организации лицевого слоя.

1) Матричная структура с равномерным распределением: частицы CrB_2 рассредоточены гомогенно в объеме матрицы B_4C с варьируемой объемной долей 3% и 10% (эксперименты 1.3–1.4).
2) Градиентная структура: содержание армирующей фазы CrB_2 изменяется по толщине слоя в диапазоне от 3 до 17% (эксперименты 1.5–1.8).

Градиентные конфигурации имели два противоположных направления изменения свойств: с максимальной концентрацией диборида хрома (17%) на лицевой поверхности (навстречу сферическому телу) и с

минимальной (3%). Такой подход позволяет оценить влияние архитектуры распределения включений на эффективность диссипации импульса и характер разрушения высокотвердого слоя.

В работе [38] показано, что предел текучести гетерогенного материала можно выразить через объемные доли его компонентов. Поэтому воспользуемся соотношением:

$$\left[Y_{B_4C}\beta_{B_4C}+Y_{CrB_2}\beta_{CrB_2}\right](1-\beta_{pore})\omega_1+Y_{D16T}\omega_2=Y_t^{eff}, \tag{12}$$

где Y_{CrB_2} — предел текучести CrB_2, β_{B_4C}, β_{CrB_2} — объемные доли материалов в керамической преграде.

Поскольку в открытых источниках информация о величине динамического предела текучести CrB_2 не обнаружена, воспользуемся предположением, что соотношение (12) применимо к металлокерамическим преградам в той же мере, что и к рассмотренным выше керамическим материалам. Предполагая, что $Y_t \approx Y_t^{eff}$, из решения системы уравнений (8) и (12) получаем динамический предел текучести CrB_2, равный 5.2 ГПа.

Эффективный предел текучести высокотвердого слоя, найденный по измеренному объему в эксперименте (Табл. 2) с помощью соотношения (8), и эффективный предел текучести, определяемый формулой (12), сходятся в границах средней погрешности 15% (Табл. 3). Таким образом, формула (12) позволяет рассчитывать эффективный динамический предел текучести гетерогенной материальной системы по геометрическим параметрам ее области разрушения.

Таблица 3. Динамические пределы текучести композита, установленные в экспериментах 1.3–1.8

Объемная доля CrB_2, %	Y_t (8), ГПа	Y_t^{eff} (12), ГПа
0	10.43	10.85
3	7.3	7.8
10	4.9	7.3
3 $\rightarrow$ 17 (градиент)	6.1	6.81
17 $\rightarrow$ 3 (градиент)	6.2	6.82

6. Моделирование скоростной рентгенографии при помощи синхротронного излучения

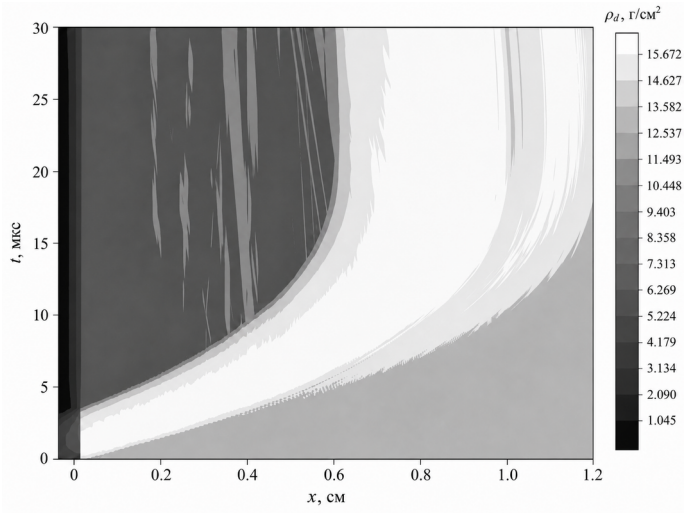

Рис. 10. Скоростная рентгенограмма нагружения образца из Д16Т

В программном комплексе «Reactor3D» реализован цифровой двойник экспериментальной станции «Экстремальное состояние вещества» Сибирского центра синхротронного и терагерцового излучения с применением накопителей на встречных электрон-позитронных пучках ВЭПП-3/ВЭПП-4 Института ядерной физики СО РАН. Цифровой двойник предоставляет возможность моделировать скоростную рентгенографию при помощи пучка синхротронного излучения (СИ) и находить массу материала (Рис. 10). Визуализация численного эксперимента по внедрению стального налетающего сферического тела из ШХ15 в алюминиевую преграду из Д16Т, полученная методом скоростной импульсной рентгенографии, представлена на диаграмме в координатах «граница x–время t». Цветовая индикация массовой плотности четко дифференцирует временные координаты взаимодействия тел за счет разности ударного импеданса. Плотное сферическое тело с массой на луче больше 14 г/см^2 отображается на рентгенограмме в светлых тонах, в то время как возмущенному материалу преграды с разрушенными элементами (с меньшей массой на луче) соответствуют темные тона.

Реализация алгоритма восстановления массы вещества ρ_d на луче СИ и экспериментальные исследования подробно представлены в работе [45].

Наблюдаемая кривизна границы соприкосновения материалов указывает на интенсивное торможение сферического тела вследствие сопротивления материала преграды. В интервале от 15 до 30 мкс характер взаимодействия меняется: на глубине 0.6. . . 0.8 см отмечается существенное падение мгновенной скорости сферического тела. Расширение фронта высокой плотности в этот период обусловлено совокупным влиянием деформации стального шарика и диссипации энергии в объеме преграды.

