

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РАЗРУШЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

А.Е. Краус

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail: akraus@itam.nsc.ru*

Аннотация. Проведено исследование динамического нагружения гетерогенных преград двух типов: металлокерамической (V_4C + сталь 4340), взаимодействующей с высокотвёрдым стержнем, и металлической (сталь 4340 + алюминиевый сплав Al 7075), взаимодействующей со сферическим налетающим телом из высокотвёрдой стали. Диапазон скоростей соударения составлял 200–2000 м/с. Поведение гетерогенного материала описывалось двумя подходами: аддитивной моделью смеси и прямым численным моделированием. На основе анализа остаточной скорости стержня после взаимодействия с преградой проведено сравнение предельных деформаций разрушения (растягивающих, сжимающих и сдвиговых) гетерогенных материалов в зависимости от свойств и объёмной концентрации компонентов. В результате впервые получено соотношение, связывающее предельную деформацию разрушения гетерогенного материала с предельными деформациями разрушения и концентрацией его компонентов.

Ключевые слова: гетерогенный материал; предельные деформации разрушения; баллистический предел; динамическое нагружение; баллистические кривые; численное моделирование.

Введение

Исследование динамического отклика гетерогенных материалов при высокоскоростном нагружении является фундаментальной задачей современной механики твёрдого тела быстропротекающих процессов. Актуальность обусловлена их применением в аэрокосмической, авиационной и других отраслях, где требуется сочетание высокой прочности и низкой плотности материала. В отличие от однородных сред, поведение таких материалов осложняется волновыми взаимодействиями на межфазных границах. При микросекундных временах нагружения это инициирует множественные, конкурирующие механизмы разрушения (межфазное расслоение, фрагментация), что делает прогнозирование их баллистической стойкости и энергопоглощающей способности нетривиальной научной задачей.

Технологии изготовления переопределяют подходы к созданию защитных структур, делая акцент на управлении их внутренней архитектурой [1–4]. Трудностью проектирования остается отсутствие методик, связывающих параметры структуры с ее динамическими параметрами. Формализация критериев предельного состояния для гетерогенных сред позволит перейти к направленному проектированию материалов с заданной динамической прочностью.

Прогнозирование динамического отклика и предельных состояний гетерогенных материалов остается нетривиальной задачей современной механики. Как отмечается в обзоре [5], несмотря на многообразие существующих подходов (от уравнений модели Джонсона–Кука до нейросетевых алгоритмов), корректное описание конкуренции процессов деформационного упрочнения и температурного разупрочнения, например, в алюмоматричных композитах, требует дальнейшей доработки определяющих уравнений.

В [6] предложена модифицированная модель Джонсона–Кука, которая интегрирована с критерием полного разрушения, основанным на плотности энергии деформации. Этот подход позволил аналитически формализовать предельные состояния композита $V_4C/2024Al$, обеспечив высокую точность прогнозирования распространения трещин и пластической деформации.

Параллельно с уточнением критериев разрушения ведется поиск конструктивных оптимальных решений для повышения предельных характеристик. Так, в работе [7] демонстрируется, что аналитически обоснованное варьирование показателя градиента состава в функционально-градиентных материалах В₄С/Al позволяет управлять распространением волн напряжений и, как следствие, максимизировать эффективность защиты. Совокупность этих исследований свидетельствует о том, что разработка универсальных аналитических зависимостей, связывающих микроструктурные параметры с макроскопическими предельными характеристиками, остается ключевым вектором развития динамики гетерогенных материалов.

Моделирование процессов разрушения требует задания набора предельных параметров материала. Однако если для гомогенных материалов эти параметры, как правило, известны, то экспериментальное определение для гетерогенных материалов со сложной внутренней структурой (например, изготовленных по технологии PrintCast [8]) представляет собой нетривиальную научно-техническую задачу. Для преодоления этой сложности в работах [9, 10] предложен подход к прямому численному моделированию, позволяющий прогнозировать макроскопический отклик материала, опираясь лишь на известные свойства составляющих его фаз. В основе подхода лежит замкнутая упругопластическая дискретная модель, в которой мезоструктура материала с заданными параметрами включений генерируется стохастически. Применение данного подхода позволило детально описать процессы высокоскоростной деформации и разрушения материалов со сложной объемно-армированной структурой [11–13].

Следует отметить, что в механике композитов широко применяется подход, основанный на гомогенизации, при котором гетерогенная среда заменяется эквивалентной гомогенной с «эффективными» свойствами. Однако границы применимости таких усредненных моделей, особенно для динамических задач, требуют тщательного анализа, поскольку они могут не учитывать важные эффекты, связанные с мезоструктурой. Именно этот аспект исследуется в работе [14], где показано, что в периодически неоднородных средах формирование ударного фронта может быть отсрочено за счет структурной дисперсии. Авторы численно подтвердили, что гомогенизированная модель корректно предсказывает скорость ударной волны, но лишь при условии, что дисперсионные эффекты, обусловленные мезоструктурой, остаются малыми.

Цель работы и постановка задачи

Цель данной работы – провести оценку предельных деформаций разрушения гетерогенного материала на основе сравнения двух моделей динамически нагруженной гетерогенной среды.

Моделирование динамических процессов проводилось в пакете «Reactor3D» [10, 15], уравнения баланса – в постановке Лагранжа [16]. Дискретизация области выполняется на адаптивных сетках, состоящих из тетраэдральных ячеек, что обеспечивает высокую точность при моделировании больших пластических деформаций. В качестве термодинамической модели выбрано малопараметрическое уравнение состояния [17], преимуществом которого является простая идентификация параметров.

