

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 0.191
ESJI (KZ) = 8.100
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2025 Issue: 06 Volume: 146

Received: 15.06.2025

Accepted/Published: 30.06.2025 <https://T-Science.org>

Issue

Article



Isroil Mirzaevich Karimov

Institute of Chemistry and Technology
docent, Tashkent, Uzbekistan

Utkir Abdunazar ugli Urolov

Institute of Chemistry and Technology
doctorant, Tashkent, Uzbekistan

DESTRUCTION OF LAYERED PLATES AT HIGH SPEED STRENGTHENING BY STRENGTHENERS

Abstract: This work presents a numerical study of the ballistic characteristics of monolithic, two- and three-layer metal and ceramic (composite) plates made of steel (or aluminum or a combination thereof) and ceramic fillers. Numerical models using the explicit ABACUS finite element diagram have been developed. The work found ballistic characteristics for monolithic composite slabs. Layered plates with a thin face of a plate made of aluminum and a thick steel sheet exhibit greater strength compared to multilayered steel plates of the same density.

Key words: composite plates, strength, ballistic characteristics, ceramic fillers, deformation and stresses, monolithic, high-strength, thin, steel plates, ceramic.

Language: Russian

Citation: Karimov, I.M., & Urolov, U.A. (2025). Destruction of layered plates at high speed strengthening by strengtheners. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 06 (146), 59-65.

Soi: <https://s-o-i.org/1.1/TAS-06-146-12> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2025.06.146.12>

Scopus ASCC: 2200.

РАЗРУШЕНИЯ СЛОИСТЫХ ПЛАСТИН ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ УДАРНИКАМИ

Аннотация: В данной работе представлено численное исследование баллистических характеристик монолитных, двух- и трехслойных металлических и керамических (композитных) пластин из стали (или алюминия или комбинации) и керамическими заполнителями. Разработаны численные модели с использованием явной схемы конечных элементов ABACUS. В работе для монолитных композитных плит найдены баллистические характеристики. Слоистые пластины с тонкой лицевой стороной плит из алюминия и толстого стального листа демонстрирует больше прочность по сравнению с многослойными стальными пластинами с аналогичной плотностью.

Ключевые слова: композитные пластины, прочность, баллистических характеристики, керамические заполнители, деформация и напряжения, монолитный, высокопрочный, тонкий, стальные пластины, керамический.

Введение

Расчетная оценка прочности при высокоскоростном ударе может быть проведена различными способами: аналитическим, полуэмпирическим и численным [1,2]. Аналитические методы позволяют быстро получать приблизительные оценки на основании небольшого количества информации о свойствах

материалов, однако практически во всех аналитических подходах используется допущение о недеформируемой индентора и не разрушении: материала преграды, (рассматривается только пластическое течение), что существенно ограничивает круг решаемых задач [3,4]. Полуэмпирические методы, как правило, являются развитием аналитических с добавлением

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.191
ESJI (KZ) = 8.100
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

каких-либо коэффициентов, определяемых для конкретного типа, ударника, пластины и материалов. Недостатками данных подходов является их применимость только для интерполяции, т.е. необходимо иметь экспериментальную базу, охватывающую весь интересующий диапазон скоростей соударения, видов ударников, толщин пластин и материалов ударников и пластин [5,6]. Численные методы основаны на решении уравнений механики сплошной среды с применением различных моделей материала, аппроксимирующих реальное механическое поведение материалов. Данные методы являются наиболее перспективными и информативными, т.к. результатом расчета является весь процесс кинетики деформирования и разрушения [7,8]. С ростом производительности вычислительной техники величина затрат на, расчет значительно снижается, следовательно численное моделирование становится экономически более выгодным, чем экспериментальные исследования. Наибольшее распространение в последнее время получил метод, конечных элементов для расчета различных конструкций, подверженных, в том числе и динамическим воздействиям [9,10]. Современные программные пакеты, реализующие метод конечных элементов, позволяют также моделировать контактные взаимодействия тел и разрушение материала. Однако, при численной реализации алгоритмов обработки контакта тел вводят дополнительный "искусственный" параметр - контактную жесткость. Данный параметр особенно важен для задач динамики с учетом волновых процессов, поскольку он определяет амплитуды волн напряжений, возникающих при соударении тел [11,12]. Традиционным способом проверки корректности решения контактных задач являются задачи о соударении упругих тел, имеющие аналитические решения. Однако, в задачах высокоскоростного удара, как правило, реализуется упругопластическое поведение материала, поэтому логичнее проводить проверку корректности и подбор параметров численной модели на задаче соударения упругопластических тел [13,14]. Одной из таких задач, имеющих аналитическое решение, является задача соударения двух бесконечных пластин из идеально упруго-пластичного материала. Поэтому полученные численные результаты сравниваются с экспериментальными результатами.

