

## Особенности скоростного торцевого удара металлических пластин

© В.А. Велданов<sup>1</sup>, С.В. Федоров<sup>1</sup>, М.А. Максимов<sup>1</sup>,  
А.Ю. Даурских<sup>1</sup>, М.Ю. Сотский<sup>1</sup>, В.С. Козлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup>НПП «Контур», Москва, 105120, Россия

*Рассмотрены экспериментальные и расчетные результаты по высокоскоростному взаимодействию (800...1500 м/с) пластинчатых ударников из дюралюминия толщиной  $h = 1,5$  мм и  $h = 3,0$  мм с массивными (полубесконечными) мишенями из дюралюминия. Ширина и длина ударников составляли соответственно  $7,7h$  и  $14h$  для ударников толщиной 3 мм и  $15,5h$  и  $28h$  для ударников толщиной 1,5 мм. Исследовано влияние скорости взаимодействия на глубину, объем и форму кратера (каверны), образуемого в мишени. Рассмотрено влияние наличия поддона на результаты ударного взаимодействия. Показано, что поперечные размеры кратера составляют  $(5...9)h$ , при этом продольные размеры кратера могут составлять  $1,35...2,0$  ширины пластинчатого ударника. Проведено сравнение результатов взаимодействия пластинчатых ударников и осесимметричных стержневых ударников при одинаковых условиях встречи с мишенью.*

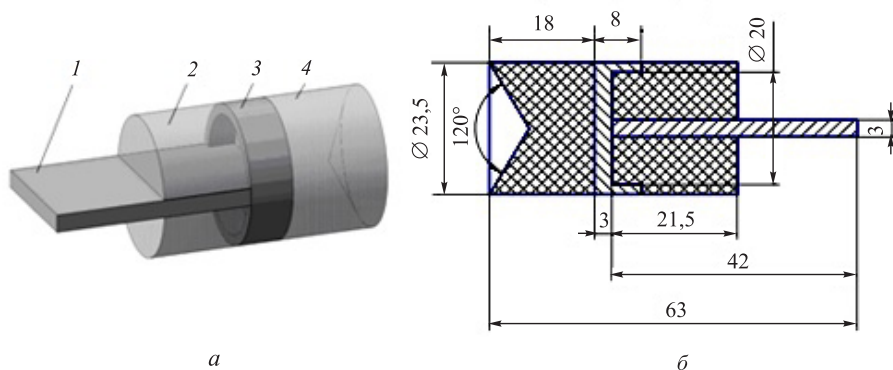
**Ключевые слова:** пластинчатый ударник, поддон, ударное взаимодействие, мишень, дюралюминий, кратер.

**Введение.** Рассмотрению высокоскоростного проникания удлиненных ударников (как сплошных, так и при наличии осевых отверстий) в металлические и другие прочные преграды по нормали, под углом и с углами атаки посвящено значительное число работ [1–3]. При этом широко используются разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана методы пьезоакселерометрии [4, 5], обеспечивающие получение основных силовых характеристик высокоскоростного взаимодействия удлиненных тел с преградами. Методы пьезоакселерометрии позволяют исследовать влияние на процесс ударного взаимодействия основных механических характеристик материалов, в частности такой характеристики, как сжимаемость [6, 7]. Исследования ударного группового взаимодействия с преградами показали, что группа ударников обладает лучшей проникающей способностью, чем одиночные ударники [8]. Это явление отмечено как для группы ударников, расположенных пространственно вокруг центрального ударника, так и для группы ударников, расположенных в одной плоскости. При уменьшении зазора между ударниками наблюдается увеличение глубины проникания в мишени. Предельным случаем для схемы метания ударников, находящихся в одной плоскости и расположенных вплотную друг к другу, является метание плоских (пластинчатых) ударников. Далее приведе-

ны и проанализированы экспериментальные и расчетные результаты высокоскоростного ударного взаимодействия таких плоских ударников с массивными (полубесконечными) мишенями.