Моделирование накопления повреждений и последующего разрушения основано на отслеживании эволюции напряжённо-деформированного состояния в каждом элементе расчётной области [18, 19]. Согласно теории деформационных состояний, для произвольной материальной точки существует ортогональный базис, в котором тензор деформаций принимает диагональный вид, то есть реализуются только нормальные компоненты: растяжение, сжатие. Соответствующие величины представляют собой главные деформации: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, при этом выполняется условие $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$. Алгоритм вычисления главных деформаций при динамическом нагружении детально изложен в [20]. Критерий разрушения формулируется следующим образом: если хотя бы одна из главных деформаций достигает предельного значения, характерного для данного материала, а именно $\varepsilon_1 > \varepsilon_1^*$ или $\varepsilon_\tau > \varepsilon_\tau^*$, материал считается утратившим несущую способность при растяжении и сдвиге, сохраняя при этом сопротивление сжатию.

Описание моделей гетерогенного материала

Для описания реакции гетерогенного материала на динамическое нагружение в «Reactor3D» реализованы две модели: прямое численное моделирование гетерогенного материала и аддитивная модель смеси.

$$\alpha_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^k m_j} \cup \sum \alpha_i = 1. \quad (1)$$

Аддитивная модель смеси позволяет представить гетерогенный материал в виде однородной среды с осредненными параметрами, выраженными через концентрации компонент [21–23]. При этом выполняется условие нормировки концентраций (1), согласно которому сумма концентраций всегда равна единице. Итоговые характеристики материала, такие как энергия, теплоемкость, плотность и другие параметры, могут быть выражены как взвешенная сумма соответствующих свойств отдельных компонентов, пропорционально их концентрации. В рамках аддитивного приближения предполагается, что при заданном давлении суммарный объем ударно-сжатой смеси равен сумме объемов ее компонент, определенных по ударным адиабатам при тех же условиях нагружения.

При прямом численном моделировании гетерогенная среда описывается как совокупность областей, заполненных индивидуальными компонентами с заранее определёнными объёмными долями [9, 10]. Каждой расчётной ячейке присваивается полный набор физико-механических характеристик соответствующего компонента. Сопряжение смежных ячеек обеспечивается условиями неразрывности перемещений узловых точек, что гарантирует непрерывность поля деформаций на межкомпонентных границах (2). Разрыв свойств при переходе между ячейками, принадлежащими различным компонентам, учитывается алгоритмом явным образом. Наименьший характерный размер неоднородности определяется шагом конечно-разностной сетки. Граничные условия для репрезентативной ячейки, подвергаемой воздействию фронта ударной волны, задаются в соответствии с рис. 1.

$\sigma_n(x_k, t) = F(x_k, t), x_k \in \Gamma_1; u_1(x_k, t) = 0, x_k \in \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4; \sigma_{ij} n_j^+ = \sigma_{ij} n_j^-; u_i^+ = u_i^-, x_k \in \Gamma_5, \quad (2)$
где n_j^+, n_j^- – компоненты вектора нормали к поверхностям границы между включениями.

Прямое численное моделирование основывается на явном учёте реальной микроструктуры гетерогенного материала. В рамках подхода моделируется поведение каждой отдельной фазы или компонента с разрешением всех характерных пространственных и временных масштабов, что позволяет воспроизводить сложные процессы деформирования, разрушения, образования кратера и формирования запреградного облака с высокой степенью детализации. Такой подход требует значительных вычислительных ресурсов, однако обеспечивает получение полной картины разрушения гетерогенного материала с неизвестными из эксперимента критериями разрушения, что невозможно получить в рамках аддитивной модели. Так в [24] с помощью прямого численного моделирования успешно проведена идентификация свойств и величины предельного откольного разрушения гетерогенных материалов.

Таким образом, основное принципиальное отличие между аддитивной моделью смеси и прямым численным моделированием заключается в степени доступности описания процессов разрушения. Аддитивная модель, по своей сути, не способна определять осреднённые параметры разрушения, поскольку игнорирует микроструктурные эффекты и механизмы взаимодействия между компонентами. В то же время прямое численное моделирование предоставляет такие возможности, позволяя не только количественно оценивать параметры разрушения, но и выявлять их зависимость от структуры и свойств материала.

Определение предельных деформаций

Касательно критерия предельных напряжений разрушения в динамических задачах, удобно воспользоваться предельным откольным напряжением. В рамках применения этого критерия для разрушения гетерогенного материала в исследовании [24] предложено уравнение (3), нацеленное

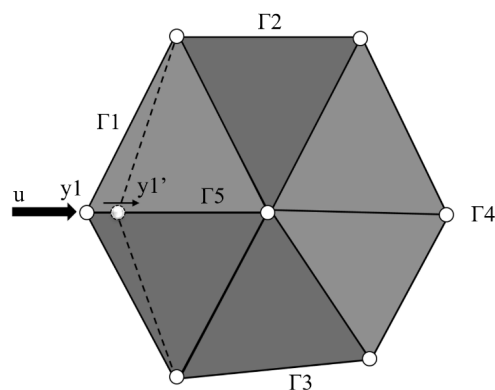


Рис. 1. Граничные условия ячейки гетерогенного материала

на определение предельного эффективного откольного напряжения для гетерогенного материала на основе параметров компонент и их концентраций. Такое соотношение даёт возможность оценивать откольные характеристики гетерогенного материала по концентрациям составляющих и их свойствам ещё на этапе проектирования материала, что может быть использовано для подбора необходимых концентраций или компонентов с целью достижения требуемых предельных характеристик эксплуатации материала.

$$\sigma_{sp_mix} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_{0i} \beta_i \sigma_{sp_i}}{\rho_{0mix}}. \quad (3)$$

Однако использование только предельного откольного напряжения в качестве критерия разрушения является недостаточным, необходимо также учитывать предельные деформации. Для откольного разрушения разработан ряд экспериментальных методик, позволяющих определить соответствующие параметры, однако экспериментальное определение предельных деформаций разрушения остаётся сложной задачей.