Постановка задачи и основные соотношения

С учетом результатов анализа ограничений в существующих способах и методах решения задач высокоскоростного взаимодействия ударников и слоистых пластин для разработки в рамках

данного исследования вынесены следующие задачи:

1. Разработать аналитический подход, позволяющий проводить оценку глубины проникновения недеформируемого индентора с учетом геометрии его передней части в пластичную среду;
2. Разработать методики на основе метода конечных элементов определения глубины проникновения индентора в слоистую пластичную среду;
3. Исследование проникновения индентора в слоистых пластин в зависимости от физико - механических и геометрических параметров пластин.

В процессе движения сплошной среды должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии, которые в координатах Лагранжа (h) имеют вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial h}; \quad \rho_0 \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma_1}{\partial h}; \quad \rho_0 \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_1 \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} \quad (1)$$

где t - время, ρ_0 — начальная плотность среды,

$\varepsilon_1 \equiv 1 - \frac{\rho_0}{\rho}$. Деформация и напряжения определены

положительными для сжатого состояния.

Система уравнений (1) с выбранным одноосным состоянием или (1) в зависимости от рассматриваемой задачи будет незамкнута. Для замыкания необходимо использовать калорическое уравнение состояния и соответствующее уравнение процесса, которые и будут полностью характеризовать математическую модель среды. Так, в дальнейшем будем использовать для одноосного деформированного состояния:

1) гидродинамическую модель, где $\tau = 0$ и $\dot{\varepsilon}^p = \dot{\varepsilon}_1 / 2$;

2) упругую модель — $\dot{\varepsilon}^p \equiv 0$;

3) упругопластическую модель

$$\dot{\varepsilon}^p = \frac{1}{2} \left(\dot{\varepsilon}_1 - \frac{\dot{Y}_0}{\mu} \right) \quad \text{для } \tau \geq Y_0 \quad (2)$$

где Y_0 - предел текучести, который в общем случае может быть функцией от $\rho, P, T, \varepsilon^p$ и других параметров среды. Так, для $Y_0 = \text{const}$ имеем модель идеальной пластичности

$$\tau = \begin{cases} \mu(\varepsilon_1 - 2\varepsilon^p), & \tau < Y_0 \\ Y_0, & \tau \geq Y_0 \end{cases} \quad (3)$$

4) дислокационную модель — $\dot{\varepsilon}^p = b_0 \cdot N_g \cdot v_g$,

где, b_0 - вектор Бюргерса, $N_g = \varphi(\varepsilon^p)$ - плотность подвижных дислокаций и V_g - скорость перемещения дислокаций, конкретный вид

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
 ISI (Dubai, UAE) = 1.582
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 РИНЦ (Russia) = 0.191
 ESJI (KZ) = 8.100
 SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

которых будет дан ниже. Пластина толщины l_0 со скоростью U_0 ударяется о поверхность другой пластины толщиной $L=l_0$. Удар нормальный. Длины пластин выбираем многократно больше толщин, что позволяет изучать физический процесс в одномерном приближении. В общем случае материалы пластин различны [6,7].