**Результаты экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования особенностей проникания металлических плоских ударников в металлические преграды проводились с использованием гладкоствольной баллистической установки калибром 23,5 мм. Ударники и мишень изготавливались из дюралюминия твердостью HRB 40 и HRB 47 соответственно. Для метания плоского ударника с минимальным углом атаки при встрече с преградой были изготовлены метаемые сборки, включающие ударник толщиной 3 и 1,5 мм, шириной 23 мм и длиной 42 мм, разрезное ведущее устройство из полиэтилена, диск из дюралюминия Д16 и поддон из полиэтилена (рис. 1).

Мишени опирались на массивную стальную плиту.



**Рис. 1.** Метаемая сборка (а) и ее размеры (б):  
1 — ударник; 2 — ведущее устройство; 3 — диск; 4 — поддон

Основная группа исследований проводилась на ударниках толщиной 3 мм. Масса плоского ударника 8,1 г, масса ударника вместе с ведущим устройством и диском 18 г, поддона 7 г.

Исследование проводились при скоростях встречи  $V$  в диапазоне 820...1 470 м/с.

Для оценки степени влияния ведущего устройства на форму и глубину кратера также применялись сборки, не содержащие этого устройства.

Анализ экспериментальных данных показывает, что конструкция метаемой сборки (т. е. наличие или отсутствие ведущего устройства) не оказывает существенного влияния на глубину и форму образуемого при ударном взаимодействии кратера.

В результате воздействия плоских ударников в мишени образовывался кратер овальной формы шириной  $a$  и длиной  $b$ . Глубина кратера  $H$  измерялась относительно лицевой поверхности мишени. В со-

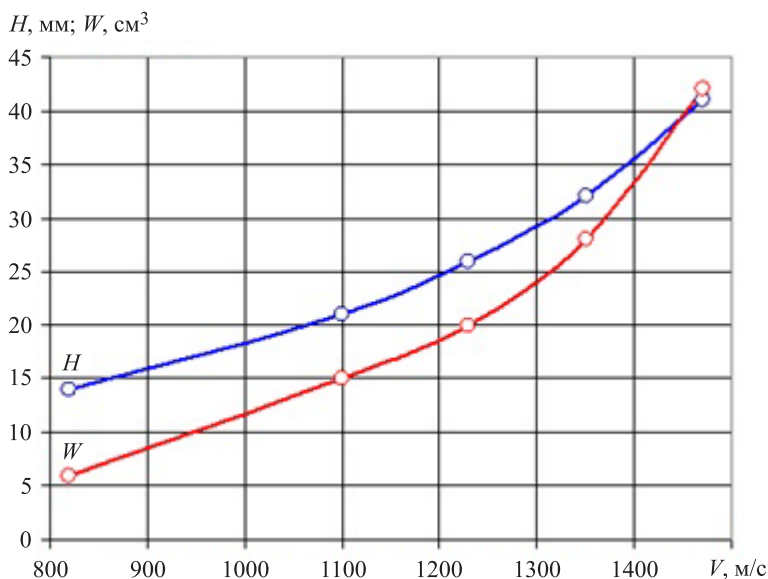
ответствии с полученными размерами определялся объем кратера  $W$  (табл. 1). В таблице представлены средние значения параметров, полученные при одинаковых скоростях взаимодействия.

