



Посвящается памяти Ульяна Гайковича Пирумова

**МАТЕРИАЛЫ XIX МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ
И СОВРЕМЕННЫМ ПРИКЛАДНЫМ
ПРОГРАММНЫМ СИСТЕМАМ**



ВМСППС'2015

24–31 мая 2015 г.

Алушта, Крым





Dedicated to the memory of Ulian Gaikovich Pirumov

**PROCEEDINGS
OF THE XIX INTERNATIONAL CONFERENCE
ON COMPUTATIONAL MECHANICS
AND MODERN APPLIED SOFTWARE SYSTEMS**



CMASS'2015

**24–31 May, 2015
Alushta, Crimea**



УДК 519.6:517.958:533.6
ББК 22.2:2218
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-08-20276г)
и Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), 24–31 мая 2015 г., Алушта.** — М.: Изд-во МАИ, 2015. — 760 с.: ил.

ISBN 978-5-4316-0242-9

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные мировые достижения в вычислительной механике, механике деформируемого твердого тела, механике жидкости, газа и плазмы, аэрокосмической механике, прикладной математике, разработке прикладных программных средств.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, разработчиков современных прикладных программных систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике
и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015),
24–31 мая 2015 г., Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

Подписано в печать 27.04.15. Формат 70 × 100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 61,75
Тираж 400 экз. Изд. №323

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «АРТИШОК продакшн»,
125476, Россия, Москва, ул. Василия Петушкова, д. 8, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0242-9

© Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), 2015

индентор», поведение системы «сооружение–основание». В ППО сформирована и используется база данных деформационных и прочностных характеристик материалов; можно задавать различные начальные и граничные условия, в том числе размеры и особенности исследуемой конструкции, характеристики воздействий. Разработанное ППО позволяет визуализировать динамику развития зон пластичности и разрушения, изменения температуры, строить графики интересующих пользователя величин, например таких, как энергия, температура, необратимые деформации, напряжения и т. д.

На рис. 1 показаны графики распределения температуры по поверхности мишени в задаче об ударе ($V_0 = 250$ м/с) стальным ударником по мишени из алюминия в различные моменты времени. Ось абсцисс — расстояние от центра мишени до ее края (центру мишени соответствует 0, краю ударника — 0,5, краю мишени — 1). По оси ординат откладывается T К. Линия 1 — температура в начальный момент времени ($T_0 = 293$ К), линии 2–5 показывают величину температуры через 2, 6, 11 и 15 мкс соответственно. Локальные максимумы температуры находятся в области под центром и под краем ударника.

1. Зуев В. В. Определяющие соотношения теории пластичности в пространствах деформаций и напряжений // Доклад АН СССР. — 1978. — Т. 242, №4. — С. 792–795.
2. Зуев В. В. Определяющие соотношения и динамические задачи для упруго-пластических сред с усложненными свойствами. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 174 с.
3. Зуев В. В., Шмелева А. Г. Некоторые актуальные задачи динамического нагружения упруго-пластических сред с усложненными свойствами // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — Н. Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2011. — №4, часть 5. — С. 2189–2191.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОТИВОУДАРНОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ПРЕГРАД ИЗ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ*

*А. Н. Ищенко, С. А. Афанасьева, Н. Н. Белов, В. В. Буркин,
К. С. Рогаев, А. Н. Табаченко, Н. Т. Югов*

ТГУ, Томск, Россия

На основании проведенных исследований установлены режимы получения бескристаллических деформационно-компактированных в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов, позволяющие получать материалы более высокого качества с высокими экономичностью и производительностью. Кроме того, применение деформационного компактирования, к разогретому за счет химической реакции продукту синтеза, открывает путь к получению принципиально новых материалов с повышенными прочностными и специальными свойствами: слоистых, градиентных, градиентно-слоистых комбинированного строения и т. д., в том числе, с высокотвердой керамической составляющей. Отличительной особенностью получения защитных преград на данном этапе является установление оптимальных составов и технологических режимов получения композиционных материалов.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №2014/223 (код проекта 1362).

Плотные (беспористые) пластины из металлокерамики на основе ($TiB_2 + V_4C$) получены методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) и приложением давления до 1000 тонн к продукту горения в специальной пресс-форме. Кроме керамических компонентов в состав шихты вводится пластическая металлическая составляющая с высокой адгезионной способностью и низкой плотностью. Введение металлической связки при сохранении высокой твердости, тугоплавкости, сравнительной легкости и износостойкости делает материал более пластичным, вязким, препятствует росту трещин при сжатии и, особенно при растяжении, когда разрушение идет в основном по границам зерен.