Таким образом, данная задача математически формулируется следующим образом:

Найти функции $U, \sigma_1, \epsilon_1, e^p, \sigma_2, \tau, P, E, T \in C(D_2)$,
 $D_2 = \{-l_0 \leq h \leq L, 0 \leq t < \infty\}$ системе дифференциальных уравнений (2), (3) и одной из зависимостей для $e^p(\tau, P, E)$. Начальными условиями:

$$U = \begin{cases} U_0 > 0, & -l_0 \leq h \leq 0, \\ 0, & 0 \leq t < L \end{cases} \quad (4)$$

и граничными условиями $\sigma_1(t, -l_0) = 0$ и $t = 0$ условиями. Аналитическое рассмотрение процесса в общем случае затруднительно. Поэтому решать данную задачу будем численно с использованием разностной схемы сквозного счета типа М.Уилкинса. Процесс распространения и взаимодействия ударных волн разгрузки, как показали результаты расчетов, не только количественно, но и качественно зависит от выбранной математической модели. Это связано в первую очередь со сложной структурой волн.

Следует заметить, что данная задача решалась многими исследователями, и в настоящее время можно считать практически все физические особенности распространения волн уже выясненными. Поэтому дадим ссылки только на основные работы обзорного характера [6, 7, 12].

Проведенные расчеты данной задачи в упругопластическом приближении по вышеописанному алгоритму при $v = \text{const}$ (коэффициент Пуассона), $k = P(\rho, T) / \epsilon_1$ и а) $Y_0 = Y_0(P)$, б) $Y_0 = Y_0(\epsilon^p)$ для алюминия и железа качественно полностью совпадают по волновым картинам явлений с результатами работ [13]. Скорости соударения варьировались в диапазоне от 0,1 до 0,5 км/с, и поэтому их здесь детально не будем рассматривать. Остановимся более подробно на результатах, которые получаются при описании среды по дислокационной модели. Конкретные зависимости $\phi(\epsilon^p)$ и $\phi(\tau, P, E)$ были взяты в виде

$$\frac{dN_g}{dt} = M \left| \epsilon^p \right| N_g \Big|_{i=0} = N_0, \quad (5)$$

$$U_g = \begin{cases} C_1 * \exp \left(-\frac{\tau_1}{|\tau| - \tau^*} \right), & |\tau| > \tau^*, \\ 0, & |\tau| \leq \tau^*, \end{cases}$$

где M - коэффициент размножения дислокаций (постоянная), C_1 - сдвиговая скорость звука, τ_1 - коэффициент скольжения, $\tau^* = \tau_2$ - величина порогового значения сдвигового напряжения, ниже которого все дислокации в среде неподвижны. Обобщение формул (5) по сравнению с известными [10] состоит в том, что они будут справедливы для нагрузки и для разгрузки. При этом следует заметить, что плотность дислокаций будет увеличиваться не только на волне сжатия, но и на волне разрежения. В последние годы оптимизация защитных конструкций от не прекращается угроза пул и снарядов для гражданского населения стала актуальная задача. Бронированные щиты обычно состоят из монолитной высокопрочной металлической пластины. Тем не менее, многослойная пластина конфигурации часто используются, потому что сопряжение бронежилеты не всегда изготавливаются в соответствии с требуемыми требованиями

Взаимодействие пули с различными преградами и баллистических характеристик металлических пластины

Толщина и многослойность необходимы для изготовления экранов, соответствующих проектным спецификациям [11]. Хотя есть ряд работа с баллистическими из многослойных пластин. Их сфера применения ограничена по сравнению с исследованиями монолитные плиты [12,14]. Кроме того, изучение многослойные пластины остаются открытой темой исследований, так как получены убедительные результаты их эффективности не были получены до настоящего времени. На рис. 2 приведены затухание массовой скорости за упругим предвестником при его распространении в алюминии для различных скоростей нагружены и параметрах материала: $b_0 = 2,86 * 10^{-8}$ см, $N_0 = 3,75 * 10^6$ см, $M = 7,8 * 10^{10}$ см², $C_1 = 3,2$ км/с, $\tau^* = 2,5$ кбар, $\tau_1 = 5$ кбар, $\rho_0 = 2,787$ г/см³. На рис.2

приведены затухание сдвиговых напряжений τ_1 и τ_2 в зависимости от расстояния h .