Полученная рентгенограмма предоставляет исходные данные для верификации величины динамического предела текучести, определяемого по численной модели: расчетная кривая замедления, полученная из наклона траектории, позволяет напрямую сопоставить теоретические силы сопротивления с экспериментальными

данными о потере кинетической энергии. Для количественного анализа результатов целесообразно использовать кинематическую кривую $h(t)$ (Рис. 11*а*), фиксирующую положение контактной границы в зависимости от времени. Численное дифференцирование данной функции времени дает профили мгновенной скорости $u(t)$ (Рис. 11*б*). Определение динамического предела текучести материала проводилось на основе методики, изложенной в [46], согласно которой скачкообразные изменения скорости связываются с прочностными характеристиками преграды.

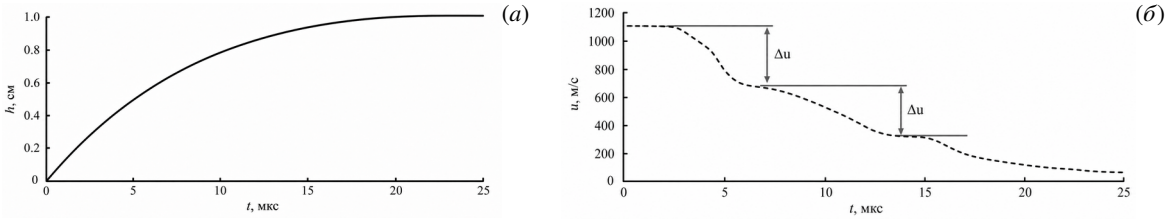

Рис. 11. Изменение во времени координаты $h(t)$ границы между налетающим сферическим телом и кратером в преграде (*а*) и скорости внедрения ударника $u(t)$ (*б*)

На графике скорости (Рис. 11*б*) выделены зоны ступенчатого торможения Δu, обусловленные циркуляцией волн разгрузки. Согласно расчету, динамический предел текучести материала преграды возрастает с 0.586 ГПа на начальном этапе до 0.686 ГПа в фазе интенсивного торможения ударника. Это подтверждает возможность идентификации параметров динамического упрочнения материала напрямую из данных скоростной рентгенографии.

Анализ зависимостей $h(t)$, $u(t)$ выявляет нестационарный характер проникания: резкие падения скорости сменяются участками стабилизации. До 5 мкс процесс протекает без влияния отраженных от тыльных поверхностей преграды и ударника волн разгрузки, что делает определяющими факторами внутреннюю динамику взаимодействия и волнообразование в ударнике. Эволюция характеристик напряженно-деформированного состояния в зоне контакта демонстрирует прямую корреляцию между интенсивностью пластических деформаций материала преграды и ростом сопротивления материала вследствие деформационного упрочнения (Рис. 6).

Замедление роста глубины кратера $h(t)$ после 10 мкс обусловлено выходом предела текучести на уровень 0.7 ГПа. Глубокая пластическая проработка материала обеспечивает эффективную диссипацию энергии ударника. Таким образом, дискретный характер торможения является внешним проявлением нелинейного упрочнения Д16Т, ограничивающим предельную глубину проникновения. Согласно теории Тейта–Алексеевского [47, 48], давление на контактной границе определяется балансом инерционных сил и динамической прочности. Характерные «ступени» падения скорости Δu, наблюдаемые на ее зависимости от времени (Рис. 11*б*), точно коррелируют с моментами роста интенсивности пластических деформаций (Рис. 6) и ростом динамического предела текучести Y_t.

Аналогично для комбинированных преград дополнительно проведено моделирование скоростной рентгенографии при помощи пучка СИ (Рис. 12). Как и в случае нагружения преграды из Д16Т, удается получить визуализацию изменения границы между налетающим сферическим телом и поверхностью образующегося кратера. Характерной особенностью взаимодействия ударника с многослойными структурами является образование выраженного зазора между лицевым керамическим (Рис. 12*а*) или металлокерамическим (Рис. 12*б*) слоем и подложкой из Д16Т по причине отсутствия адгезионного соединения. Анализ численных результатов выявил специфический двухстадийный механизм формирования кратера. Сферическое налетающее тело затормаживается в высокотвердом лицевом слое (керамике или металлокерамике), однако переданный импульс инициирует движение потока фрагментированных частиц разрушенного слоя в сторону подложки. Последующее формирование каверны в алюминиевом слое Д16Т происходит преимущественно

