

05;06

## **Синтез двухслойного металлокерамического материала на основе тугоплавких соединений и титана для условий высокоскоростного соударения**

© В.В. Буркин, А.Н. Табаченко, С.А. Афанасьева<sup>¶</sup>, А.Н. Ищенко,  
А.Ю. Саммель, А.Б. Скосырский, А.В. Чупашев

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики  
Национального исследовательского Томского государственного  
университета, Томск, Россия

<sup>¶</sup> E-mail: s.a.afanasyeva@mail.ru

Поступило в Редакцию 3 июля 2017 г.

Рассматривается возможность повышения физико-механических характеристик композиционных материалов для условий высокоскоростного соударения путем получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза металлокерамических материалов с переменным составом, в том числе слоистого типа. Разработан двухслойный металлокерамический материал на основе диборида титана со связкой из никлида титана, расположенного на металлическом слое титана. Исследование противоударной стойкости данного композита в сравнении с таковой для однородной титановой пластины показало качественное преимущество, выражающееся в отсутствии ударного кратера в пластине после соударения со стальным сферическим ударником, а также в более сильной деформации и предразрушении в виде трещинообразования последнего.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.08.45968.16945

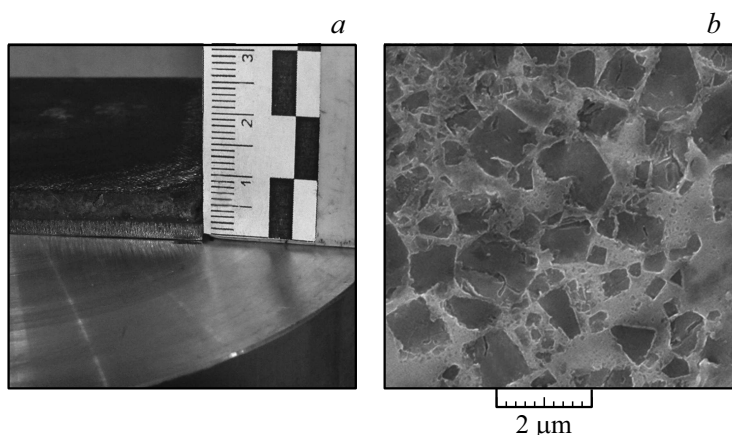
В условиях высокоскоростного соударения защитные керамические материалы являются хрупкими и ненадежными. В целом высокотвердые керамики содержат большое число концентраторов напряжений (границ зерен, трещин, пор и т.д.), на которых активизируется зарождение разрушений даже в области упругого деформирования материала. Микроразрушения в таких материалах могут появиться при сжатии

под действием девиаторных напряжений. С увеличением интенсивности импульса нагрузки степень микроразрушений в фазе сжатия резко возрастает, что приводит впоследствии к падению сопротивления растяжению [1]. В последнее время наблюдается возрастающий интерес к разработке высокопрочных композитов [2,3].

Одним из перспективных методов повышения физико-механических характеристик композиционных материалов для условий высокоскоростного соударения является получение металлокерамических материалов с переменным составом, в том числе слоистого типа, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с одновременным приложением давления к слоистой заготовке, содержащей экзотермическую порошковую смесь. Целью данного исследования является разработка с помощью метода СВС комбинированного двухслойного металлокерамического материала на основе продукта синтеза экзотермической системы диборида титана со связкой из интерметаллида — никилида титана ( $TiB_2 + NiTi$ ), расположенного на металлическом слое титана, а также исследование его ударной стойкости в сравнении со стойкостью однородной титановой пластины.

Разработанные СВС-технологии, опережающие по научной и технической проработке зарубежные исследования, позволяют эффективно решать проблему создания материалов нового поколения [4,5]. Экспериментальные исследования соударения разработанных образцов комбинированного металлокерамического материала с шаровым стальным ударником проведены на высокоскоростном баллистическом комплексе [6].

Для получения комбинированного металлокерамического материала используется композиция из двух слоев, один из которых представляет собой продукт экзотермической реакции системы  $Ti + B + Ni$  в виде прослойки, полученной за счет приложения давления к разогретому СВС-продукту, а другой — металлический слой  $Ti$ , который обеспечивает достаточную адгезию. Для управления параметрами горения (скорости и температуры) экзотермических смесей порошков титана, бора и никеля при неизменном их количественном соотношении выбран способ регулирования среднего размера частиц бора, который осуществляется за счет смешивания двух марок порошков бора. Экспериментальные исследования показали, что скорость горения выбранных экзотермических смесей можно менять за счет дисперсности бора в несколько раз, в частности от 8.3 cm/s для смесей с аморфным бором до 1.5 cm/s для



**Рис. 1.** Образец комбинированного металлокерамического материала ( $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$ ) + Ti: *a* — внешний вид, *b* — микроструктура лицевого слоя ( $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$ ).