В начальный момент времени от границы контакта $h = 0$ в разные стороны распространяются ударные волны двух волновой структуры, передние фронты которых перемещаются со скоростью упругих волн, а за ними с меньшей скоростью распространяются пластические волны сжатия, переводящие параметры среды в конечное состояние, соответствующее скорости соударения.

Impact Factor:

ISRA (India) = 6.317
ISI (Dubai, UAE) = 1.582
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.191
ESJI (KZ) = 8.100
SJIF (Morocco) = 7.184

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

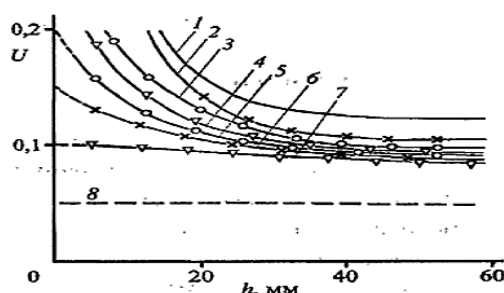
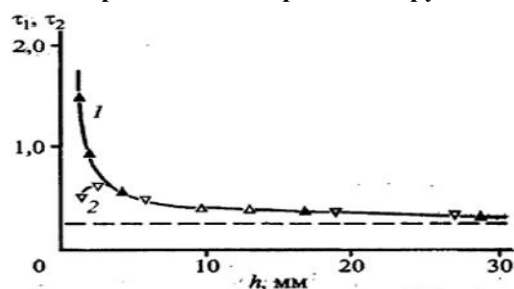


Рис.1. Затухание массовой скорости за упругим предвестником при его распространении в алюминии для различных скоростей нагружения:



$U, \text{km/s}: 2.0(1); 1.5(2); 1.0(3); 0.5(4); 0.4(5); 0.3(6); 0.2(7).$

Рис.2. Затухание сдвиговых напряжений τ_1 и τ_2 в зависимости от расстояния h .

Амплитуда и скорость пластической волны существенно зависят от скорости соударения. Вследствие эффекта задержки текучести переход в пластическое состояние среды осложняется тем, что напряжение за упругим предвестником превышает $Y > 0$ и изменяется во времени. От свободной поверхности ударника ($h = -l > 0$) волны сжатия отражаются соответственно упругой и пластической волнами разгрузки. Так как упругая волна разгрузки распространяется по предварительно нагруженному материалу, то через некоторый промежуток времени она догонит фронт пластической волны сжатия. В результате их взаимодействия амплитуда пластической волны сжатия уменьшается, а упругая волна разгрузки отразится от пластического фронта в виде упругой волны сжатия, которая будет перемещаться от точки взаимодействия в сторону пластической волны разгрузки. В результате этого распада разрыва возникает отраженная волна разгрузки, которая

вновь догоняет пластическую волну нагрузки и уменьшает ее интенсивность. В последующие моменты весь процесс повторяется аналогично вышеописанному. В дислокационной модели пластического деформирования, вследствие задержки текучести, интенсивность волны упругой разгрузки будет больше, чем интенсивность упругой волны разгрузки, вычисленной в упруго-пластическом приближении. Это приводит к более быстрому затуханию фронта пластической волны разгрузки. Важное значение имеют простейшие экспериментальные исследования. Рассмотрим задачу об ударе сферического ударника по преграде - толстой круглой пластине по нормали. Процесс проникания таких ударников сопровождается большими деформациями материала преграды за счет его вытеснения. Это деформации имеют необратимый характер и связаны с пластическими свойствами среды.