Идея оценки эффективных параметров разрушения, используемых в аддитивной модели смеси, основана на последующей аппроксимации данных по концентрации и свойствам компонентов. Предложенный подход основан на сопоставлении результатов, полученных с помощью аддитивной модели смеси и прямого численного моделирования. Многовариантные расчёты в рамках прямого моделирования, в котором разрушение реализуется на масштабе отдельных компонентов без использования осреднённых критериев, формируют массив данных, отражающий зависимость характеристик разрушения от объёмного содержания и свойств, составляющих гетерогенного материала

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (4)$$

где ε_v – объёмные деформации, V_0 – начальный объём, ΔV – изменение объёма, ε – линейные деформации вдоль главных осей.

Аналитическое описание предельных деформаций разрушения гетерогенного материала может быть построено на основе следующих рассуждений. В рамках аддитивной модели смеси объёмные деформации однозначно определяют массовую концентрацию компонентов гетерогенного тела через соотношение (4). При наложении ограничения в виде закона сохранения массы данная связь позволяет выразить эффективные предельные деформации разрушения как функцию объёмных долей и индивидуальных деформационных характеристик каждого из компонентов:

$$\varepsilon_{v(mix)} = \frac{\Delta V \cdot m}{V_0 \cdot m} = \sum_{i=1}^k \alpha_i \varepsilon_{vi}. \quad (5)$$

Соответственно, из выражения (5) можно получить соотношение справедливое для главных деформаций, которые и используются в качестве предельных критериев разрушения по деформациям:

$$\varepsilon_{mix} = \sum_{i=1}^k \alpha_i \varepsilon_i. \quad (6)$$

Для валидации соотношения (6) выбрана задача высокоскоростного внедрения, отличающаяся сложным характером разрушения. Материал стержня [25] подобран таким образом, чтобы его собственная пластическая деформация в процессе взаимодействия оставалась пренебрежимо малой. Гетерогенная преграда толщиной 7,5 см, состоящая из керамики В₄С [26] и сплава стали 4340 [27], подвергалась воздействию. Геометрия и постановка задачи отражены на рис. 2. Прямое численное моделирование в данной конфигурации обеспечивает описание разрушения на

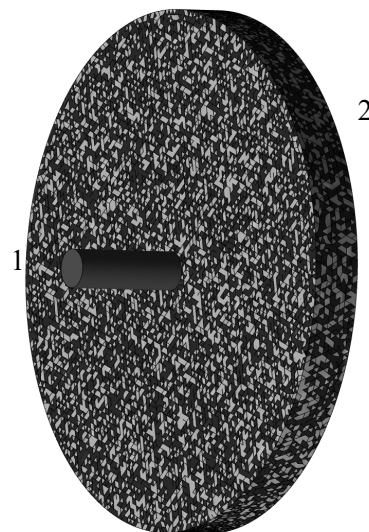


Рис. 2. Схема расчета: 1 – налетающий стержень, 2 – тонкая преграда

основе предельных деформационных характеристик индивидуальных компонентов преграды, значения которых приведены в таблице.

Механические свойства исследуемых материалов

Материал	ρ , г/см ³	C_0 , км/с	λ	G , ГПа	K , ГПа	Y , ГПа	σ_{sp} , ГПа	ε_1 , %
В ₄ С [26, 28]	2,52	8,11	1,61	178,94	214,8	11,85	11,95	5
Сталь 4340 [27]	7,87	4,57	1,49	80,0	168,11	1,0	7,5	33
Al7075 [17]	2,79	5,33	1,34	27,86	75,71	0,52	0,571	10

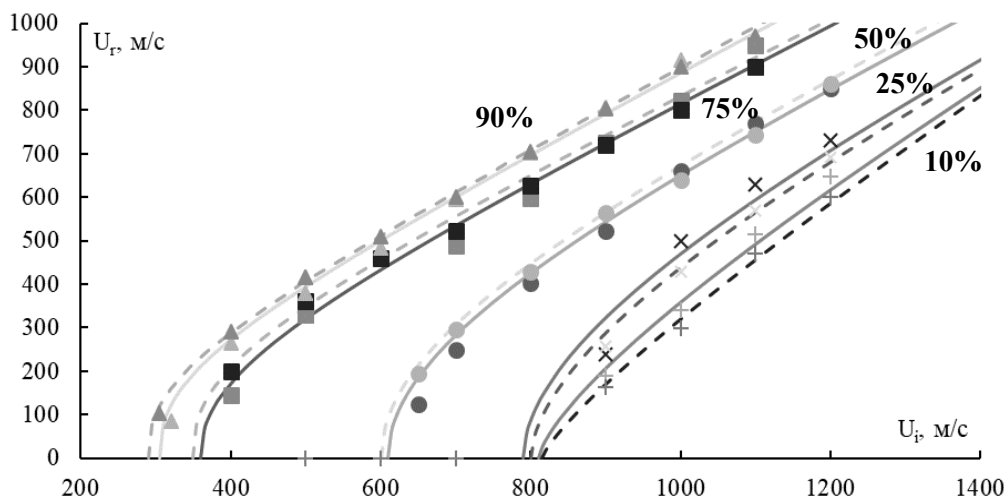


Рис. 3. Баллистические кривые гетерогенной преграды (в процентах указана концентрация керамики В₄С); сплошная линия – аддитивная модель смеси; пунктирная линия – прямое численное моделирование

Для аддитивной модели смеси эффективные параметры разрушения гетерогенного материала определим при помощи соотношений (3) и (6). В качестве критерия верификации соотношений используем связь начальной скорости внедрения стержня и остаточной скорости, что является баллистической кривой гетерогенной преграды.

$$U_r = a(U_i^p - U_b^p)^{1/p}, \quad U_i > U_b, \quad (7)$$

где U_i, U_r, U_b – скорость удара, остаточная скорость и величина баллистической скорости, a, p – постоянные, зависящие от свойств материалов и геометрии соударяющихся объектов.