Рис. 1. Образцы защитных пластин из металлокерамика на основе $TiB_2 + V_4C$ и Al_2O_3

На рис. 1 приведены разработанные образцы металлокерамики на основе ($TiB_2 + V_4C$), помещенные на преграду — «свидетель» — круглый диск из дюралюминиевого сплава (Д16Т) диаметром 160 мм и толщиной 70 мм, в табл. 1 приведены их характеристики при различных долях металлической связующей, что проявляется в изменении плотности. Пластина из оксида алюминия Al_2O_3 , полученная методом высокотемпературного спекания из прессованной порошковой заготовки, взята для сравнения. Защитные пластины 4П и 5П на основе ($TiB_2 + V_4C$) имеют слоистое строение с более твердым лицевым слоем.

Свойства защитных материалов

Номер образца	Материал	Плотность ρ_0 , г/см ³	Толщина пластины $h_{обр}$, мм	Твердость лицевой стороны, ед. НРА	Твердость тыльной стороны, ед. НРА
4П	$TiB_2 + V_4C$	3,25	11,69	79	68
5П	$TiB_2 + V_4C$	3,50	9,6	83	72
6П	$TiB_2 + V_4C$	3,60	9,9	88	88
9П	Al_2O_3	3,9	11,62	88	88

С целью определения противоударной стойкости пластин из металлокерамики на основе ($TiB_2 + V_4C$) проедены баллистические испытания соударения стальных сферических ударников с составными мишенями, содержащими образцы исследуемых материалов, расположенных на преграде — «свидетеле», и математическое моделирование соударения в рамках модели [1, 2]. Наряду с характеристиками кратера в «свидетеле» определялась величина эквивалентной глубины кратера $L_{эkv} = h + h_{обр}\rho_0/\rho_d$, где ρ_d — плотность Д16Т (табл. 2). За базовую точку исследования принят эксперимент 1. При соударении в базовом эксперименте в преграде — «свидетеле» образовался кратер и остаток ударника массой 1,72 г. Расхождение расчета с экспериментом 5%.

В опыте 2 образец из керамики 9П (Al_2O_3) при ударе разрушился в мелкую крошку. При соударении с металлокерамическими пластинами ударник полностью

«срабатывался», пластины также разрушались. Проведены расчеты взаимодействия стального сферического ударника (рис. 2) с мишенью, состоящей из плитки 4П ($\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$), повторяющие условия опыта 3. Ударник взаимодействует с мишенью со скоростью $V_0 = 2500$ м/с. В результате удара металлокерамическая плитка разрушилась, ударник проник в «свидетель», при этом полностью «сработался». В «свидетеле» образовался кратер глубиной $h = 4,77$ мм, расхождение с экспериментом 2%.

Таблица 2

Результаты экспериментов

№ опыта	V_0 , м/с	Ударник		Образец	h , мм	D , мм	$L_{\text{экв}}$, мм
		m_c , г	d , мм				
1	2595	2,18	8,00	Д16Т	19,47	15,7	
2	2531	2,16	8,00	9П (Al_2O_3)	7,03	20,79	22,93
3	2500	2,18	8,00	4П ($\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$)	4,68	21,81	18,76
4	2470	2,18	8,00	5П ($\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$)	6,30	19,31	18,62
5	2470	2,18	8,00	6П ($\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$)	6,61	17,56	19,83

V_0 — скорость удара; m_c — масса ударника; d — диаметр ударника; $h_{\text{обр.}}$ — толщина образца; h — глубина кратера в преграде-«свидетеле»; D — диаметр кратера

Таким образом, образцы металлокерамических материалов на основе ($\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$) имеют преимущество по противоударной стойкости по сравнению с керамикой Al_2O_3 .

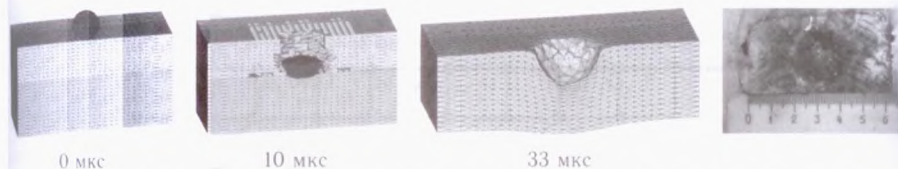


Рис. 2. Хронограмма и результат эксперимента проникания стального сферического ударника в составную мишень из металлокерамической плитки на основе ($\text{TiB}_2 + \text{V}_4\text{C}$), при $V_0 = 2500$ м/с

Математическое моделирование высокоскоростного взаимодействия стальных сферических ударников с составными мишенями, содержащими нанопропроченные металлокерамические материалы, показало удовлетворительное согласование с экспериментом по глубине проникания ударника в преграду — «свидетель», что говорит о возможности использования расчета для оценки результатов соударения в исследуемом диапазоне скоростей.

- Белов Н. Н., Афанасьева С. А., Табаченко и др. Математическое моделирование процессов деформирования и разрушения металлокерамики в условиях динамического нагружения // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2000. — Т. 44, вып. 8. — С. 54–62.
- Югов Н. Т., Белов Н. Н., Югов А. А. Расчет адиабатических нестандартных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3) / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. патентам и товарным знакам. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010611042. Москва, 2010.