

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

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: 24.06.2025
 Accepted/Published: 30.06.2025 <https://T-Science.org>

Issue

Article



Israil Mirzayevich Karimov
 Institute of Chemistry and Technology
 docent, Tashkent, Uzbekistan
israilkarimov@mail.ru

Utkir Abdunazar ugli Urolov
 Institute of Chemistry and Technology
 doctorant, Tashkent, Uzbekistan
utkirbek_urolov@mail.ru

HIGH-VELOCITY IMPACT OF A STEEL BALL ON A TWO-LAYER PLATE

Abstract: This paper presents a numerical study of the high-speed impact interaction of a steel ball with a two-layer metal target. The simulation was performed using the explicit finite element method. The Johnson-Cook model was used to describe the material behavior under intense plastic deformation and failure. Two target configurations were considered: "aluminum-copper" and "copper-aluminum". The influence of the layer arrangement on the penetration dynamics and the ballistic resistance of the structure was analyzed. It was found that the "copper-aluminum" configuration provides more effective absorption of the impact energy, which is manifested in a significant reduction in the residual velocity of the projectile and an increase in the ballistic limit velocity. The results demonstrate the critical importance of layer order optimization in the design of protective structures.

Key words: high-speed impact, two-layer plate, finite element method, Johnson-Cook model, numerical simulation, ballistic limit, copper, aluminum.

Language: Russian

Citation: Karimov, I.M., & Urolov, U.A. (2025). High-velocity impact of a steel ball on a two-layer plate. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 06 (146), 127-132.

Soi: <https://s-o-i.org/1.1/TAS-06-146-27> **Doi:** <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2025.06.146.27>

Scopus ASCC: 2600.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР СТАЛЬНОГО ШАРА О ДВУХСЛОЙНУЮ ПЛАСТИНУ

Аннотация: В работе представлено численное исследование процесса высокоскоростного ударного взаимодействия стального шара с двухслойной металлической преградой. Моделирование выполнено методом конечных элементов в явной постановке. Для описания поведения материалов при интенсивных пластических деформациях и разрушении использована модель Джонсона–Кука. Рассмотрены две конфигурации преграды: «алюминий–медь» и «медь–алюминий». Проанализировано влияние порядка расположения слоёв на динамику пробития и баллистическую стойкость конструкции. Установлено, что конфигурация «медь–алюминий» обеспечивает более эффективное поглощение энергии удара, что проявляется в значительном снижении остаточной скорости ударника и увеличении баллистической предельной скорости. Результаты демонстрируют критическую важность оптимизации порядка слоёв при проектировании защитных конструкций.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, двухслойная пластина, метод конечных элементов, модель Джонсона–Кука, численное моделирование, баллистический предел, медь, алюминий.

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

Введение

Исследование процессов высокоскоростного ударного взаимодействия является ключевым для решения широкого спектра прикладных задач в области материаловедения и проектирования защитных конструкций. Многие инженерные объекты, подверженные ударным нагрузкам, такие как бронежилеты, броня транспортных средств и защитные оболочки космических аппаратов, имеют неоднородную, часто многослойную структуру [1-7]. Это усложняет анализ их поведения, но вместе с тем открывает возможности для создания более эффективных защитных систем.

Изучение удара по многослойным преградам позволяет оптимизировать технологические процессы (например, ударную штамповку), повышать безопасность зданий и сооружений, а также разрабатывать лёгкие и прочные композитные материалы с заданной баллистической стойкостью. Теоретический подход, основанный на математическом моделировании, является мощным инструментом для достижения этих целей. Он позволяет прогнозировать деформации, напряжения и характер разрушения в каждом слое преграды, анализировать влияние скорости и массы ударника, а также оптимизировать толщину и порядок расположения слоёв без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

Постановка задачи и методология исследования

В работе рассматривается задача о нормальном ударе стального шара по двухслойной пластине. Для описания процесса используется математическая модель, основанная на уравнениях механики сплошной среды.

Основное уравнение динамики имеет вид [8]:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала, u_i – перемещение в направлении i , σ_{ij} – тензор напряжений, f_i – объёмные силы, x_j – координаты.

Упругая деформация описывается законом Гука:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (2)$$

где C_{ijkl} – тензор упругих констант, ε_{kl} – тензор деформации.