На рис. 3 показаны результаты моделирования в виде баллистических кривых, построенных по аппроксимации (7) Ламберта–Джонасана [29]. Кривые демонстрируют, что остаточные скорости стержня после взаимодействия с пластинами, содержащими различную концентрацию керамики, отличаются не более чем на 5 % для обеих моделей. Таким образом можно заключить, что соотношения (3) и (6) позволяют провести моделирование разрушения гетерогенного материала аддитивной моделью, смести в соответствии с моделью прямого численного моделирования, а эффективные предельные деформации гетерогенного материала можно успешно описывать через соотношение (6).

Результаты аддитивной модели смеси с эффективными параметрами из (3) и (6) и прямого численного моделирования дополнительно рассмотрены на задачах о внедрении налетающего металлического сферического тела в массивную преграду, т. е. масса преграды значительно превышает массу частицы. В рамках такой задачи существует понятие моделирующей кривой Златина, полученной из исследований механизмов внедрения металлических тел в преграду [30–32]. В основе работы лежит отношение кинетической энергии налетающего тела к прочностным характеристикам преграды.

Рассмотрена задача высокоскоростного нагружения сферическим телом с радиусом 2 см из высокотвердого сплава в гетерогенную преграду. Преграда моделировалась цилиндрическим блоком с радиусом 120 см и толщиной 50 см, что позволяет определить ее как массивную преграду. Материал преграды представляет собой композицию стали 4340 и алюминиевого сплава Al7075, механические характеристики которых взяты из [8, 13]. Диапазон скоростей взаимодействия – от 1,0 до 2,0 км/с. Расчетная схема представлена рис. 4.

Из результатов расчетов показано, что аддитивная модель смеси с эффективными параметрами из (3) и (6) соответствует прямому численному моделированию в пределах доверительной погрешности 15 %. На рис. 5 показана зависимость отнесенного объема кратера к объему налетающего сферического тела от начальной скорости взаимодействия. Рассмотренный диапазон концентраций – от 10 до 90 % объемной доли Al7075. Дискретные точки соответствуют результатам численного расчета, сплошные линии – их аппроксимации методом наименьших квадратов. Зависимость объема кратера от скорости удара носит немонотонный характер, что наблюдается для всех исследованных составов гетерогенного материала, независимо от концентрации алюминия.

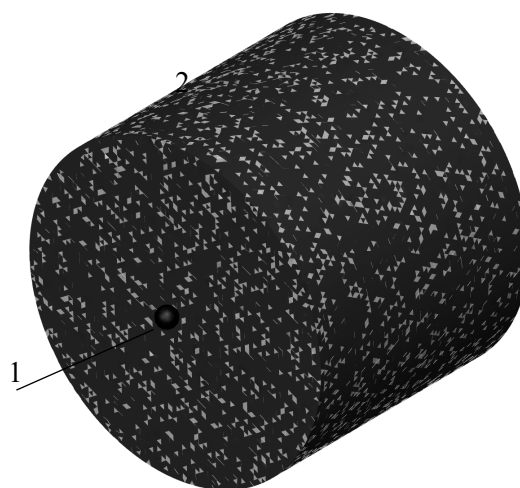


Рис. 4. Схема постановки: 1 – сферическое тело из высокотвёрдого сплава; 2 – гетерогенная массивная преграда

Резюмируя, предложенное соотношение (6) обеспечивает оценку эффективных деформаций разрушения гетерогенных сред. Сопоставление с результатами прямого численного моделирования демонстрирует расхождение менее 15 %. Установленная зависимость подтверждает аддитивный характер формирования предельных свойств композита в зависимости от концентрации и характеристик его компонентов.

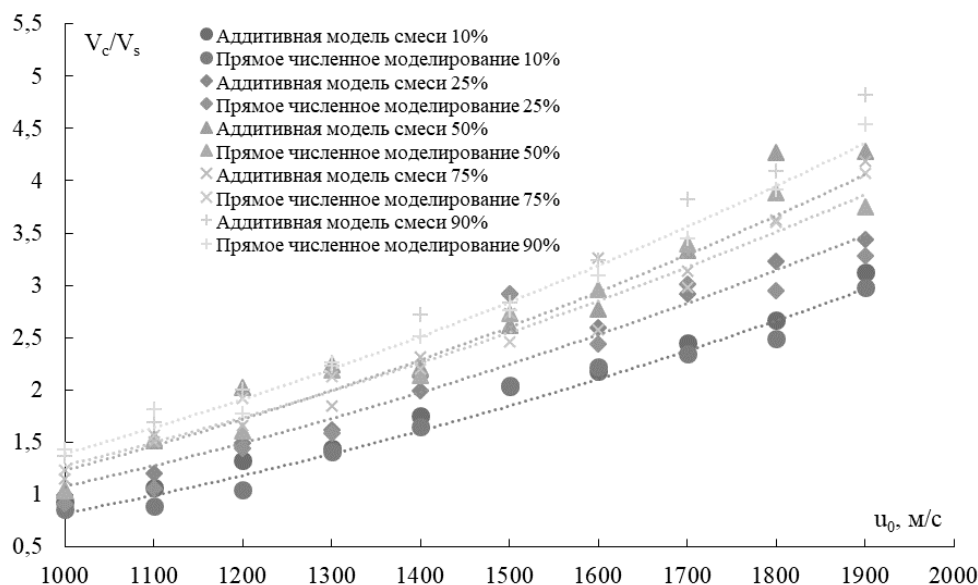


Рис. 5. Зависимость относительного объема кратера от скорости налетающего сферического тела