Таблица 1

**Экспериментальные результаты взаимодействия плоских ударников толщиной 3 мм с мишенью при массе сборки ( $25 \pm 0,5$ ) г**

Скорость встречи $V$ , м/с	Размеры овала кратера, мм		Глубина кратера $H$ , мм	Объем кратера $W$ , см <sup>3</sup>
	$a$	$b$		
820	15	31	14	6
1100	21	38	21	15
1230	22	40	26	20
1350	23	41	32	28
1470	27	46	41	42

Графики изменения глубины и объема кратера в зависимости от скорости взаимодействия приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость глубины кратера  $H$  и его объема  $W$  от скорости встречи  $V$  плоского ударника

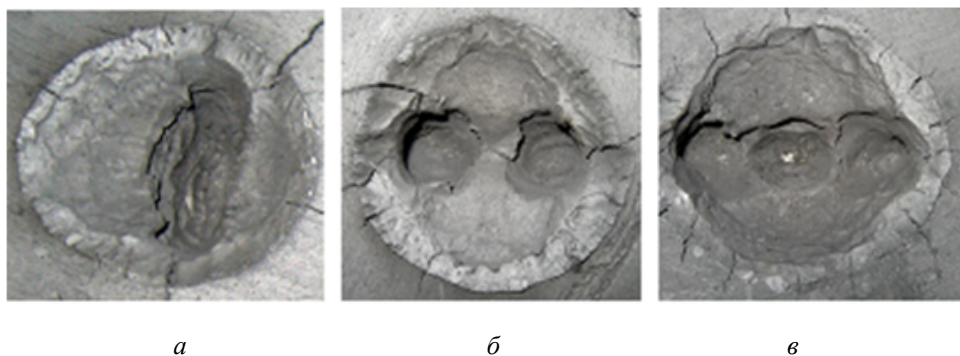
Результаты экспериментов по прониканию плоских ударников толщиной 3 мм позволяют сделать следующие выводы:

- форма кратера в поперечном сечении представляет собой овал, поперечные и продольные размеры которого составляют соответственно 5...9 толщин пластиночного ударника и 1,35...2,0 его ширины;

- при увеличении скорости встречи от 820 до 1 470 м/с ширина кратера увеличивается в большей степени (в 1,8 раза), чем продольные размеры (в 1,5 раза);

- темпы роста объема кратера  $W$  с увеличением скорости встречи выше, чем темпы роста глубины кратера  $H$ .

Для оценки влияния размеров и формы плоских ударников на характеристики кратера были проведены эксперименты по прониканию пластин с теми же размерами (шириной 23 мм и длиной 42 мм), но толщиной 1,5 мм, а также толщиной 3 мм с одним продольным вырезом шириной 13 мм и с двумя продольными вырезами шириной 4,6 мм. Образованные продольными вырезами выступы имели ширину 4,6 мм. Результаты взаимодействия представлены на рис. 3 и в табл. 2.



**Рис. 3.** Кратеры, полученные при толщине плоского ударника 1,5 мм (а) и при одном (б) и двух (в) продольных вырезах в плоском ударнике толщиной 3 мм

Таблица 2

**Экспериментальные результаты взаимодействия с мишенью плоских ударников толщиной 1,5 мм без вырезов и 3 мм с продольными вырезами при массе сборки  $(22 \pm 0,5)$  г**

Толщина ударника $h$ , мм	Количество вырезов	Скорость встречи $V$ , м/с	Размеры овала кратера, мм		Глубина кратера $H$ , мм	Объем кратера $W$ , см <sup>3</sup>
			$a$	$b$		
1,5	0	1 350	16	39	29	15
3	1		18	41	30	20
	2		16	45	31	22

Получено, что при уменьшении толщины плоского ударника с 3 до 1,5 мм глубина кратера  $H$  и его длина  $b$  в поперечном сечении незначительно уменьшаются (в 1,1 и 1,05 раза соответственно), но при этом существенно уменьшается объем кратера  $W$  (в 1,9 раза) и его ширина  $a$  (в 1,4 раза). Что касается ударников с вырезами, то по

сравнению с плоскими ударниками без вырезов практически при той же глубине кратера они имеют меньшие в 1,3–1,4 раза объем  $W$  и ширину  $a$  кратера. При этом смыкание отдельных кратеров, образованных выступами, в единый кратер происходит при ширине выреза не более 1,5 толщины ударника.