Для описания пластического течения и разрушения материалов при высоких скоростях

деформации применяется модель Джонсона–Кука [9]. Уравнение модели имеет следующий вид:

$$\sigma_y = (A + B \varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T^{*m}) \quad (3)$$

где: σ_y – предел текучести, A, B, C, n, m – параметры материала, ε_p – пластическая деформация, $\dot{\varepsilon}_p$ – скорость пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_0$ – эталонная скорость деформации, T^* – безразмерная температура, определяемая как $\left(T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)$, где T_0, T_m – соответственно комнатная и температура плавления материала.

Разрушение материала моделируется с помощью критерия накопления повреждений Джонсона–Кука. Параметр повреждения D определяется по формуле:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f}, \quad (4)$$

где $\Delta \varepsilon_p$ – приращение пластической деформации на каждом шаге, а ε_f – критическая деформация, при которой происходит разрушение.

Критическая деформация ε_f определяется по следующей формуле [10]:

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \cdot e^{D_3 \cdot \sigma^*}] \cdot \left(1 + D_4 \cdot \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \cdot (1 + D_5 \cdot T^*), \quad (5)$$

где: D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 – параметры материала, $\sigma^* = \frac{p}{\sigma_{eff}}$ – отношение гидростатического давления p к эквивалентному напряжению σ_{eff} .

Разрушение элемента происходит при достижении $D \geq 1$.

Численное решение системы уравнений (1)–(5) выполняется методом конечных элементов в явной динамической постановке. Геометрия ударника и пластины дискретизируется на конечные элементы. Для решения системы уравнений движения используется явная схема интегрирования по времени, где на каждом шаге Δt ускорения, скорости и перемещения узлов вычисляются последовательно. Шаг по времени Δt определяется критерием Куранта для обеспечения устойчивости решения. Моделирование выполнено в программном комплексе Abaqus/Explicit.

Рассматривается удар стального шара радиусом 5 мм по двухслойной квадратной пластине. Каждый слой имеет размеры $100 \times 100 \times 5$ мм. Пластины жёстко закреплены по боковым граням и между собой. Физико-механические свойства стали, алюминия и меди приведены в табл. 1.

В области контакта сетка конечных элементов сгущена для повышения точности расчётов (рис. 1).

Таблица 1. Физико-механические свойства материалов [9, 11]

Характеристики	Алюминий	Медь
Модуль Юнга (E):	70 GPa	128 GPa

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

Коэффициент Пуассона (ν):	0.33	0.32
Плотность (ρ):	2660 kg/m ³	8960 kg/m ³
Характеристики модели Джонсона - Кука:	$A=167 \text{ MPa}$; $B=596 \text{ MPa}$; $n=0.551$; $C=0.001$; $m=0.859$; $D_1=0.0261$; $D_2=0.263$; $D_3=-0.349$; $D_4=0.147$; $D_5=16.8$	$A=90 \text{ MPa}$; $B=292 \text{ MPa}$; $n=0.31$; $C=0.025$; $m=1.12$; $D1=0.54$; $D2=4.89$; $D3=3.03$; $D4=0.014$; $D5=1.12$
Температура плавления:	$T_m=600^\circ \text{ C}$	$T_m=1083^\circ \text{ C}$
Энергия разрушения	100 J/m ²	85 J/m ²

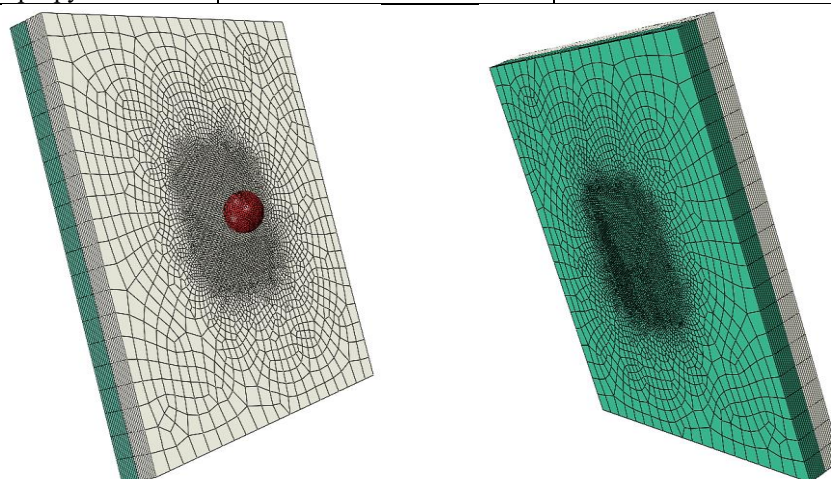


Рисунок 1. Конечно-элементная сетка двухслойной пластины

Результаты и их обсуждение

Исследовано два варианта расположения слоёв:

1. **Pr-Al-Cu:** Удар по алюминиевой пластине, за которой расположена медная.
2. **Pr-Cu-Al:** Удар по медной пластине, за которой расположена алюминиевая.