Оценка предела текучести гетерогенного материала

Заключительная часть исследования посвящена анализу поведения у гетерогенного материала динамического предела текучести от свойств включений. С этой целью использована описанная выше конфигурация нагружения массивной преграды, рассмотренная в иной постановке в соответствии с [16], подтверждающей корректность данного соотношения для условий высокоскоростного взаимодействия. Высокая твёрдость материала налетающего сферического тела позволяет считать изменение его объёма при взаимодействии пренебрежимо малым, что обосновывает применение соотношения (8), устанавливающего баланс между удельной кинетической энергией налетающего тела и сопротивлением материала исследуемого образца.

$$\frac{1}{2} \rho_s U^2 = \frac{V_c}{V_s} Y_t, \tag{8}$$

где Y_i – предел текучести массивной преграды, ρ_s – плотность налетающего сферического тела, U – скорость налетающего сферического тела, V_c , V_s – объем кратера и начальный объем сферического тела.

$$Y_{mix} = \sum_i \alpha_i Y_i. \quad (9)$$

Проведен сравнительный анализ результатов, полученных с использованием обеих моделей, демонстрирующий, что динамический предел текучести, из анализа морфологии кратера по соотношению (8) в преграде, построенной прямым численным моделированием, соответствует значению, рассчитанному по формуле (9) в пределах 15 % погрешности. Известно, что отношение объема кратера к объему сферы линейно зависит от отношения кинетической энергии сферического тела к динамическому пределу текучести преграды. Следовательно, при корректном определении предела текучести расчетные точки для всех концентраций композита должны группироваться вдоль единой прямой, что показано на рис. 6 для всего диапазона исследованных концентраций Al7075.

В заключение можно сказать, что методы определения эффективных параметров гетерогенного материала, описанные в работе, позволяют в пределе погрешности около ~15 % оценить прочностные характеристики гетерогенного материала или спроектировать их под требуемые эксплуатационные задачи.

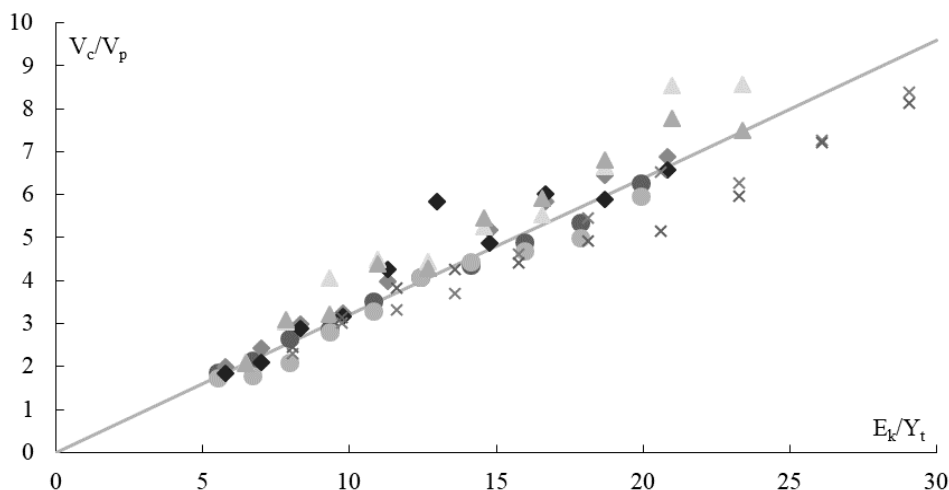


Рис. 6. Зависимость относительного объема кратера от кинетической энергии налетающего сферического тела для рассмотренных концентраций Al7075 в гетерогенной преграде

Выводы

1. Динамический предел текучести гетерогенной структуры может быть достоверно аппроксимирован линейной комбинацией пределов текучести её компонентов, взвешенных по их массовым долям.

2. Впервые на основе серии численных экспериментов выведено аналитическое соотношение, связывающее эффективную предельную деформацию разрушения гетерогенной среды с параметрами деформаций и объемной концентрацией её компонент.

3. Установлено количественное соответствие результатов прямого численного моделирования с результатами, полученными в рамках аддитивной модели смесей, учитывающей теоретическую оценку физико-механических параметров.

4. Разработана методология идентификации предельных деформаций для металломатричных композитов, характеризующихся сложным механизмом разрушения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТПМ СО РАН № 124021400036-7.

Литература

1. Anisotropy and Heterogeneity of Microstructure and Mechanical Properties in Metal Additive Manufacturing: A Critical Review / Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang *et al.* // *Materials & Design.* – 2018. – Vol. 139. – P. 565–586.

2. Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, structure and properties / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback *et al.* // *Progress in Materials Science*. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.
3. Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного сплавления / В.М. Фомин, А.А. Голышев, А.Г. Маликов и др. // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2020. – Т. 61, № 5. – С. 224–234.
4. Создание металлокерамических структур на основе Ti, Ni, WC и B₄C с применением технологии лазерной наплавки и холодного газодинамического напыления / Фомин В.М., Голышев А.А., В.Ф. Косарев и др. // *Физическая мезомеханика*. – 2019. – Vol. 22, no. 4. – С. 5–15.
5. A Review of Dynamic Mechanical Behavior and the Constitutive Models of Aluminum Matrix Composites / S. Li, T. Luo, Z. Chao *et al.* // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, no. 8. – P. 1879.
6. Dynamic Compressive Behavior, Constitutive Modeling, and Complete Failure Criterion of 30 Vol.% B₄C/2024Al Composite / Q. Yan, Z. Zhao, T. Luo *et al.* // *Materials*. – 2025. – Vol. 18, no. 5. – P. 1–18.
7. Ballistic Performance of Functionally Graded B₄C/Al Composites without Abrupt Interfaces: Experiments and Simulations / Y. Wang, Q. Liu, B. Zhang *et al.* // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 1011–1029.
8. Hypervelocity Impact of PrintCast 316L/A356 Composites / L.L. Poole, M. Gonzales, M.R. French *et al.* // *International Journal of Impact Engineering*. – 2020. – Vol. 136, no. June 2019. – P. 103407.
9. Kraus, A.E. A Heterogeneous Medium Model and Its Application in a Target Perforation Problems / A.E. Kraus, E.I. Kraus, I.I. Shabalin // *Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials*. – 2021. – Vol. 141. – P. 289–304.
10. Высокоскоростное взаимодействие гетерогенных материалов / В.М. Фомин, Е.И. Краус, И.И. Шабалин и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2025. – 437 с.
11. Shape of Fragments Cloud behind Heterogeneous Screen by a Space Debris Particle Impact / A.E. Buzyurkin, V.M. Fomin, A.E. Kraus *et al.* // *Acta Astronautica*. – 2025. – Vol. 226, no. P1. – P. 169–177.
12. Influence of Thin-Barrier Geometry on the Morphology of the Debris Cloud in Interactions with Space-Debris Fragments / A.E. Kraus, A.E. Buzyurkin, I.I. Shabalin *et al.* // *Acta Astronautica*. – 2026. – Vol. 238. – P. 569–581.
13. Numerical Modelling of High-Speed Loading of Periodic Interpenetrating Heterogeneous Media with Adapted Mesostructure / A. Kraus, A. Buzyurkin, I. Shabalin, E. Kraus // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, no. 12. – P. 7187.
14. Ketcheson, D.I. Effective Rankine-Hugoniot Conditions for Shock Waves in Periodic Media / D.I. Ketcheson, M. Quezada de Luna // *Communications in Mathematical Sciences*. – 2020. – Vol. 18, no. 4. – P. 1023–1040.
15. Патент № 2024681904. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024684051. Программный комплекс моделирования процесса динамического взаимодействия гомогенных и гетерогенных деформируемых твердых тел «Reactor3D»: опублик. 2024 / А.Е. Краус, Е.И. Краус, И.И. Шабалин; заявитель и правообладатель Российская Федерация, ИТПМ СО РАН. – 1 с.
16. 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(385). – С. 142–151.
17. Kraus, A.E. Reactor 3D Software Performance on Penetration and Perforation Problems / A.E. Kraus, E.I. Kraus, I.I. Shabalin // *Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates*, vol. 176 / eds. M.Y. Orlov, P.M. Visakh. – Springer, 2023. – P. 83–101.
18. Пробитие ледяных преград конечной толщины стальными ударниками / Е.И. Краус, А.Ю. Мельников, В.М. Фомин, И.И. Шабалин // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2019. – Т. 60, № 3. – С. 146–153.
19. Моделирование ударных воздействий на конструкцию в проблеме обеспечения безопасности космических ЯЭУ / М.Ю. Федоров, Е.И. Краус, В.М. Фомин, И.И. Шабалин // *Вестник Моск. авиац. ин-та*. – 2009. – Т. 16, № 3. – С. 49–53.
20. Новожилов, В.В. Теория упругости / В.В. Новожилов. – Л.: Судпромгиз, 1958. – 370 с.

21. Николаевский В.Н. Гидродинамический анализ ударных адиабат гетерогенных смесей веществ / В.Н. Николаевский // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1969. – № 3. – С. 82–88.

22. Дремин А.Н., Карпухин И.А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // Прикладная механика и техническая физика. – 1960. – Т. 1, № 3. – С. 184–188.

23. Краус, Е.И. Учет электронных составляющих в уравнении состояния при расчете ударных волн в смеси металлов / Е.И. Краус, В.М. Фомин, И.И. Шабалин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2001. – № 9. – С. 78–84.

24. Идентификация свойств и величины предельного откольного разрушения гетерогенных материалов в динамических процессах / А.Е. Краус, А.Е. Бузюркин, И.И. Шабалин, Е.И. Краус // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 1. – С. 64–80.

25. Краус, А.Е. Стойкость керамик к удару в численном эксперименте / А.Е. Краус, Е.И. Краус, И.И. Шабалин // Прикладная механика и техническая физика. – 2020. – Т. 61, № 5. – С. 190–198.

26. Моделирование реакции гетерогенных металлокерамических образцов, созданных с помощью аддитивных технологий, на динамическое воздействие / А.Е. Бузюркин, А.Е. Краус, Е.И. Краус и др. // Физическая мезомеханика. – 2024. – Т. 27, № 5. – С. 34–50.

27. Kraus, A.E. Simulation of a Group Impact on a Heterogeneous Target of Finite Thickness / A.E. Kraus, E.I. Kraus, I.I. Shabalin // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2021. – Vol. 14, no. 6. – P. 700–711.

28. Экспериментальное исследование влияния лазерной обработки на сопротивление металлокерамического покрытия к высокоскоростному соударению / В.М. Фомин, А.А. Голышев, А.Г. Маликов и др. // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 7. – С. 1821–1827.

29. Зукас, Д.А. Динамика удара / Д.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт и др. – М.: Мир, 1985. – 296 с.

30. Витман, Ф.Ф. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. 1. Состояние и теория вопроса / Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин // Журнал технической физики. – 1963. – Т. 33, № 6. – С. 982–989.