**Численные результаты.** Целью численного расчета было оценить влияние наличия металлического диска и полиэтиленового поддона на глубину проникания и форму кратера при взаимодействии плоских и цилиндрических ударников с мишенями.

Для оценки проникающей способности ударников применялась методика численного моделирования взрывных и ударных процессов с позиций механики сплошных сред, реализованная в программном комплексе «ЭРУДИТ» (эвристический расчет упорядоченного движения индивидуальных точек) [5, 9]. Этот комплекс, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана, использует вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек.

Суть используемого численного метода заключается в следующем. В расчетной области вводится неподвижная эйлерова сетка с прямоугольными ячейками в радиальном и осевом направлениях. В те ячейки эйлеровой сетки, которые оказываются внутри области расчетного поля, занятой средой, помещаются индивидуальные (лагранжевы) точки среды. Индивидуальные точки не имеют размеров и массы, в данных точках определены все параметры среды: радиальная и осевая компоненты вектора скорости, плотность, компоненты тензора напряжений. Каждая точка характеризуется также своими радиальной и осевой координатами.

Каждой ячейке эйлеровой сетки ставится в соответствие пара целых чисел  $(i, j)$ , где  $i$  — номер данной ячейки в радиальном направлении, а  $j$  — в осевом. Той же парой чисел будем индексировать и все параметры среды в индивидуальной (лагранжевой) точке, находящейся в данный момент времени в эйлеровой ячейке  $(i, j)$ . Для определения эволюции параметров в лагранжевой точке, находящейся в данный момент времени в ячейке эйлеровой сетки  $(i, j)$ , используются параметры лагранжевых точек из четырех соседних эйлеровых ячеек. Если какие-либо из этих эйлеровых ячеек оказываются пустыми (не занятыми средой), то считается, что в них находятся фиктивные точки, имеющие такие же компоненты вектора скорости, что и рассматриваемая индивидуальная точка  $(i, j)$ , при нулевом давлении. Введение фиктивных лагранжевых точек позволяет единым образом рассчитывать эволюцию параметров всех индивидуальных точек независимо от количества имеющихся у них соседних точек. Данный алгоритм всесторонне протестирован и хорошо зарекомендовал себя при решении различного класса задач высокоскоростного ударного взаимодействия [10, 11].

С помощью этого метода проведено численное моделирование проникания в полубесконечную дюралюминиевую преграду дюралюминиевых ударников — плоского и цилиндрического, длина и диаметр которого равны соответственно длине и толщине плоского ударника (42 и 3 мм). Предел текучести материала ударника и мишени принимался равным 400 МПа. Скорость ударников во всех случаях составляла 1 230 м/с. Расчеты показали существенное влияние наличия поддона и диска на глубину проникания (рис. 4–7).