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

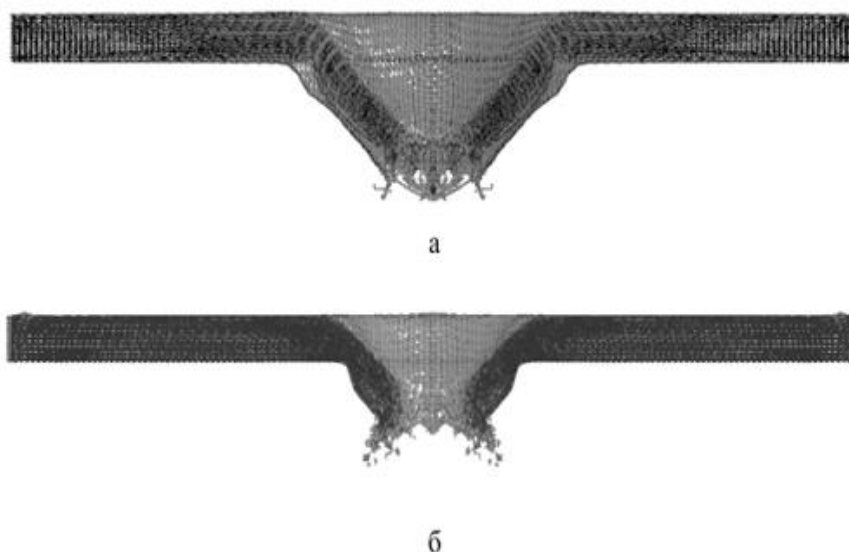


Рис. 3. Результаты моделирования композитной панели KB110П/ПЭНД при скоростях ударника 500 м/с (а) и 550 м/с (б)

Торможение ударника происходит под действием силы сопротивления со стороны материала преграды, интенсивность которой зависит от многих факторов. К ним относятся: геометрия головной части, масса ударника, его прочностные характеристики, толщина преграды, ее плотность и динамические пределы текучести материала. Решение задачи о проникании сферического ударника на пластине (эксперименте результаты) приведена в работе [14]. Будем считать ударник жесткий. Параметры ударника: масса $m=2\text{ кг}$, радиус $R=3\text{ см}$. Параметры преграды: толщина $h=4,5\text{ см}$,

$a=b=1\text{ м}$, плотность $\rho = 7,85\text{ г/см}^3$, объемной сжатия $K = 1,7\text{ Мбар}$, модуль сдвига $\mu = 0,8\text{ Мбар}$, предел динамического текучести $\gamma_0 = 0,0072\text{ Мбар}$. В работе [15] проведена квазистатические испытания арамидных волокон из тканевых материалов. Полученные данные показывают, что модуль упругости отечественных нитей на 25% выше, чем у нитей из тканей марки (Twaron), разница в величинах пределов прочности может достигаться до 20%. Получение теоретических результатов подтверждает сделанные выводы в экспериментальным путём.

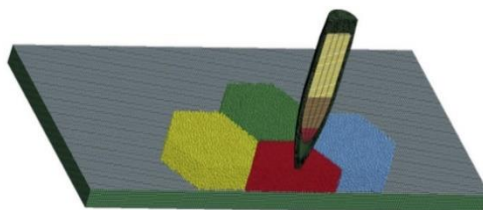


Рис. 4. Расчетная численная модель взаимодействия алюмооксидной керамики на стальной подложке с пулей Б32

На рис. 4 показана в разрезе трехмерная расчетная модель керамо-стальной панели, в которой керамические элементы разбиты на дискретные сферы, а пуля и подложка - на конечные элементы. Для описания поведения подложки из алюминиевого сплава АМгб, закаленного сердечника и оболочки пули использовали модель Джонсона-Кука, учитывающую деформационное упрочнение материала, влияние температуры и скорости нагружения на свойства материала [16]:

$$\sigma_T = \left[A + B(\epsilon_p)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (6)$$

$\dot{\epsilon}_p$ - скорость пластического деформирования, $\dot{\epsilon}_0$ - базовая скорость деформирования, T_r, T_m - комнатная температура и температура плавления материала соответственно, T - текущая температура, A, B, C, n и m - константы материала.