31. Беляков, Л.В. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. 2. О моделировании удара шара по полупространству / Л.В. Беляков, Ф.Ф. Витман, Н.А. Златин // Журнал технической физики. – 1963. – Т. 33, № 9. – С. 900–995.

32. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н.А. Златин, А.П. Красильщиков, Г.И. Мишин, Н.Н. Попов. – М.: Наука, 1974. – 344 с.

Поступила в редакцию 13 марта 2026 г.

Сведения об авторе

Краус Александр Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: akraus@itam.nsc.ru.

**DETERMINATION OF THE ULTIMATE FRACTURE DEFORMATIONS
OF HETEROGENEOUS MATERIALS UNDER THE CONDITIONS
OF HIGH-SPEED INTERACTION****A.E. Kraus***Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation**E-mail: akraus@itam.nsc.ru*

Abstract. This paper examines the dynamic loading of two types of heterogeneous barriers: metal-ceramic (B_4C + steel 4340) in contact with a high-hardness rod and metallic (steel 4340 + aluminum alloy Al 7075) in contact with a spherical impinging body made of highly rigid steel. The impact velocities ranged from 200 to 2000 m/s. The behavior of a heterogeneous material was described using two approaches: the additive mixture model and direct numerical modeling. Based on the analysis of the residual velocity of the rod after interaction with an obstacle, the ultimate failure strains (tensile, compressive, and shear) of the heterogeneous materials were compared, depending on the properties and volume concentration of the components. This resulted in the first relationship that links the ultimate failure strain of a heterogeneous material with the ultimate failure strains and concentration of its components.

Keywords: heterogeneous material; ultimate failure strains; ballistic limit; dynamic loading; ballistic curves; numerical modeling.

References

1. Kok Y., Tan X.P., Wang P., Nai M.L.S., Loh N.H., Liu E., Tor S.B. Anisotropy and Heterogeneity of Microstructure and Mechanical Properties in Metal Additive Manufacturing: A Critical Review. *Materials & Design*, 2018, Vol. 139, pp. 565–586. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.021
2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 2018, Vol. 92, pp. 112–224. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001
3. Fomin V.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Orishich A.M., Filippov A.A. Sozdanie funktsional'no-gradientnogo materiala metodom additivnogo lazernogo splavleniya (Creation of a Functional Gradient Material by Additive Laser Fusion). *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2020, Vol. 61, no. 5, pp. 224–234. DOI: 10.15372/PMTF20200523
4. 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 by Cold Gas Dynamic Spraying with Subsequent Laser Irradiation. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2019, Vol. 22, no. 4, pp. 5–15. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-14001
5. Li S., Luo T., Chao Z., Jiang L., Han H., Han B., Du S. A Review of Dynamic Mechanical Behavior and the Constitutive Models of Aluminum Matrix Composites. *Materials*, 2024, Vol. 17, no. 8, p. 1879. DOI: 10.3390/ma17081879
6. Yan Q., Zhao Z., Luo T., Li F., Zhao J., Chao Z., Liu S., Mei Y., Zhou F. Dynamic Compressive Behavior, Constitutive Modeling, and Complete Failure Criterion of 30 Vol.% $B_4C/2024Al$. *Composite Materials*, 2025, Vol. 18, no. 5, pp. 1–18. DOI: 10.3390/ma18051170
7. Wang Y., Liu Q., Zhang B., Wang H., Hazell P.J., Han Z., Li J., Li B., Li L., Liu F., Ye F. Ballistic Performance of Functionally Graded B_4C/Al Composites without Abrupt Interfaces: Experiments and Simulations. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, Vol. 25, pp. 1011–1029. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.06.021