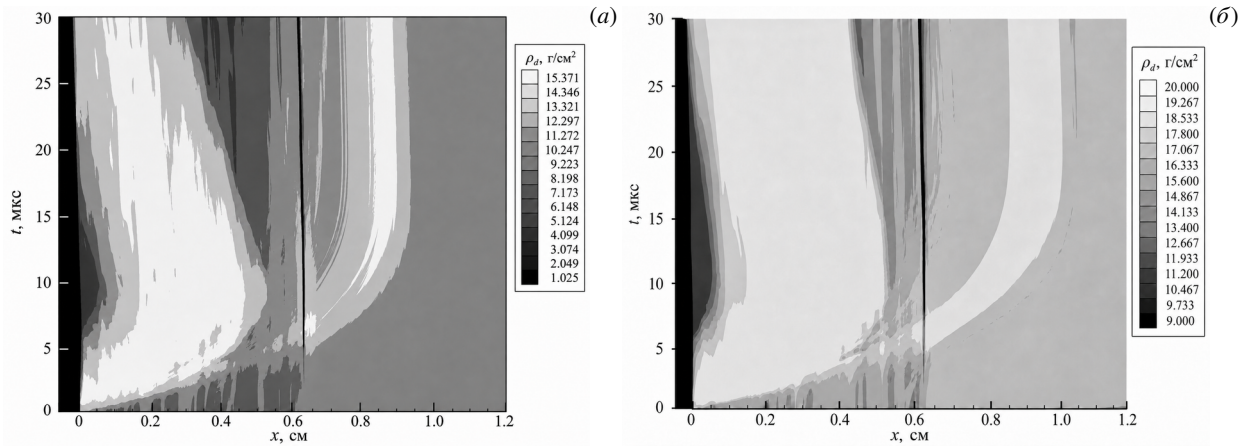

Рис. 12. Скоростная рентгенограмма нагружения образца: B_4C + Д16Т (*а*); CrB_2 + B_4C + Д16Т (*б*)

за счет воздействия именно фрагментированного облака. Подробная визуализация процесса внедрения на реконструированных рентгенограммах подтверждает, что применение метода синхротронной рентгенографии в натурных экспериментах может позволить проводить прямую идентификацию ударно-волновых и прочностных характеристик перспективных композитных преград.

7. Выводы

1) Предложен и обоснован энергетический подход к оценке динамической прочности слоистых структур, основанный на принципе аддитивности работы пластических деформаций. Выведено аналитическое соотношение, которое впервые позволило с высокой точностью определить эффективный динамический предел текучести гетерогенной материальной системы по геометрическим параметрам области ее разрушения (по объему кратера).

2) Показано, что используемый подход дает возможность получить динамический предел текучести алюминиевого сплава Д16Т с расхождением не более 10% относительно экспериментальной оценки и рассчитать динамический предел текучести керамики CrB_2 в условиях ударного нагружения, поскольку способен изолировать вклад высокотвердой фазы в общее сопротивление преграды прониканию.

3) Установлено, что внедрение в комбинированные слоистые преграды (B_4C + Д16Т и CrB_2 + B_4C + Д16Т) протекает по двухстадийному сценарию. Основная часть кинетической энергии налетающего сферического тела диссипируется в высокотвердом лицевом слое, в то время как формирование кратера в алюминиевой подложке происходит за счет воздействия облака фрагментированных частиц разрушенной керамики, а не вследствие прямого контакта со сферическим телом, что и наблюдается на реконструированных скоростных рентгенограммах.

4) Показано, что сочетание расчетных методов и скоростной импульсной рентгенографии — эффективный инструмент для верификации определяющих соотношений новых конструкционных материалов. Предложенный подход требует существенно меньшего объема натурных испытаний при проектировании новых гетерогенных материалов.

5) Программный комплекс «Reactor3D» эффективен и точен в применении: воспроизводит приведенные геометрические параметры кратеров с расхождениями не более 15%.

Исследование поддержано Российским научным фондjм (проект № 25-29-01202).

Литература

1. *Руктуев А.А.*, *Лазуренко Д.В.*, *Колубаев Е.А.*, *Огнева Т.С.*, *Малютина Ю.Н.* Технологии аддитивного производства. Новосибирск: НГТУ, 2023. 99 с.
2. *Фомин В.М.*, *Маликов А.Г.*, *Голышев А.А.*, *Булина Н.В.*, *Гулов М.А.*, *Витошкин И.Е.*, *Брусенцева Т.А.*, *Филиппов А.А.*, *Мишин А.В.* Структурно-фазовое состояние и механические свойства титаноматричного композита на основе сплава Ti64 и керамики TiB_2, полученного при лазерной наплавке // Физическая мезомеханика. 2023. Т. 26, № 5. С. 17–32. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_5_17
3. *Никитин И.С.*, *Голубев В.И.*, *Никитин А.Д.*, *Стратула Б.А.* Численное моделирование усталостного разрушения легких сплавов, полученных по аддитивной технологии // Вычислительная механика сплошных сред. 2025. Т. 18, № 2. С. 173–189. DOI: 10.7242/1999-6691/2025.18.2.13
4. *Крохалев А.В.*, *Харламов В.О.*, *Кузьмин С.В.*, *Лысак В.И.* Основы технологии получения износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой взрывным прессованием // Известия вузов. Цветная металлургия. 2018. № 3. С. 68–83. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-3-68-83
5. *Бузюркин А.Е.*, *Краус Е.И.*, *Лукьянов Я.Л.* Ударно-волновое компактирование гетерогенных материалов // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98, № 7. С. 1762–1775.
6. *Савиных А.С.*, *Mandel K.*, *Разоренов С.В.*, *Kruger L.* Влияние содержания кобальта на прочностные свойства керамики на основе карбида вольфрама при динамических нагрузках // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 3. С. 368–373. DOI: 10.21883/JTF.2018.03.45592.2267
7. *Колубаев Е.А.*, *Рубцов В.Е.*, *Чумаевский А.В.*, *Астафурова Е.Г.* Научные подходы к микро-, мезо- и макроструктурному дизайну объемных металлических и полиметаллических материалов с использованием метода электронно-лучевого аддитивного производства // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 4. С. 5–18. DOI: 10.55652/1683-805X_2022_25_4_5
8. *Зыкова А.П.*, *Николаева А.В.*, *Воронцов А.В.*, *Чумаевский А.В.*, *Никонов С.Ю.*, *Москвичев Е.Н.*, *Гурьянов Д.А.*, *Савченко Н.Л.*, *Колубаев Е.А.*, *Тарасов С.Ю.* Влияние концентрации меди на эволюцию зеренной структуры сплава Ti-6Al-4V при электронно-лучевом аддитивном производстве // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25, № 6. С. 5–25. DOI: 10.55652/1683-805X_2022_25_6_5
9. *Плехов О.А.*, *Костина А.А.*, *Изюмов Р.И.*, *Изюмова А.Ю.* Конечно-элементный анализ остаточных напряжений, возникающих в результате лазерной ударной проковки титанового сплава ВТ6 // Вычислительная механика сплошных сред. 2022. Т. 15, № 2. С. 171–184. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.2.13
10. *Бартоломей М.Л.*, *Изюмова А.Ю.*, *Гачегова Е.А.*, *Вшивков А.Н.*, *Плехов О.А.*, *Swaroop S.* Численный анализ остаточных напряжений при двухстороннем симметричном лазерном ударном упрочнении тонких пластин из титанового сплава ВТ6 // Вычислительная механика сплошных сред. 2024. Т. 17, № 4. С. 411–421. DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.4.33