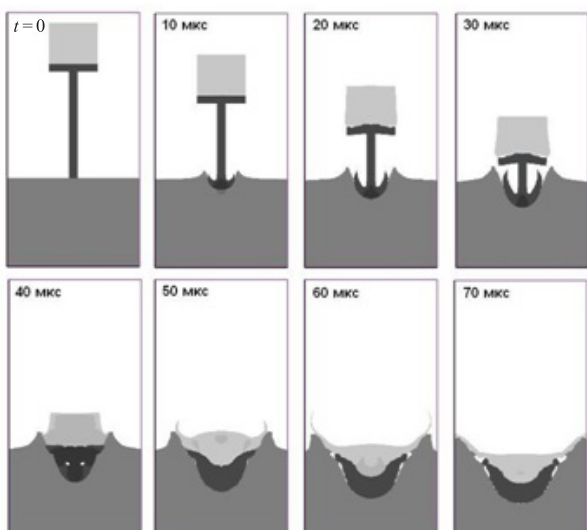


Рис. 4. Проникание плоского ударника при наличии поддона и диска

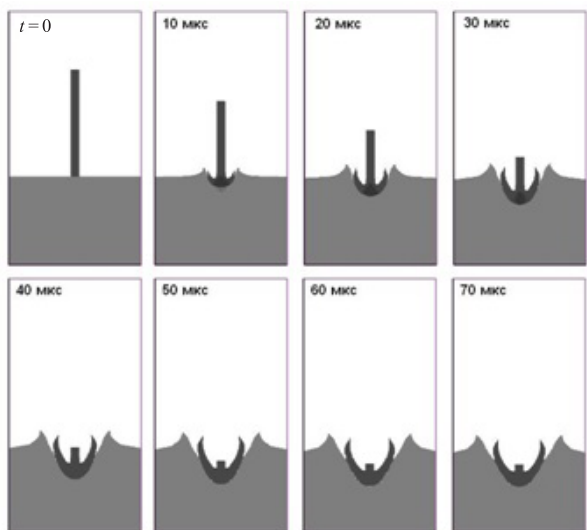
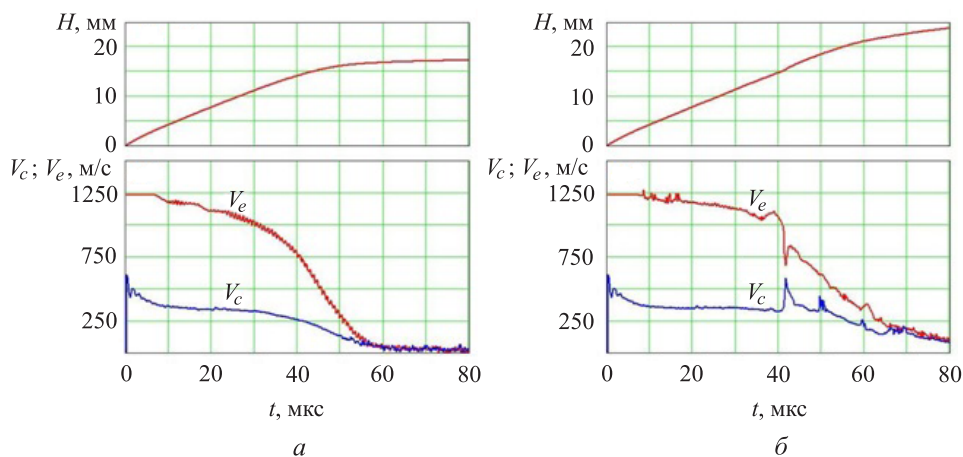
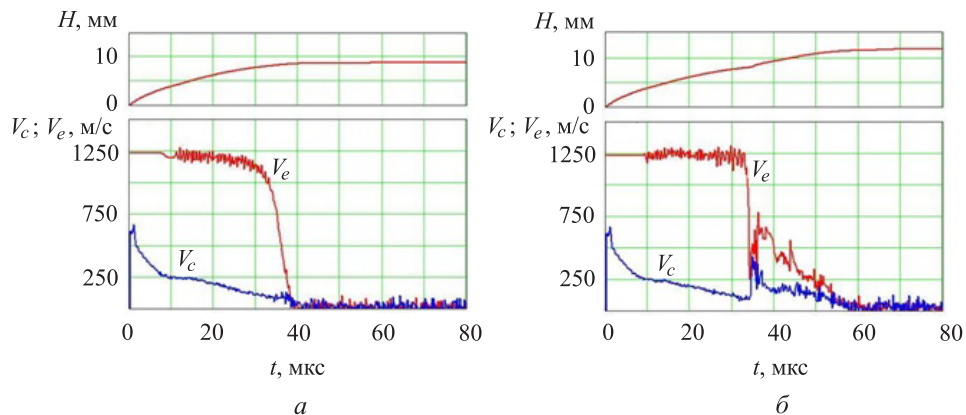


Рис. 5. Проникание плоского ударника при отсутствии поддона и диска



**Рис. 6.** Временные зависимости глубины проникания  $H$ , скорости проникания  $V_c$  и скорости заднего торца  $V_e$  плоских ударников при отсутствии (а) и наличии (б) поддона и диска