смесей с поликристаллическим. При этом изменение скорости горения в зависимости от соотношения аморфного и поликристаллического бора имеет нелинейный характер. Температура горения в системе  $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$  меняется от 2100 до 1750°С и характеризуется более слабой зависимостью от соотношения аморфного и поликристаллического бора. Изучение микроструктуры композиционных материалов с разным соотношением аморфного и кристаллического бора выявило как общие, так и отличительные признаки в структуре металлокерамик. Во всех случаях после СВС наблюдается основная структура, представляющая собой смесь мелкокристаллических частиц  $\text{TiB}_2$  размером до  $5\mu\text{m}$  и равномерно распределенной связующей фазы из интерметаллида  $\text{NiTi}$ . При высокой доле поликристаллического бора в исходной смеси  $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$  наблюдается незначительное количество крупных кристаллов, вероятно примесных. В результате проведения дюрометрических исследований установлено, что эти кристаллы являются очень твердыми. Их микротвердость не зависит от соотношения аморфного и кристаллического бора в металлокерамике и составляет от 2000 до  $8500\text{ kg/mm}^2$ . Микротвердость основной области, т.е. частиц  $\text{TiB}_2$

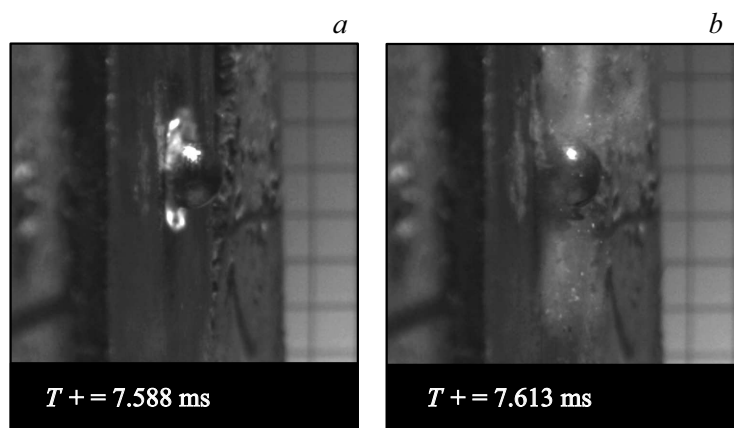
Влияние схемы нагружения на предел прочности двухслойного металлокерамического материала  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  при трехточечном изгибе

Слой, воспринимающий сжимающие нагрузки при изгибе	Предел прочности на изгиб, МПа
$\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$	605
Ti	292
$(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$ (боковая нагрузка)	365

и связующей матрицы NiTi, составляет от 750 до 2600 kg/mm<sup>2</sup>. Варьирование соотношения толщин экзотермических слоев и металлической подложки позволяет оптимизировать процесс практического получения композиционных материалов комбинированного строения, представляющих собой слоистую систему, состоящую из металлокерамического слоя, неразрывно связанного с металлическим или металлокерамическим слоем другого состава.

Далее рассмотрен образец синтезированного методом СВС комбинированного двухслойного металлокерамического материала  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$ , лицевой слой которого (толщиной 4.7 mm) представляет собой металлокерамику на основе продукта синтеза экзотермической системы  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi})$  плотностью  $\rho_0 = 4.92 \text{ g/cm}^3$ , а тыльный слой (толщиной 3 mm) — титан марки ВТ1 плотностью 4.505 g/cm<sup>3</sup>. На рис. 1 приведены внешний вид пластины из комбинированного двухслойного металлокерамического материала  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$ , расположенной на подложке, для дальнейших баллистических испытаний, и микроструктура металлокерамического слоя  $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$ , полученная с помощью растрового микроскопа. На рис. 1, б наблюдается равномерная мелкодисперсная структура: темные фрагменты — кристаллы диборида титана ( $\text{TiB}_2$ ), светлые — связка из никлида титана (NiTi). Максимальный размер зеренной структуры не превышает 2 μm.

Для установления уровня механических свойств синтезированного материала проведены испытания на изгиб как однородных композиционных материалов системы  $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$ , так и комбинированных металлокерамических материалов — двухслойной системы  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$ . Определены пределы прочности при трехточечном изгибе однородных композиционных материалов системы  $\text{TiB}_2 + \text{NiTi}$ , которые в зависимос-



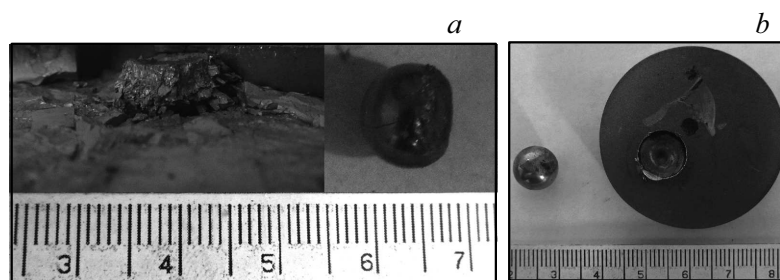
**Рис. 2.** Фоторегистрограмма взаимодействия стального сферического ударника с пластиной из  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$ : *a* — соударение, *b* — отскок ударника.

