УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ ТИТАН – ТРИАЛЮМИНИД ТИТАНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

^{1,2}Зелепугин А.С., ^{1,2}Зелепугин С.А.¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, e-mail: azel84@yandex.ru;²Томский научный центр СО РАН, Томск, e-mail: szel@yandex.ru

Представлены результаты численного исследования деформирования и разрушения многослойных композитов титан – триалюминид титана при ударно-волновом нагружении. Использована модель повреждаемой упругопластической среды. Для описания процесса разрушения интерметаллида применена модель хрупкого разрушения. Решение задачи выполнено модифицированным методом конечных элементов. В осесимметричной постановке исследовано поведение преграды, состоящей из семнадцати композиционных слоев, каждый из которых состоит из слоя титанового сплава (BT6) и слоя интерметаллида (триалюминид титана Al_3Ti). В расчетах варьировались толщины слоев интерметаллида/металл. Для исследованных условий нагружения найдено оптимальное соотношение толщин композиционного слоя. Проведены сравнения многослойных композитов с монолитными преградами из интерметаллида и титанового сплава. Установлено, что многослойный металл-интерметаллидный композит превосходит по прочностным характеристикам монолитную интерметаллидную преграду во всем исследованном диапазоне нагружения, а при оптимальном соотношении слоев интерметаллида/металл – и монолитную преграду из титанового сплава.

Ключевые слова: металл-интерметаллидный слоистый композит, высокоскоростной удар, деформация, разрушение, численное моделирование

NUMERICAL SIMULATION FOR THE FRACTURE OF MULTILAYERED TITANIUM – TITANIUM TRIALUMINIDE COMPOSITES AT HIGH-VELOCITY IMPACT

^{1,2}Zelepugin A.S., ^{1,2}Zelepugin S.A.¹National Research Tomsk State University, Tomsk, e-mail: azel84@yandex.ru;²Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, e-mail: szel@yandex.ru

The paper represents the numerical simulation of deformation and fracture of multilayered composites such as titanium-titanium trialuminide at high-velocity impact. The model of a damaged elastoplastic medium based on the active-type fracture model is used in the work. A wide-range brittle fracture model is applied to describe the fracture of intermetallic. The problem is solved using the finite element method that is modified to analyze the impact of deformable solids. The axisymmetric formulation is used to study the behavior of a composite target that consists of seventeen composite layers, each of which consists of a titanium alloy layer (Ti-6-4) and an intermetallic layer (Al_3Ti). In the calculations, the thickness of the intermetallic / metal layers was varied to evaluate the strength characteristics of the composite. An optimum ratio of the composite layer thickness was found for the loading conditions studied. The multilayered composites were compared with monolithic intermetallic and titanium targets. The results have shown that a multilayered metal-intermetallic composite has higher strength characteristics compared with a monolithic intermetallic target in the entire studied range of loading and also a monolithic titanium target with an optimal ratio of intermetallic / metal layers.

Keywords: metal-intermetallic laminate composite, high-velocity impact, deformation, failure, numerical simulation

Металло-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (МИСКМ) – перспективные материалы для авиакосмической отрасли и ряда других технических приложений [1–3]. Среди возможных МИСКМ выделяются системы титан-алюминий. В системе Ti-Al формирование интерметаллидного триалюминид титана Al_3Ti является термодинамически предпочтительным перед другими алюминидами титана – $AlTi$, $AlTi_2$. По сравнению с другими алюминидами титана у триалюминид титана ниже плотность ($3,3 \text{ г/см}^3$), выше модуль Юнга (216 ГПа) [1]. Интерметаллиды в целом обладают высокой твердостью и жесткостью, что означает высокий предел

прочности при сжатии. Такое свойство интерметаллидов обусловлено высокой прочностью межатомной связи. Обратной стороной данного свойства интерметаллидов является их хрупкий характер разрушения. В частности, интерметаллид Al_3Ti имеет низкую трещиностойкость $\sim 2 \text{ МПа м}^{1/2}$ [1]. Однако слоистый металл-интерметаллидный композит $Ti-Al_3Ti$, в котором друг за другом расположены слои титанового сплава и триалюминид титана, обладает повышенными удельными прочностными характеристиками, сравнимыми со сталью и керамическими материалами [1].

В исследованиях поведения МИСКМ при динамическом нагружении преоб-

ладают экспериментальные работы [4]. Однако в ходе быстропротекающего процесса сложно регистрировать динамику самого процесса, что затрудняет выявление механизмов разрушения. В то же время численное моделирование позволяет исследовать особенности деформирования, а также разрушения взаимодействующих тел во времени [5–7].