**Рис. 7.** Временные зависимости глубины проникания  $H$ , скорости проникания  $V_c$  и скорости заднего торца  $V_e$  цилиндрических ударников при отсутствии (а) и наличии (б) поддона и диска

Наличие поддона и диска обеспечивает полное срабатывание плоского ударника в мишени, это дает более длительное воздействие ударника на мишень и приводит к увеличению глубины проникания и времени взаимодействия с мишенью в 1,4 и 1,45 раза соответственно по сравнению с ударниками, не имеющими поддона и диска (см. рис. 6). Аналогичные соотношения наблюдаются и при проникании цилиндрических ударников. Наличие поддона и диска приводит в этом случае к увеличению глубины проникания и времени взаимодействия с мишенью в 1,37 и 1,5 раза соответственно (см. рис. 7).

Расчеты показывают, что плоские ударники как при наличии, так и при отсутствии поддона и диска обеспечивают в 2 раза большую

глубину проникания по сравнению с цилиндрическими ударниками (табл. 3).

Таблица 3

**Глубина кратера (мм) при проникании различных видов ударников**

Вид ударника	Без поддона и диска	С поддоном и диском
Плоский	17,2	24,2
Цилиндрический	8,7	11,9

Проведение экспериментальных исследований при отсутствии поддона и диска крайне затруднительно, так как требует их отсечки перед взаимодействием ударника с мишенью. В связи с этим для приближенных оценок можно использовать данные по взаимодействию с мишенями ударников, метаемых с помощью поддона и диска, уменьшая полученные глубины в 1,5 раза. Определенные таким образом оценки будут отражать глубины проникания плоских и цилиндрических ударников, не имеющих поддона и диска.

**Заключение.** Показано, что поперечные размеры кратера составляют  $(5...9)h$ , при этом его продольные размеры могут составлять  $1,35...2,0$  ширины плоского ударника. При увеличении скорости встречи от 820 до 1 470 м/с ширина кратера в поперечном сечении увеличивается в большей степени (в 1,8 раза), чем его продольные размеры (в 1,5 раза), темпы роста объема кратера  $W$  с увеличением скорости встречи выше, чем темпы роста глубины кратера  $H$ .

С уменьшением толщины ударника в 2 раза глубина кратера практически не изменяется, однако при этом существенно (в 1,9 раза) уменьшается его объем, главным образом за счет уменьшения ширины кратера в поперечном сечении.

Выполнение продольных вырезов в пластинчатых ударниках практически не приводит к уменьшению глубины кратера, но при этом существенно (в 1,3–1,4 раза) уменьшаются его объем и ширина. Для образования единой полости за счет смыкания кратеров от отдельных выступов, образованных вырезами, необходимо, чтобы размеры выреза не превышали 1,5 толщины плоского ударника.

С помощью численных методов изучено влияние наличия поддона и металлического диска, используемых при метании сборок с ударниками. Показано, что наличие поддона и диска обеспечивает полное срабатывание плоского и цилиндрического ударников в мишени. Это обеспечивает более длительное воздействие ударника на мишень, чем в случае с ударниками, не имеющими поддона и диска, и приводит к увеличению глубины проникания в 1,5 раза. Сравнение результатов расчетов взаимодействия с мишенью пластинчатых