На рис. 2 показано изменение скорости шара при начальной скорости 600 м/с.

В конфигурации Pr-Al-Cu шар полностью пробивает алюминиевый слой к моменту времени 0,016 мс и начинает взаимодействовать с медью. Скорость шара продолжает снижаться, но её недостаточно для пробития второго, более прочного и плотного медного слоя. Шар останавливается и отскакивает с небольшой скоростью (рикошет). В конфигурации Pr-Cu-Al

скорость шара уменьшается более интенсивно. К моменту 0,056 мс шар практически останавливается, не сумев пробить медный слой. Это свидетельствует о более высокой сопротивляемости медного слоя при прямом контакте.

На рис. 3 показано состояние системы в момент времени 0,03 мс. В случае Pr-Al-Cu (a) шар уже находится внутри медного слоя, вызывая его интенсивную деформацию с формированием купола на тыльной стороне. В случае Pr-Cu-Al (b) шар лишь частично проник в медный слой, вызвав образование характерной «короны» из отколотого материала и сильную локальную деформацию.

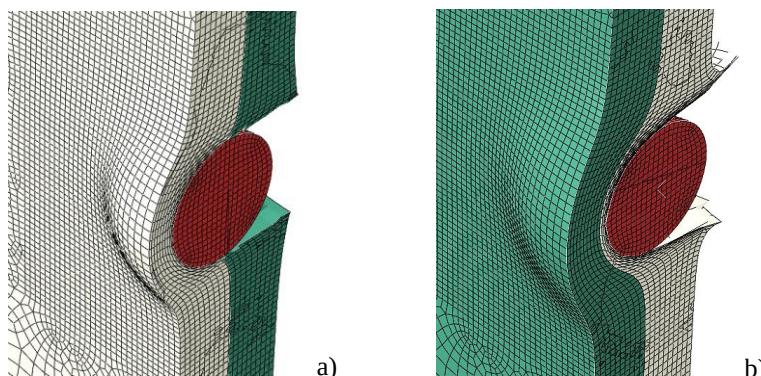
Далее было проведено моделирование при начальной скорости 800 м/с, достаточной для полного пробития обеих конфигураций (рис. 4).

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



Рисунок 2. Изменение скорости шара во времени ($V_0 = 600$ м/с)



а) Шар-алюминий-медь; б) Шар-медь-алюминий

Рисунок 3. Состояние системы в момент времени $t = 0,03$ мс

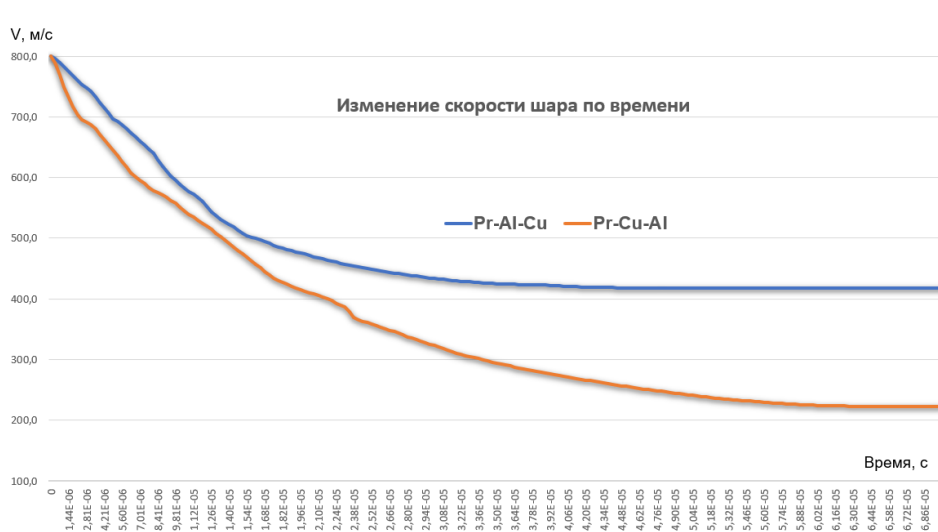


Рисунок 4. Изменение скорости шара во времени ($V_0 = 800$ м/с)

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

Для конфигурации «шар–алюминий–медь» остаточная скорость составила 418,2 м/с, а время пробития - 0,045 мс. Для обратной конфигурации «шар–медь–алюминий» остаточная скорость была значительно ниже - 223 м/с, а время пробития увеличилось до 0,063 мс. Эти результаты наглядно демонстрируют, что расположение более прочного и плотного материала (меди) на лицевой стороне преграды приводит к более эффективному поглощению кинетической энергии ударника.