11. *Poole L.L.*, *Gonzales M.*, *French M.R.*, *Yarberry W.A.*, *Moustafa A.R.*, *Cordero Z.C.* Hypervelocity impact of PrintCast 316L/A356 composites // International Journal of Impact Engineering. 2020. Vol. 136. 103407. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103407
12. *Kraus A.*, *Buzyurkin A.*, *Shabalin I.*, *Kraus E.* Numerical Modelling of High-Speed Loading of Periodic Interpenetrating Heterogeneous Media with Adapted Mesostructure // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 12. 7187. DOI: 10.3390/app13127187
13. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Т. 1, 2: в 2 т. / под ред. В.Е. Панин. Новосибирск: Наука, 1995. 298+320
14. *Mikushina V.A.*, *Smolin I.Y.*, *Sidorenko Y.N.* Numerical modeling and prediction of mechanical properties of ceramic composite // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 919, no. 1. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012013
15. *Romanova V.*, *Balokhonov R.* A method of step-by-step packing and its application in generating 3D microstructures of polycrystalline and composite materials // Engineering with Computers. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 241–250. DOI: 10.1007/s00366-019-00820-2
16. *Wriggers P.*, *Moftah S.O.* Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour // Finite Elements in Analysis and Design. 2006. Vol. 42, no. 7. P. 623–636. DOI: 10.1016/j.finel.2005.11.008
17. *Shilko E.V.*, *Smolin A.Y.*, *Dimaki A.V.*, *Eremina G.M.* Particle-Based Approach for Simulation of Nonlinear Material Behavior in Contact Zones // Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems. Springer Science, Business Media Deutschland GmbH, 2021. P. 67–89. DOI: 10.1007/978-3-030-60124-9_4
18. *Skripnyak V.A.*, *Skripnyak E.G.*, *Kozulin A.A.*, *Skripnyak V.V.*, *Korobenkov M.V.* Computer simulation of the relation between mechanical behavior and structural evolution of oxide ceramics under dynamic loading // Russian Physics Journal. 2009. Vol. 52, no. 12. P. 1300–1308. DOI: 10.1007/s11182-010-9371-8
19. *Radchenko A.V.*, *Batuev S.P.*, *Radchenko P.A.*, *Melnikov A.Y.* Modeling of the Interaction of a Composite Orthotropic Plate with Ice Particles // Russian Physics Journal. 2023. Vol. 66, no. 7. P. 763–770. DOI: 10.1007/s11182-023-03003-1
20. *Кобылкин И.Ф.*, *Селиванов В.В.* Материалы и структуры легкой бронезащиты. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 192 с.
21. *Bannikova I.A.*, *Saveleva N.V.*, *Bannikov M.V.*, *Uvarov S.V.*, *Naimark O.B.* Dynamic Fragmentation of Ceramics Based on Carbon and Silicon Carbide // Russian Physics Journal. 2024. Vol. 67, no. 9. P. 1442–1448. DOI: 10.1007/s11182-024-03266-2
22. *Фомин В.М.*, *Голышев А.А.*, *Косарев В.Ф.*, *Маликов А.Г.*, *Оришич А.М.*, *Ряшин Н.С.*, *Филиппов А.А.*, *Шикалов В.С.* Создание гетерогенных материалов на основе порошков B_4C и Ni методом холодного газодинамического напыления с последующим послойным лазерным воздействием // Прикладная механика и техническая физика. 2017. Т. 58, № 5. С. 218–227. DOI: 10.15372/PMTF20170522
23. *Фомин В.М.*, *Голышев А.А.*, *Косарев В.Ф.*, *Маликов А.Г.*, *Оришич А.М.*, *Филиппов А.А.* Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и B_4C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22, № 4. С. 5–15. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-14001
24. *Lee M.*, *Park S.*, *Jo I.*, *Lee S.* Analysis of metal matrix composite (MMC) applied armor system // Procedia Engineering. 2017. Vol. 204. P. 100–107. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.761
25. *Фомин В.М.*, *Краус Е.И.*, *Шабалин И.И.*, *Краус А.Е.*, *Бузюркин А.Е.* Высокоскоростное взаимодействие гетерогенных материалов. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2025. 437 с. DOI: 10.53954/9785605099697
26. *York Duran J.L.*, *Kuhn C.*, *Müller R.* Modeling of the Effective Properties of Metal Matrix Composites Using Computational Homogenization // Applied Mechanics and Materials. 2017. Vol. 869. P. 94–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.869.94
27. *Радченко П.А.*, *Батуев С.П.*, *Радченко А.В.* Влияние биметаллической оболочки и вращения на взаимодействие ударника с металлокерамической полубесконечной преградой // Вычислительная механика сплошных сред. 2025. Т. 18, № 1. С. 32–44. DOI: 10.7242/1999-6691/2025.18.1.3
28. *Батуев С.П.*, *Радченко П.А.*, *Радченко А.В.* Моделирование разрушения пластины из градиентного материала на основе стали и титана при ударно-волновом нагружении // Прикладная механика и техническая физика. 2025. Т. 66, № 5. С. 178–187. DOI: 10.15372/PMTF202515665
29. *Кристенсен Р.М.* Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 384 с.
30. *Шермергор Т.Д.* Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.
31. *Победря Б.Е.* Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 336 с.
32. *Болотин В.В.*, *Новичков Ю.Н.* Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980. 376 с.
33. *Бахвалов Н.С.*, *Панасенко Г.П.* Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука, 1984. 352 с.
34. *Saucedo-Mora L.*, *Marrow T.J.* FEMME: A multi-scale Finite Element Microstructure MEshfree fracture model for quasi-brittle materials with complex microstructures // Engineering Fracture Mechanics. 2015. Vol. 147. P. 355–372. DOI: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2015.05.059
35. *Краус А.Е.*, *Краус Е.И.*, *Шабалин И.И.* Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024684051. Программный комплекс моделирования процесса динамического взаимодействия гомогенных и гетерогенных деформируемых твердых тел "Reactor3D". Российская Федерация, ИТПМ СО РАН, 2024
36. *Wilkins M.L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. 246 p. Scientific Computation. DOI: 10.1007/978-3-662-03885-7