8. Poole L.L., Gonzales M., French M.R., Yarberr W.A., Moustafa A.R., Cordero Z.C. Hypervelocity impact of PrintCast 316L/A356 composites. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, Vol. 136, no. June 2019, p. 103407. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103407
9. Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. A Heterogeneous Medium Model and Its Application in a Target Perforation Problems. *Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials, Vol. 141*. Springer, 2021, pp. 289–304. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_22
10. Fomin V.M., Kraus E.I., Shabalin I.I., Kraus A.E., Buzyurkin A.E. Vysokoskorostnoe vzaimodeystvie geterogennykh materialov (High-Speed Interaction of Heterogeneous Materials). Novosibirsk, SO RAN Publ., 2025, 437 p. DOI: 10.53954/9785605099697
11. Buzyurkin A.E., Fomin V.M., Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. Shape of Fragments Cloud behind Heterogeneous Screen by a Space Debris Particle Impact. *Acta Astronautica*, 2025, Vol. 226, no. P1, pp. 169–177. DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.10.036
12. Kraus A.E., Buzyurkin A.E., Shabalin I.I., Fomin V.M., Kraus E.I. Influence of Thin-Barrier Geometry on the Morphology of the Debris Cloud in Interactions with Space-Debris Fragments. *Acta Astronautica*, 2026, Vol. 238, pp. 569–581. DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.10.023
13. Kraus A., Buzyurkin A., Shabalin I., Kraus E. Numerical Modelling of High-Speed Load-ing of Periodic Interpenetrating Heterogeneous Media with Adapted Mesosstructure. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, no. 12, p. 7187. DOI: 10.3390/app13127187
14. Ketcheson D.I., Quezada de Luna M. Effective Rankine–Hugoniot Conditions for Shock Waves in Periodic Media. *Communications in Mathematical Sciences*, 2020, Vol. 18, no. 4, pp. 1023–1040. DOI: 10.4310/CMS.2020.V18.N4.A6
15. Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. Patent no. 2024681904. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2024684051. *Programmnyy kompleks modelirovaniya protsessa dinamicheskogo vzaimodeystviya gomogennykh i geterogennykh deformiruemykh tverdykh tel "Reactor3D"* (Certificate of registration of the computer program RU 2024684051. Software package for modeling the process of dynamic interaction of homogeneous and heterogeneous deformable solids "Reactor3D") publ. 2024; zayavitel' i pravoobladatel' Rossiyskaya Federatsiya, ITPM SO RAN (Author and copyright holder Russian Federation, ITPM SB RAS), 1 p.
16. 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, pp. 519–527. DOI: 10.1134/S0021894424030131
17. Kraus, A.E., Kraus, E.I., Shabalin, I.I. Reactor 3D Software Performance on Penetration and Perforation Problems. In: Orlov, M.Y., Visakh P. M. (eds) Behavior of Materials under Impact, Explosion, High Pressures and Dynamic Strain Rates. *Advanced Structured Materials*, Vol. 176. Springer, Cham, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-17073-7_6
18. Kraus E.I., Melnikov A.Y., Fomin V.M., Shabalin I.I. Penetration of Steel Projectiles through Finite-Thickness Ice Targets. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, Vol. 60, no. 3, pp. 526–532. DOI: 10.1134/S0021894419030155
19. Fedorov M.Yu., Kraus E.I., Fomin V.M., Shabalin I.I. Modelirovanie udarnykh vozdeystviy na konstruktsiyu v probleme obespecheniya bezopasnosti kosmicheskikh yaeu (Modeling of Impact Effects on the Structure in the Problem of Ensuring the Safety of Space Nuclear Power Plants). *Vestnik Mosk. aviats. in-ta*, 2009, Vol. 16, no. 3, pp. 49–53. (in Russ.).
20. Novozhilov V.V. *Teoriya uprugosti* (Theory of Elasticity). Leningrad: Sudpromgiz Publ., 1958, 370 p. (in Russ.).
21. Nikolaevskii V.N. Hydrodynamic Analysis of Shock Adiabats of Heterogeneous Mixtures of Substances. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1969, no. 10, pp. 406–411. DOI: 10.1007/BF00916170
22. Dremine A.N., Karpukhin I.A. Metod opredeleniya udarnykh adiabat dispersnykh veshchestv (Method for Determining the Shock Adiabats of Dispersed Substances). *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 1960, Vol. 1, no. 3, pp. 184–188. (in Russ.).
23. Kraus E.I., Fomin V.M., Shabalin I.I. Uchet elektronnykh sostavlyayushchikh v uravnenii sostoyaniya pri raschete udarnykh voln v smesi metallov (Accounting for Electronic Components in the Equation of State when Calculating Shock Waves in a Mixture of Metals). *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2001, no. 9, pp. 78–84. (in Russ.).

24. Kraus A.E., Buzyurkin A.E., Shabalin I.I., Kraus E.I. Identification of the Spallation Properties and Spallation Threshold of Heterogeneous Materials in Dynamic Processes. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2024, Vol. 27, no. 1, pp. 64–80. (in Russ.). DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_1_64-80

25. Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. Stoykost' keramik k udaru v chislennom eksperimente (Impact Resistance of Ceramics in a Numerical Experiment). *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2020, Vol. 61, no. 5, pp. 190–198. DOI: 10.15372/PMTF20200520

26. Buzyurkin A.E., Kraus A.E., Kraus E.I., Fomin V.M., Shabalin I.I. Modeling the Response of Additively-Manufactured Heterogeneous Metal-ceramic Specimens to Dynamic Impact. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2024, Vol. 27, no. 5, pp. 34–50. DOI: 10.55652/1683-805X_2024_27_5_34-50

27. Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I. Simulation of a Group Impact on a Heterogeneous Target of Finite Thickness. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2021, Vol. 14, no. 6, pp. 700–711. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-700-711

28. Fomin V.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Filippov A.A., Shikalov V.S., Yadrenkin M.A., Orishich A.M. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya lazernoy obrabotki na soprotivlenie metallo-keramicheskogo pokrytiya k vysokoskorostnomu soudareniyu (Experimental Study of the Effect of Laser Treatment on the Resistance of a Metal-Ceramic Coating to High-Speed Impact). *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2022, Vol. 95, no. 7, pp. 1821–1827. (in Russ.).

29. Zukas D.A., Nikolas T., Swift X.F., Greshchuk L.B., Kurran D.R. *Dinamika udara* (Impact Dynamics), Moscow, Mir, 1985, 296 p. (in Russ.).

30. Vitman F.F., Zlatin N.A. O protsesse soudareniya deformiruemykh tel i ego modelirovani. 1. Sostoyanie i teoriya voprosa (On the Process of Collision of Deformable Bodies and its Modeling. 1. The State and Theory of the Issue). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1963, Vol. 33, no. 6, pp. 982–989. (in Russ.).

31. Belyakov L.V., Vitman F.F., Zlatin N.A. O protsesse soudareniya deformiruemykh tel i ego modelirovani. 2. O modelirovani udara shara po poluprostranstvu (On the Process of Collision of Deformable Bodies and its Modeling. 2. Modeling the Impact of a Ball in a Half-Space). *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1963, Vol. 33, no. 9, pp. 900–995.

32. Zlatin N.A., Krasil'shchikov A.P., Mishin G.I., Popov N.N. *Ballisticheskie ustanovki i ikh primeneniye v eksperimental'nykh issledovaniyakh* (Ballistic Installations and their Application in Experimental Research). Moscow, Nauka Publ., 1974, 344 p. (in Russ.).

Received March 13, 2025

Information about the author

Kraus Aleksandr Evgen'evich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: akraus@itam.nsc.ru.