

## Экспериментально-теоретическое исследование процесса высокоскоростного взаимодействия стального ударника с двухслойным металлокерамическим материалом\*

А.Ю. Саммель<sup>1</sup>, А.Б. Скосырский<sup>1</sup>, А.С. Дьячковский<sup>1</sup>,  
А.Н. Ищенко<sup>1</sup>, В.В. Буркин<sup>1</sup>, В.А. Кудрявцев<sup>1</sup>,  
Е.Ю. Степанов<sup>1</sup>, А.В. Чупашев<sup>1</sup>, М.В. Хабибуллин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Приведены результаты экспериментально-теоретических исследований высокоскоростного взаимодействия стального цилиндрического ударника с конической головной частью с градиентно-слоистым металлокерамическим материалом ( $TiB_2+Ti_xCo_y$ )+Ti. Методом математического моделирования проведен расчет высокоскоростного взаимодействия данной металлокерамической пластины с ударником в рамках упруго-идеально-пластической модели Прандтля – Рейсса. Проведена оценка торможения ударника в процессе высокоскоростного взаимодействия. Показано, что данный градиентно-слоистый металлокерамический материал способен эффективно рассеивать кинетическую энергию удара.

**Ключевые слова:** ударник, высокоскоростное взаимодействие, металлокерамическая пластина, математическое моделирование.

Градиентно-слоистые металлокерамические материалы [1–5] представляют собой особый класс композиционных материалов, которые демонстрируют превосходные механические свойства по сравнению с обычными монолитными материалами. Основная идея заключается в создании слоистой структуры, состоящей из чередующихся слоев металла и керамики. Каждый слой имеет разные физические и механические свойства, что позволяет материалу эффективно рассеивать энергию удара.

В настоящей работе для получения комбинированного металлокерамического материала был использован метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Полученный двухслойный металлокерамический материал является композицией из двух слоев, один из которых представляет собой продукт экзотермической реакции системы Ti+V+Co в виде прослойки, полученной за счет приложения давления к разогретому СВС-продукту, а другой – подложка, роль которой играет титановая пластина. С целью исследования высокоскоростного взаимодействия стального ударника с комбинированным металлокерамическим материалом ( $TiB_2+Ti_xCo_y$ )+Ti были проведены баллистические испытания и математическое моделирование. Данная металлокерамическая пластина имела общую толщину 11.8 мм, которая складывалась из толщины лицевого металлокерамического слоя 8.8 мм и толщины тыльного слоя 3 мм. Общая поверхностная плотность данной пластины равнялась  $5.94 \text{ г/см}^2$ , твердость металлокерамического слоя составляла 85 HRA. На рис. 1 приведен внешний вид изготовленной металлокерамической пластины.

Проведено экспериментальное исследование данного двухслойного металлокерамического материала при высокоскоростном взаимодействии с ударником цилиндрической формы, имеющим конусную головную часть (рис. 2, а). Ударник диаметром 6 мм, выполненный из стали марки У12 с твердостью 86 HRA, разогнался с помощью испытательной установки с использованием пластикового ведущего устройства (рис. 2, б). В процессе взаимодействия изучался характер разрушения металлокерамического материала.

Процесс взаимодействия фиксировался высокоскоростной камерой. Характерные кадры высокоскоростного взаимодействия ударника с металлокерамической пластиной приведены на рис. 3. При подлете к исследуемой пластине ударник имел скорость 626 м/с. На рис. 3 отчетливо видно, что в начальный момент соударения (б) наблюдается интенсивный вынос металлокерамического материала в области контакта с ударником. В процессе внедрения ударника в металлокерамическую пластину вынос материала только увеличивается, о чем свидетельствует кадр, представленный на рис. 3, в, где также наблюдается начало движения титановой подложки. При даль-

\* Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).