ISSN: 1999-6691 e-ISSN: 2782-3709 DOI: 10.7242/1999-6691/2026.19.3.19

37. *Краус А.Е.*, *Бузюркин А.Е.*, *Шабалин И.И.*, *Краус Е.И.* Идентификация свойств и величины предельного откольного разрушения гетерогенных материалов в динамических процессах // Физическая мезомеханика. 2024. Т. 27, № 1. С. 64–80. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_1_64-80

38. *Бузюркин А.Е.*, *Краус А.Е.*, *Краус Е.И.*, *Шабалин И.И.* Определение эффективного динамического предела текучести гетерогенных материалов // Прикладная механика и техническая физика. 2024. Т. 65, № 3. С. 142–151. DOI: 10.15372/PMTF202315399

39. *Tuler F.R.*, *Butcher B.M.* A criterion for the time dependence of dynamic fracture // International Journal of Fracture Mechanics. 1968. Vol. 4, no. 4. P. 431–437. DOI: 10.1007/BF00186808

40. *Johnson G.R.*, *Cook W.H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21, no. 1. P. 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

41. *Филиппов А.А.*, *Краус А.Е.*, *Дик Д.В.* Моделирование процессов ударного нагружения гетерогенных материалов на основе карбида бора с добавлением диборида хрома (CrB_2) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2026. Т. 19, № 1. С. 42–53. DOI: 10.14529/mmp260105

42. *Lesuer D.R.* Experimental Investigations of Material Models for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum: Technical report / Lawrence Livermore National Laboratory. 2000. P. 41. DOT/FAA/AR–00/25

43. *Канель Г.И.*, *Разоренов С.В.*, *Уткин А.В.*, *Фортов В.Е.* Экспериментальные профили ударных волн в конденсированных веществах. М.: Физматлит, 2008. 246 с.

44. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 531.

45. *Краус А.Е.*, *Бузюркин А.Е.*, *Девушкин М.П.*, *Кашкаров А.О.*, *Краус Е.И.*, *Прууэл Э.Р.*, *Тен К.А.*, *Фомин В.М.*, *Шабалин И.И.* Моделирование скоростной рентгенографии с источником синхротронного излучения для задач динамического взаимодействия твердых гетерогенных тел // Физика горения и взрыва. 2026. DOI: 10.15372/FGV2026.9653

46. *Медведев А.Е.*, *Краус Е.И.*, *Шабалин И.И.* Решения задач о внедрении компактных и удлиненных тел в полупространство // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98, № 7. С. 1776–1786.

47. *Алексеевский В.П.* К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2, № 2. С. 99–106.