и осесимметричных стержневых ударников при одинаковых условиях показывает, что плоские (пластинчатые) ударники как при наличии, так и при отсутствии поддона и диска обеспечивают в 2 раза большую глубину проникания.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-08319).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Велданов В.А., Дудик Д.Е., Максимов М.А., Федоров С.В., Козлов В.С. Влияние угла атаки на проникание удлиненных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1 (13). URL: <http://engjournal.ru/articles/572/572.pdf>.
- [2] Марахтанов М.К., Велданов В.А., Максимов М.А., Тарасов М.А. Некоторые особенности взаимодействия металлического снаряда с металлической преградой. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2009, № 59, с. 43–53.
- [3] Велданов В.А., Максимов М.А., Федоров С.В., Козлов В.С. Оценка влияния размеров внутренних отверстий полых алюминиевых ударников на размеры кратера в алюминиевой мишени. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Экспериментальные исследования перспективных материалов, конструкций и систем», с. 83–89.
- [4] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М., Федоров С.В. Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2 (79), с. 37–46.
- [5] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, вып. 7, с. 94–104.
- [6] Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, № 9, с. 45–51.
- [7] Гусаров А.П., Жариков А.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сообщиков А.Н. Механические и амортизирующие свойства высокопористого ячеистого алюминия. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2009, № 1 (74), с. 58–66.
- [8] Велданов В.А., Максимов М.А., Федоров С.В., Даурских А.Ю., Козлов В.С. Особенности проникания группы ударников в металлические преграды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Экспериментальные исследования перспективных материалов, конструкций и систем», с. 74–82.
- [9] Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1 (100), с. 65–83.
- [10] Федоров С.В., Велданов В.А. Численное моделирование формирования каверны в грунте при воздействии потока высокоскоростных металлических ударников. *Журнал технической физики*, 2006, т. 76, № 7, с. 134–137.

- [11] Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии. *Журнал технической физики*, 2007, т. 77, № 10, с. 131–134.

Статья поступила в редакцию 30.03.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Велданов В.А., Федоров С.В., Максимов М.А., Даурских А.Ю., Сотский М.Ю., Козлов В.С. Особенности скоростного торцевого удара металлических пластин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1384.html>

**Велданов Владислав Антонович** родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 230 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: [vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)

**Федоров Сергей Владимирович** родился в 1964 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1987 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1992 г. Старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: [sergfed-64@mail.ru](mailto:sergfed-64@mail.ru)

**Максимов Михаил Александрович** (1955–2013) работал заведующим сектором Специального конструкторского-технологического бюро прикладной робототехники. Автор более 35 научных работ в области динамики и механики сплошных сред.

**Даурских Анна Юрьевна** родилась в 1986 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирантка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: [anna.daurkikh@gmail.com](mailto:anna.daurkikh@gmail.com)

**Сотский Михаил Юрьевич** родился в 1948 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1972 г. Канд. техн. наук, ведущий инженер Управления научной и инновационной деятельности (УНИД) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 130 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: [msotsky.bmstu@mail.ru](mailto:msotsky.bmstu@mail.ru)

**Козлов Виктор Сергеевич** родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Д-р техн. наук, генеральный директор Научно-производственного предприятия «Контур». Автор более 100 научных работ в области механики деформируемого твердого тела и высокоскоростного удара. e-mail: [v-kozlov-90gbk-ru@ya.ru](mailto:v-kozlov-90gbk-ru@ya.ru)

## Features of high-speed face blow of flat blade projectiles

© V.A. Veldanov<sup>1</sup>, S.V. Fedorov<sup>1</sup>, M.A. Maximov<sup>1</sup>,  
A.Yu. Dauriskikh<sup>1</sup>, M.Yu. Sotskiy<sup>1</sup>, V.S. Kozlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>2</sup>Research Industrial Enterprise «Contour», Moscow, 105120, Russia

*The article presents experimental results and numerical simulations of flat blade projectiles high-speed interaction with massive semi-infinite duraluminium targets. We studied interaction velocity in the range of 800...1500 mps and two values of projectile thickness  $h = 1.5$  and 3 mm. Width and length of the projectiles were 7.7h and 14h for the 3mm-thick blades, and 15.5h and 28h for 1.5mm-thick blades. Influence of impact velocity on depth, volume and shape of the cavern formed in the target was investigated. Influence of the sabot on the results of the interaction was also studied. It was shown that transverse dimensions of the cavern are equal to 5...9h, while the longitudinal dimensions can be equal to 1.35...2.0 of the plate width. A comparison of the investigation results of blade projectile and axisymmetric projectile interaction with target showed that planar projectiles had advantages in depth of penetration and in width of the formed crater over cylindrical ones.*