Разрушение наступает, когда параметр поврежденности

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	РИИЦ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}, \quad (7)$$

достигает единицы. В формуле (7) $\Delta \varepsilon_p$ – приращение эквивалентной пластической деформации за шаг интегрирования, ε_p^f – пластическая деформация разрушения, которая определяется как

$$\varepsilon_p^f = \left[D_1 + D_2 \exp D_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \right] \left[1 + D_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 + D_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right], \quad (8)$$

где D_1, D_2, D_3, D_4 и D_5 – константы материала, σ_m – среднее нормальное действующее напряжение. Параметры модели Джонсона-Кука, которые использовали при расчетах, приведена в работе [6]

Для алюминиевого сплава АМг6 использовали свойства сплав АА5083. Для моделирования броневой стали Ф110 использовали модифицированную модель Джонсона-Кука, для которой напряжения на поверхности текучести записывают в виде:

$$\sigma = \left[A + B(\varepsilon_p)^n \right] \left[1 + \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right]^D \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (9)$$

где A, B, D, m и n – константы материала. Остальные параметры имеют то же значение, что и в оригинальной модели (уравнение (8)). Изменение температуры в материале определяется уравнением

$$\Delta T = \int_0^{\varepsilon_p} \chi \frac{\sigma}{\rho_0 C_p} d\varepsilon_p, \quad (10)$$

где C_p – теплоемкость материала, χ – коэффициент Тейлора-Квинни, который показывает какое количество энергии пластического деформирования переходит в тепло. Разрушение материала задавали с помощью критерия Кокрофта-Латэма (Cockcroft-Latham) [6]

$$W = \int_0^{\varepsilon_p} \max(\sigma_1, 0) d\varepsilon_p \leq W_{cr} \quad (11)$$

σ_1 – первое главное напряжение, W_{cr} – критическая величина энергии пластического деформирования на единицу объема. При использовании модифицированной модели Джонсона-Кука нет необходимости использовать уравнение состояния для материала.

Таблица 1. Параметры модифицированной модели Джонсона-Кука для броневой стали

Параметр	Символ	Единица измерения	Значение
Плотность	ρ_0	кг/м ³	7850
Модуль упругости	E	ГПа	210
Модуль сдвига	G	ГПа	80
Кэфф. Пуассона	ν		0,33
Деформационное упрочнение	A	МПа	2030
	B	МПа	568
	n		1,0
	C		0,001
Базовая скорость деформирования	$\dot{\varepsilon}_0$	c ⁻¹	0,0005
Температурное разупрочнение	C_p	Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	452
	T_r	К	293
	T_m	К	1800
	m		1,0
	χ		0,9
Параметры разрушения	W_{cr}	МПа	2310

Коэффициенты трения между дискретными элементами в данном случае могут рассматриваться только как подгоночные параметры. Необходимость задания столь высоких коэффициентов трения можно объяснить тем, что сферические частицы являются достаточно грубой аппроксимацией реальной раздробленной керамики, которая находится под ударником. Однако, применение метода связанных дискретных элементов позволило получить картину разрушения, схожую с

описанными в литературе, и применяемыми для аналитических расчетов (рис.1).

Результаты процесса внедрения бронебойной пули в керамо-металлические структуры в разные моменты времени с найденными величинами коэффициентов трения. Видно, что для более тонкой керамики сформированный конус Герца является менее выраженным, что говорит об неэффективности использования тонкого лицевого керамического слоя.