48. *Tate A.* Further results in the theory of long rod penetration* // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1969. Vol. 17, no. 3. P. 141–150. DOI: 10.1016/0022-5096(69)90028-3

Сведения об авторах:

Краус Александр Евгеньевич, кфмн, нс, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (ИТПМ СО РАН), 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: akraus@itam.nsc.ru; ORCID: 0000-0002-2426-0558

Бузюркин Андрей Евгеньевич (корр.), кфмн, зав.лаб., ИТПМ СО РАН; e-mail: buzjura@itam.nsc.ru; ORCID: 0000-0001-8164-8789

Шабалин Иван Иванович, кфмн, снс, ИТПМ СО РАН; e-mail: shabalin@itam.nsc.ru; ORCID: 0000-0002-4447-2558

Краус Евгений Иванович, дфмн, директор, ИТПМ СО РАН; e-mail: kraus@itam.nsc.ru; ORCID: 0000-0001-5478-1293

Research article

Determination of the dynamic yield strength of heterogeneous barriers with a given porosity

A.E. Kraus, A.E. Buzyurkin, I.I. Shabalin, E.I. Kraus

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

The effectiveness of modern protective structures that are based on high-hardness materials and lightweight alloys is governed by the dynamic response of a system under high-velocity loading. Gaining deeper insight into the energy-dissipation mechanisms in such targets requires the development of accurate methods for the real-time experimental measurement and validation of the material penetration and failure models. This work investigates the dynamic interaction of a spherical steel body with monolithic and composite targets. The values of dynamic yield strength of the materials constituting the ceramic and cermet layered systems were determined, and the failure mechanisms of the latter were characterized. The results of numerical simulation, which were obtained using the Russian software package "Reactor3D", were compared against the crater depth profiles measured in high-velocity field experiments. Analysis of the penetration velocity revealed a stepwise deceleration of the spherical striker, which is consistent with the wave nature of dynamic resistance of the material. The dynamic yield strength of the aluminum substrate was found to increase substantially

during the phase of intense deformation. In the composite targets, a two-stage crater formation mechanism was identified: the high-hardness front layer (ceramic or cermet) absorbs the main impulse and breaks into fragments, after which the flow of high-velocity debris of the failed layer excavates a cavity in the substrate. It is shown that the proposed approach can be used to estimate the dynamic yield strength of the D16T aluminum alloy to within 10% of the experimental value, and to compute the effective dynamic yield strength of the composite layered target.

Keywords: additive materials, layered barriers, dynamic yield strength, high-speed interaction, shock waves, equivalent plastic strain, Johnson–Cook model

Received: 11.06.2026 / *Accepted:* 13.08.2026 / *Published online:* 31.10.2026

Acknowledgements

The research was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-29-01202).

References

1. *Ruktuyev A.A.*, *Lazurenko D.V.*, *Kolubayev Y.A.*, *Ogneva T.S.*, *Malyutina Y.N.* Tekhnologii additivnogo proizvodstva. Novosibirsk: NGTU, 2023. 99 p.
2. *Fomin V.M.*, *Malikov A.G.*, *Golyshev A.A.*, *Bulina N.V.*, *Gulov M.A.*, *Vitoshkin I.E.*, *Brusentseva T.A.*, *Filippov A.A.*, *Mishin A.V.* Structural-Phase State and Mechanical Properties of a Laser Cladding Titanium Matrix Composite Based on Ti64 Alloy and TiB_2 Ceramics. Physical Mesomechanics. 2024. Vol. 27, no. 1. P. 1–15. DOI: 10.1134/S1029959924010016
3. *Nikitin I.S.*, *Golubev V.I.*, *Nikitin A.D.*, *Stratula B.A.* Numerical modeling of fatigue fracture in the light alloys produced by additive technology. Computational Continuum Mechanics. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 173–189. DOI: 10.7242/1999-6691/2025.18.2.13
4. *Krokhalev A.V.*, *Kharlamov V.O.*, *Kuzmin S.V.*, *Lysak V.I.* Fundamentals of wear-resistant coating production from chromium carbide powder mixture with binder metal by explosive compaction. Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy. 2018. No. 3. P. 68–83. DOI: 10.17073/0021-3438-2018-3-68-83
5. *Buzyurkin A.E.*, *Kraus E.I.*, *Luk'yanov Y.L.* Shock-Wave Compaction of Heterogeneous Materials. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2025. Vol. 98, no. 7. P. 1782–1795. DOI: 10.1007/s10891-026-03259-7
6. *Savinykh A.S.*, *Mandel K.*, *Razorenov S.V.*, *Krüger L.* The Influence of the Cobalt Content on the Strength Properties of Tungsten Carbide Ceramics under Dynamic Loads. Technical Physics. 2018. Vol. 63, no. 3. P. 357–362. DOI: 10.1134/S1063784218030210
7. *Kolubaev E.A.*, *Rubtsov V.E.*, *Chumaevsky A.V.*, *Astafurova E.G.* Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. Physical Mesomechanics. 2022. Vol. 25, no. 6. P. 479–491. DOI: 10.1134/S1029959922060017
8. *Zykova A.P.*, *Nikolaeva A.V.*, *Vorontsov A.V.*, *Chumaevskii A.V.*, *Nikonov S.Y.*, *Moskvichev E.N.*, *Gurianov D.A.*, *Savchenko N.L.*, *Kolubaev E.A.*, *Tarasov S.Y.* Effect of Copper Content on Grain Structure Evolution in Additively Manufactured Ti-6Al-4V Alloy. Physical Mesomechanics. 2023. Vol. 26, no. 2. P. 107–125. DOI: 10.1134/S1029959923020017
9. *Plekhov O.A.*, *Kostina A.A.*, *Iziumov R.I.*, *Iziumova A.Y.* Finite-element analysis of residual stresses in the TC4 titanium alloy treated by laser shock peening. Computational Continuum Mechanics. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 171–184. DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.2.13
10. *Bartolomei M.L.*, *Iziumova A. Yu.*, *Gachegova E.A.*, *Vshivkov A.N.*, *Plekhov O.A.*, *Swaroop S.* Numerical analysis of residual stresses in thin TI-6AL-4V alloy plates subjected to double-sided symmetric laser shock treatment. Computational Continuum Mechanics. 2024. Vol. 17, no. 4. P. 411–421. DOI: 10.7242/1999-6691/2024.17.4.33
11. *Poole L.L.*, *Gonzales M.*, *French M.R.*, *Yarberry W.A.*, *Moustafa A.R.*, *Cordero Z.C.* Hypervelocity impact of PrintCast 316L/A356 composites. International Journal of Impact Engineering. 2020. Vol. 136. 103407. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103407
12. *Kraus A.*, *Buzyurkin A.*, *Shabalin I.*, *Kraus E.* Numerical Modelling of High-Speed Loading of Periodic Interpenetrating Heterogeneous Media with Adapted Mesostructure. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 12. 7187. DOI: 10.3390/app13127187
13. Physical mesomechanics and computer-aided design of materials: in two volumes: in 2 vols. / ed. by V.E. Panin. Novosibirsk: Nauka, 1995. 298+320
14. *Mikushina V.A.*, *Smolin I.Y.*, *Sidorenko Y.N.* Numerical modeling and prediction of mechanical properties of ceramic composite. Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 919, no. 1. 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/919/1/012013
15. *Romanova V.*, *Balokhonov R.* A method of step-by-step packing and its application in generating 3D microstructures of polycrystalline and composite materials. Engineering with Computers. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 241–250. DOI: 10.1007/s00366-019-00820-2
16. *Wriggers P.*, *Moftah S.O.* Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. Finite Elements in Analysis and Design. 2006. Vol. 42, no. 7. P. 623–636. DOI: 10.1016/j.finel.2005.11.008