**Keywords:** blade projectiles, sabot, high-speed interaction, target, duraluminium, cavern.

### REFERENCES

- [1] Veldanov V.A., Dudik D.E., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovations*, 2013, issue no. 1(13). Available at: <http://engjournal.ru/articles/572/572.pdf>.
- [2] Marakhtanov M.K., Veldanov V.A., Maksimov M.A., Tarasov M.A. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh voysk — Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*, 2009, no. 59, pp. 43–53 [in Russian].
- [3] Veldanov V.A., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Kozlov V.S. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2011, special issue "Experimental research of perspective materials, designs and systems", pp. 83–89 [in Russian].
- [4] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Sotskiy Yu.M., Fedorov S.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2010, no 2 (79), pp 37–46 [in Russian].
- [5] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 7, pp. 992–1002.
- [6] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 9. pp. 1266–1271.
- [7] Gusarov A.P., Zharikov A.V., Markov V.A., Ovchinnikov A.F., Pusev V.I., Selivanov V.V., Soobshchikov A.N. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2009, no. 1 (74), pp. 58–66 [in Russian].
- [8] Veldanov V.A., Maksimov M.A., Fedorov S.V., Dauriskikh A.Yu., Kozlov V.S. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya "Mashinostroenie" — Herald of the*

*Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2011, special issue “Experimental research of perspective materials, designs and systems”, pp. 74–82 [in Russian].

- [9] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya “Machinostroenie” — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Mechanical Engineering*, 2015, no. 1 (100), pp. 65–83 [in Russian].
- [10] Fedorov S.V., Veldanov V.A. *Zhurnal tekhnicheskay fiziki — The Russian Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 51, no. 7, pp. 952–955.
- [11] Fedorov S.V. *Zhurnal tekhnicheskay fiziki — The Russian Journal of Applied Physics*, . 2007, vol. 52, no. 10, pp. 1379–1382.

**Veldanov V.A.** (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. Ph.D. (Eng.), Associate Member of RANS, Associate Professor of the High-Precision Airborne Devices Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of terminal ballistics and mechanics of deformable solid body. e-mail: [vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru).

**Fedorov S.V.** (b. 1964) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1987 and from Lomonosov Moscow State University in 1992. Senior lecturer of the High-Precision Airborne Devices Department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of physics of explosion and high-velocity impact. e-mail: [sergfed-64@mail.ru](mailto:sergfed-64@mail.ru).

**Maksimov M.A.** (1955–2013) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1978. He was head of the Sector of Special Design and Technological Bureau of Applied Robotics. Author of more than 35 publications in the field of dynamics and mechanics of continua.

**Daurskikh A.Yu.** (b. 1986) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2011. Post-graduate of the High-Precision Airborne Devices Department at the Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 publications in the field of terminal ballistics and mechanics of deformable solid body. e-mail: [anna.daurskikh@gmail.com](mailto:anna.daurskikh@gmail.com).

**Sotskiy M.Yu.** (b. 1948) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1972. Ph. D. (Eng.), a leading engineer of the Department of Scientific and Innovative Activity of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 130 publications in the field of terminal ballistics and mechanics of deformable solid body. e-mail: [msotsky.bmstu@mail.ru](mailto:msotsky.bmstu@mail.ru)

**Kozlov V.S.** (b.1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Dr. Sci. (Eng.), general director of the Scientific and Production Enterprise “Kontur”, winner of the RF Government Prize. Author of more than 100 publications in the field of mechanics of deformable solids and high-speed shock. e-mail: [v-kozlov-90gbk-ru@ya.ru](mailto:v-kozlov-90gbk-ru@ya.ru)