ти от соотношения аморфного и кристаллического бора составили в среднем от 450 до 550 МПа.

В таблице приведены данные для пределов прочности комбинированного металлокерамического материала при разных схемах его испытания.

Отличительной особенностью синтезированного металлокерамического материала является повышенная трещиностойкость по сравнению с таковой для однофазных высокопрочных керамик типа карбида бора, карбида кремния или оксида алюминия. Введение металлической связки делает материал более пластичным, вязким, препятствует росту трещин при сжатии и, особенно, растяжении, когда разрушение идет в основном по границам зерен. Вместе с тем уровень пластичности металлокерамик в целом незначителен и составляет несколько процентов. В связи с этим тыльный металлический слой такой слоистой системы дополнительно демпфирует ударную нагрузку на образец.

С целью определения противоударной стойкости пластин из комбинированной металлокерамики  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  проведены баллистические испытания соударения стального ударника с составными мишенями, содержащими пластины из исследуемого материала  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  и эквивалентного по поверхностной плотности титана



**Рис. 3.** Вид лицевой стороны преграды и ударника после соударения: *a* — пластина из  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$ , *b* — пластина титана ВТ1.

ВТ1 толщиной 8.5 mm, расположенные на преграде-„свидетеле“ из алюминиевого сплава Д16Т. В качестве ударника используется сферический элемент из стали ШХ-15 диаметром 10 mm.

На рис. 2 (в фиксированные моменты времени  $T$  с начала регистрации процесса) представлена фоторегистрограмма соударения ударника из стали с образцом комбинированного металлокерамического материала при скорости соударения  $V_0 = 435$  m/s: *a* — взаимодействие ударника и преграды при подлете справа налево; *b* — обратное движение ударника после соударения, отскок. В этот момент времени лицевой слой металлокерамики деформирован только в зоне удара. К сожалению, в последующие моменты после соударения к преграде подлетели составные части ведущего устройства метаемой сборки, которые не удалось предварительно отделить от ударника, и при их воздействии металлокерамический слой хрупко разрушился. На рис. 3 представлены лицевые поверхности пластин из  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  и титана после соударения. В зоне взаимодействия образца материала  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  с ударником наблюдается фрагмент металлокерамики в виде таблетки, который „впечатался“ в титановый слой (рис. 3, *a*). При взаимодействии ударника с титановой пластиной при скорости  $V_0 = 474$  m/s образуется кратер глубиной 4 mm (рис. 3, *b*). В этом случае также наблюдается отскок ударника от преграды после соударения. При взаимодействии с пластиной из  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  в ударнике наблюдается пластическая деформация и трещинообразование, при соударении с титановой пластиной — только незначительная пластическая деформация ударника.

По результатам анализа соударения стального сферического ударника с образцом  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  в сравнении с однородной титановой пластиной можно сделать вывод, что наблюдается качественное различие в характере взаимодействия и металлокерамическая пластина оказывает большее сопротивление прониканию стального ударника.

Таким образом, с помощью метода СВС разработан новый комбинированный двухслойный металлокерамический материал  $(\text{TiB}_2 + \text{NiTi}) + \text{Ti}$  на основе продукта синтеза экзотермической системы диборида титана со связкой из интерметаллида — никелида титана, расположенного на металлическом слое титана, с одновременным приложением давления к слоистой заготовке. Защитная пластина из данного материала обладает большей противоударной стойкостью, чем пластина из однородного титанового сплава ВТ1, проявляющейся в отсутствии ударного кратера в пластине, а также в более сильной деформации и предразрушении в виде трещинообразования стального сферического ударника.

В работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 9.9036.2017/8.9).

## Список литературы

- [1] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 408 с.
- [2] Пономарев О.В., Попов М.Ю., Тюкалова Е.В., Бланк В.Д. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. В. 21. С. 9–14.
- [3] Бетехтин В.И., Dvorak J., Кадомцев А.Г., Кардашев Б.К., Нарыкова М.В., Рааб Г.К., Sklenicka V., Фаузова С.Н. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 2. С. 58–64.
- [4] Табаченко А.Н., Крючкова Г.Г. // Инж.-физ. журн. 1993. Т. 65. № 4. С. 492–495.
- [5] Ищенко А.Н., Табаченко А.Н., Афанасьева С.А., Белов Н.Н., Буркин В.В., Марцунова Л.С., Рогаев К.С., Югов Н.Т. // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 9. С. 131–135.
- [6] Бураков В.А., Буркин В.В., Ищенко А.Н., Корольков Л.В., Степанов Е.Ю., Чупашев А.В., Агафонов С.В., Рогаев К.С. Экспериментальный баллистический комплекс. Патент на изобретение № 2591132. Заявка № 2015113676 от 13.04.2015.