©Authors 2026 Translation of the original article in Russian This is an open access article under the CC BY 4.0 license

17. *Shilko E.V.*, *Smolin A.Y.*, *Dimaki A.V.*, *Eremina G.M.* Particle-Based Approach for Simulation of Nonlinear Material Behavior in Contact Zones. Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems. Springer Science, Business Media Deutschland GmbH, 2021. P. 67–89. DOI: 10.1007/978-3-030-60124-9_4

18. *Skripnyak V.A.*, *Skripnyak E.G.*, *Kozulin A.A.*, *Skripnyak V.V.*, *Korobenkov M.V.* Computer simulation of the relation between mechanical behavior and structural evolution of oxide ceramics under dynamic loading. Russian Physics Journal. 2009. Vol. 52, no. 12. P. 1300–1308. DOI: 10.1007/s11182-010-9371-8

19. *Radchenko A.V.*, *Batuev S.P.*, *Radchenko P.A.*, *Melnikov A.Y.* Modeling of the Interaction of a Composite Orthotropic Plate with Ice Particles. Russian Physics Journal. 2023. Vol. 66, no. 7. P. 763–770. DOI: 10.1007/s11182-023-03003-1

20. *Kobylkin I.F.*, *Selivanov V.V.* Materialy i struktury legkoy bronezashchity. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2014. 192 p.

21. *Bannikova I.A.*, *Saveleva N.V.*, *Bannikov M.V.*, *Uvarov S.V.*, *Naimark O.B.* Dynamic Fragmentation of Ceramics Based on Carbon and Silicon Carbide. Russian Physics Journal. 2024. Vol. 67, no. 9. P. 1442–1448. DOI: 10.1007/s11182-024-03266-2

22. *Fomin V.M.*, *Golyshev A.A.*, *Kosarev V.F.*, *Malikov A.G.*, *Orishich A.M.*, *Ryashin N.S.*, *Filippov A.A.*, *Shikalov V.S.* Creation of heterogeneous materials on the basis of B_4C and Ni powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017. Vol. 58, no. 5. P. 947–955. DOI: 10.1134/S0021894417050224

23. *Fomin V.M.*, *Golyshev A.A.*, *Kosarev V.F.*, *Malikov A.G.*, *Orishich A.M.*, *Filippov A.A.* Deposition of Cermet Coatings on the Basis of Ti, Ni, WC, and B_4C by Cold Gas Dynamic Spraying with Subsequent Laser Irradiation. Physical Mesomechanics. 2020. Vol. 23, no. 4. P. 291–300. DOI: 10.1134/S1029959920040025

24. *Lee M.*, *Park S.*, *Jo I.*, *Lee S.* Analysis of metal matrix composite (MMC) applied armor system. Procedia Engineering. 2017. Vol. 204. P. 100–107. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.761

25. *Fomin V.M.*, *Kraus Y.I.*, *Shabalin I.I.*, *Kraus A.Y.*, *Buzyurkin A.Y.* Vysokoskorostnoye vzaimodeystviye geterogennykh materialov. Novosibirsk: Sibirskoye otdeleniye RAN, 2025. 437 p. DOI: 10.53954/9785605099697

26. *York Duran J.L.*, *Kuhn C.*, *Müller R.* Modeling of the Effective Properties of Metal Matrix Composites Using Computational Homogenization. Applied Mechanics and Materials. 2017. Vol. 869. P. 94–111. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.869.94

27. *Radchenko P.A.*, *Batuev S.P.*, *Radchenko A.V.* Influence of a bimetallic shell and rotation on the interaction of a striker with a metal-ceramic semi-infinite barrier. Computational Continuum Mechanics. 2025. Vol. 18, no. 1. P. 32–44. DOI: 10.7242/1999-6691/2025.18.1.3

28. *Batuev S.P.*, *Radchenko P.A.*, *Radchenko A.V.* Simulation of Shock-Induced Fracture of a Plate Made of a Functionally Graded Material Based on Steel and Titanium. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2025. Vol. 66, no. 5. P. 979–986. DOI: 10.1134/S0021894425700531

29. *Christensen R.M.* Mechanics of composite materials. Wiley-Interscience, New York, NY, 1979. 348 p.