References:

Impact Factor:	ISRA (India)	= 6.317	SIS (USA)	= 0.912	ICV (Poland)	= 6.630
	ISI (Dubai, UAE)	= 1.582	ПИИИ (Russia)	= 0.191	PIF (India)	= 1.940
	GIF (Australia)	= 0.564	ESJI (KZ)	= 8.100	IBI (India)	= 4.260
	JIF	= 1.500	SJIF (Morocco)	= 7.184	OAJI (USA)	= 0.350

1. Aptukov, V.N., Murzakaev, A.V., & Fonarov, A.V. (1992). *Prikladnaya teoriya pronikaniya*. (105p.). Moscow: Nauka.
2. Fomin, V.M., Gulidov, A.I., Sapojnikov, G.A., et al. (1999). *Vysokoskorostnye vzaimodeystvie tel.* (600p.). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN.
3. Aptukov, V.N., & Xasanov, A.R. (2014). Optimizatsiya parametrov sloistyx plit pri dinamicheskom pronikanii jestkogo indentora s uchetom treniya i oslablyayushhego effekta svobodnyx poverkhnostey. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Mexanika*, 2014, № 2, pp. 48-75.
4. Gerasimov A.V., Mixaylov V.N., & Surkov V.G. (2006). Udarное nagrujenie kombinirovannyx pregrad. *Mexanika kompozitsionnyx materialov i konstruksiy*, 2006, T. 12, № 2, pp. 237-255.
5. Gerasimov, A.V., & Pashkov, S.V. (2004). Chislennoe modelirovanie yestestvennogo drobleniya tverdyx tel. *Fizicheskaya mezomexanika*, 2004, T. 7, Spes. vyp. Ch.1, pp.313-316.
6. Gerasimov, A.V., & Pashkov, S.V. (2005). Modelirovanie yestestvennogo drobleniya tverdyx tel pri udarnyx i vzryvnyx nagrujeniyyax. *Ximicheskaya fizika*, 2005, T. 24, № 11, pp.48-54.
7. Gerasimov, A.V., & Pashkov, S.V. (2013). Chislennoe modelirovanie probitiya sloistyx pregrad. *Mexanika kompozitsionnyx materialov i konstruksiy*, 2013, T. 19, № 1, pp. 49-61.
8. Glazyrin V.P., Trushkov V.G., & Olshanskiy A.B. (2002). Probitie sloistyx pregrad, soderzhashhix keramicheskie sloi. *Vychislitelnye tekhnologii*, 2002, T. 7, ch. 2, pp. 163-171.
9. Ben-Dor G., Dubinsky A., & Elperin T. (2005). Optimization of two-component composite armor against ballistic impact. *Composite Structures*, 2005, Vol. 69, pp. 89-94.
10. Ben-Dor, G., Dubinsky, A., & Elperin, T. (2009). Improved Florence model and optimization of two-component armor against single impact or two impacts. *Composite Structures*, 2009, Vol. 88, pp. 158-165.
11. Borvik, T., Dey, S., & Clausen, A.H. (2009). Perforation resistance of five different high strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, Vol. 36, pp. 948-964.
12. (2015). Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo kontaktnogo vzaimodeystviya udarnika i sloistoy pregrady/ T.G. Mexonoshina, M.A. Sokovikov, O.B. Naymark, Yu.V. Bayandin. *Matematicheskoe modelirovanie v yestestvennyx naukax*, 2015. T.1. pp. 277-280.
13. (2006). A computational analysis of the ballistic performance of lightweight hybrid composite armors / M. Grujicic, B. Pandurangan, K.L. Koudela, B. Cheeseman. *Applied Surface Science*, 2006 - Vol. 253, pp. 730-745.
14. Mehonoshina, T.G., Sokovikov, M.A., Najmark, O.B., & Bajandin, Jy.V. (2015). Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo kontaktnogo vzaimodeystviya udarnika i sloistoy pregrady/. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennyh naukah*, 2015. T.1. pp. 277-280.
15. Goncalves, D.P., de Melo, F.C.L., Klein, A.N., & Al-Qureshi, H.A. (2004). Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, Vol. 44, Issue 2-3, pp. 307-316.
16. Mexonoshina, T.G., Sokovikov, M.A., Naymark, O.B., & Bayandin, Yu.V. (2015). Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo kontaktnogo vzaimodeystviya udarnika i sloistoy pregrady. *Matematicheskoe modelirovanie v yestestvennyx naukax*, 2015. T.1. pp. 277-280.