На основе серии расчётов были определены баллистические предельные скорости (минимальная скорость для полного пробития):

- Для конфигурации «алюминий–медь»: 650 м/с.

- Для конфигурации «медь–алюминий»: 750 м/с.

Более высокий баллистический предел для конфигурации с медью в качестве первого слоя подтверждает её превосходство в качестве защитной структуры.

Заключение

Проведено численное моделирование высокоскоростного взаимодействия стального шара с двухслойными преградами «алюминий–медь» и «медь–алюминий». На основании

полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Порядок расположения слоёв является критическим фактором, определяющим защитные характеристики преграды. Размещение более плотного и прочного материала (меди) на лицевой стороне значительно повышает её баллистическую стойкость.

2. Конфигурация «медь–алюминий» обеспечивает лучшее поглощение энергии удара. Это выражается в более низкой остаточной скорости ударника (223 м/с против 418,2 м/с при $V_0 = 800$ м/с) и большем времени взаимодействия, что свидетельствует о более эффективном процессе торможения.

3. Баллистическая предельная скорость выше для конфигурации «медь–алюминий» (750 м/с против 650 м/с), что делает её предпочтительной при проектировании бронезащитных систем. Прочный первый слой способствует ранней деформации и разрушению ударника, а более пластичный второй слой поглощает остаточную энергию.

Результаты моделирования подтверждают важность структурной оптимизации многослойных защитных систем для достижения максимальной эффективности.

References:

1. Fomin, V.M., Gulidov, A.I., Sapojnikov, G.A., et al. (1999). *Vysokoskorostnye vzaimodeystvie tel.* (600p.). Novosibirsk: Izd-vo SO RAN
2. Aptukov, V.N., Murzakaev, A.V., & Fonarov, A.V. (1992). *Prikladnaya teoriya pronikaniya.* (105p.). Moscow: Nauka.
4. Zlatin N.A., Mishin G.I., et al. (1974). *Ballisticheskiye ustanovki i ix primeneniye v eksperimentalnix issledovaniyax* (344p). Moscow: Nauka.
5. Vitman, F.F., & Stepanov, V.A. (1959) *Vliyaniye skorosti deformirovaniya na soprotivleniye metallov pri udarnix skorostyax 10^2 – 10^3 m/s // Nekotorye problemi prochnosti tyvordogo tela* (386p). Moscow-Leningrad: AN SSSR.
6. Bajenov, V.G., & Kotov, V.L. (2011). *Matematicheskoye modelirovaniye nestandartnix protsessov udara i pronikaniya osesimmetrichnix tel i identifikatsiya svoystv gruntovix sred* (208p). Moscow: FIZMATLIT
7. Glazyrin V.P., Trushkov V.G., & Olshanskiy A.B. (2002). *Probitie sloistyx pregrad,* soderjashhix keramicheskie sloi. *Vychislitelnye tekhnologii*, 2002, T. 7, ch. 2, pp. 163-171
8. Gerasimov, A.V., & Pashkov, S.V. (2013). *Chislennoye modelirovaniye probitiya sloistyx pregrad. Mexanika kompozitsionnykh materialov I konstruksiy*, 2013, T. 19, № 1, pp. 49-61.
9. (2009). *ABAQUS Theory Manual*. Retrieved from <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/stm/default.htm>
10. Johnson, G.R., & Cook, W.H. (1983). *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics.* The Hague, Netherlands, pp. 541–547.
11. Johnson, G.R., & Cook, W.H. (1985). *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics.* 1985. Vol. 21, No. 1. pp. 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.

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

12. Rai, R., Kumar, G., & Dagar, S., et al. (2021). Numerical simulation of ballistic impact on aluminium 5083-H116 plate with Johnson cook plasticity model // *Materials Today:*

Proceedings. 2021. Vol. 44. pp. 2390–2395.
DOI: 10.1016/j.matpr. 2021.01.373.