30. *Shermergor T.D.* Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred. M.: Nauka, 1977. 400 p.

31. *Pobedrya B.Y.* Mekhanika kompozitsionnykh materialov. M.: Izd-vo MGU, 1984. 336 p.

32. *Bolotin V.V.*, *Novichkov Y.N.* Mekhanika mnogosloynykh konstruktsiy. M.: Mashinostroyeniye, 1980. 376 p.

33. *Bakhvalov N.S.*, *Panasenko G.P.* Homogenisation: Averaging Processes in Periodic Media: Mathematical Problems in the Mechanics of Composite Materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. 366 p. DOI: 10.1007/978-94-009-2247-1

34. *Saucedo-Mora L.*, *Marrow T.J.* FEMME: A multi-scale Finite Element Microstructure MEshfree fracture model for quasi-brittle materials with complex microstructures. Engineering Fracture Mechanics. 2015. Vol. 147. P. 355–372. DOI: 10.1016/J.ENGFRACMECH.2015.05.059

35. *Kraus A.Y.*, *Kraus Y.I.*, *Shabalin I.I.* Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2024684051. Programmnyy kompleks modelirovaniya protsessa dinamicheskogo vzaimodeystviya gomogennykh i geterogennykh deformiruyemykh tverdykh tel "Reactor3D". Rossiyskaya Federatsiya, ITPM SO RAN, 2024

36. *Wilkins M.L.* Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Springer Berlin Heidelberg, 1999. 246 p. Scientific Computation. DOI: 10.1007/978-3-662-03885-7

37. *Kraus A.E.*, *Buzyurkin A.E.*, *Shabalin I.I.*, *Kraus E.I.* Identification of the Spallation Properties and Ultimate Spall Strength of Heterogeneous Materials in Dynamic Processes. Physical Mesomechanics. 2024. Vol. 27, no. 3. P. 269–284. DOI: 10.1134/S1029959924030044

38. *Buzyurkin A.E.*, *Kraus A.E.*, *Kraus E.I.*, *Shabalin I.I.* Determination of the effective dynamic yield strength of heterogeneous materials. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2024. Vol. 65, no. 3. P. 519–527. DOI: 10.1134/S0021894424030131

39. *Tuler F.R.*, *Butcher B.M.* A criterion for the time dependence of dynamic fracture. International Journal of Fracture Mechanics. 1968. Vol. 4, no. 4. P. 431–437. DOI: 10.1007/BF00186808

40. *Johnson G.R.*, *Cook W.H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21, no. 1. P. 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

41. *Filippov A.A.*, *Kraus A.E.*, *Dik D.V.* Modeling of shock loading processes in heterogeneous materials based on boron carbide with the addition of chromium diboride (CrB_2). Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software (Bulletin SUSU MMCS). 2026. Vol. 19, no. 1. P. 42–53. DOI: 10.14529/mmp260105

42. *Lesuer D.R.* Experimental Investigations of Material Models for Ti-6Al-4V Titanium and 2024-T3 Aluminum: Technical report / Lawrence Livermore National Laboratory. 2000. P. 41. DOT/FAA/AR–00/25

43. *Kanel' G.I.*, *Razorenov S.V.*, *Utkin A.V.*, *Fortov V.Y.* Eksperimental'nyye profili udarnykh voln v kondensirovannykh veshchestvakh. M.: Fizmatlit, 2008. 246 p.

44. Eksperimental'nyye dannyye po udarno-volnovomu szhatiyu i adiabaticheskomu rasshireniyu kondensirovannykh veshchestv / ed. by R.F. Trunina. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2006. P. 531.

45. *Kraus A.E.*, *Buzyurkin A.E.*, *Devushkin M.P.*, *Kashkarov A.O.*, *Kraus E.I.*, *Pruuel E.R.*, *Ten K.A.*, *Fomin V.M.*, *Shabalin I.I.* Modeling of high-speed radiography with a synchrotron radiation source for problems of dynamic interaction of solid heterogeneous materials. Fizika goreniya i vzryva. 2026. DOI: 10.15372/FGV2026.9653

46. *Medvedev A.E.*, *Kraus E.I.*, *Shabalin I.I.* Solutions of the Problems on Introduction of Compact and Elongated Bodies Into a Half-Space. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2025. Vol. 98, no. 7. P. 1796–1807. DOI: 10.1007/s10891-026-03260-0

47. *Alekseevskii V.P.* Penetration of a rod into a target at high velocity. Combustion, Explosion and Shock Waves. 1966. Vol. 2, no. 2. P. 63–66. DOI: 10.1007/BF00749237

48. *Tate A.* Further results in the theory of long rod penetration*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1969. Vol. 17, no. 3. P. 141–150. DOI: 10.1016/0022-5096(69)90028-3