В данной работе выполнено численное моделирование деформирования и разрушения многослойных композитов титан – титаналюминид титана при высокоскоростном ударе. В расчетах варьировались толщины слоев интерметаллид/металл с целью оценки прочностных характеристик композита и поиска оптимального соотношения толщин слоев с точки зрения стойкости композита к высокоскоростному удару. Проведены сравнения многослойных композитов с монокристаллическими преградами из интерметаллида и титанового сплава.

Постановка задачи

Рассматриваемый процесс имеет нестационарный адиабатический характер. При его описании используется упругопластическая модель среды. Система основных уравнений включает уравнения сохранения массы, импульса, энергии [6]. Уравнение состояния (УРС) типа Ми – Грюнайзена (с выделением «холодной» и «тепловой» частей) определяет давление в материале в зависимости от удельных объема и внутренней энергии. Подбор коэффициентов в УРС проводится на основе констант ударной адиабаты Гюгонио. Определяющие соотношения связывают компоненты девиатора напряжений и компоненты тензора скоростей деформаций. При этом используется производная по Яуманну. Пластическое течение описывается с использованием условия текучести Мизеса. Учитывается влияние температуры и уровня поврежденности материала на прочностные характеристики среды (модуль сдвига и динамический предел текучести).

Для моделирования разрушения слоев из титанового сплава при растягивающих нагрузках используется кинетическая модель разрушения активного типа [6]. Для описания разрушения интерметаллида используется модель хрупкого разрушения [8].

Указанные выше модели работают в областях сжатия и растяжения. В областях интенсивного пластического деформирования применяется модель разрушения эрозионного типа [9]. В качестве критерия разрушения используется критическое зна-

чение удельной энергии сдвиговых деформаций. Удельная энергия сдвиговых деформаций E_{sh} вычисляется по формуле

$$\rho \frac{d E_{sh}}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij}. \quad (1)$$

Критерий хрупкого разрушения полагается зависящим от прочностных характеристик материала и начальной скорости удара:

$$E_{sh}^c = a_{sh} + b_{sh} v_0, \quad (2)$$

где a_{sh} , b_{sh} – константы модели. Когда выполняется условие

$$E_{sh} > E_{sh}^c \quad (3)$$

в расчетном конечном элементе, этот элемент полагается разрушенным и удаляется из расчета. Соседние расчетные узлы корректируются с учетом законов сохранения. Корректировка сводится к удалению масс узлов разрушенного элемента. В ходе такой корректировки масса какого-либо узла может стать равной нулю, в этом случае данный узел считается разрушенным и удаляется из расчета.

Такая процедура удаления массы из масс узлов соответствует закону сохранения массы. Физически процесс эрозионного разрушения означает отделение частиц от рассматриваемого образца в процессе нагружения и унос этих частиц в виде разрушенного материала. Такой процесс сопровождается уменьшением массы образца. При численном моделировании с использованием описанной выше модели эрозионного разрушения разрушенные элементы удаляются из конечно-элементной модели, что, в соответствии с физикой процесса эрозионного разрушения, сопровождается уменьшением массы рассматриваемого образца. Поэтому в соответствии с законом сохранения массы масса расчетных элементов также должна быть уменьшена на величину массы разрушенного материала.

Рассматривается задача взаимодействия ударника из вольфрамового сплава, имеющего коническую форму головной части, с многослойной композиционной преградой при высокоскоростном ударе. Задача решается в осесимметричной постановке. Для решения задачи используется модифицированный метод конечных элементов без глобальной матрицы жесткости, предназначенный для решения задач высокоскоростного нагружения [10].

Численные результаты

Численно моделировался процесс взаимодействия ударника из вольфрамового

сплава 93W-7FeCo с многослойной преградой. Диаметр ударника равен 6,15 мм, длина 23 мм. Угол раствора конуса ударника 50° , начальная скорость удара 900 м/с. Преграда состояла из 17 композиционных слоев, каждый из которых состоял из слоя интерметаллида Al_3Ti и слоя титанового сплава ВТ6. Толщины слоев титанового сплава и интерметаллида варьировались при общей неизменной толщине композиционного слоя, равной 1,17 мм. Толщина композиционной преграды составила 19,89 мм. Проведены также сравнения с монолитными интерметаллидной преградой и преградой из титанового сплава. Характеристики материалов приведены в [6].

Рис. 1, а, иллюстрирует расчетную конечно-элементную сетку. В преграде реализовано неравномерное разбиение вдоль радиуса с увеличением размера элементов по мере удаления от области взаимодействия. В рассматриваемом случае толщины слоев композиционного слоя составили 0,94 мм – интерметаллид Al_3Ti , 0,23 мм – титановый сплав ВТ6, что соответствует варианту «ж» в таблице. Рис. 1, б, в, представляют результаты расчета к моменту времени 60 мкс после начала взаимодействия, при этом приведена область взаимодействия без периферийной части преграды. На рис. 1, б приведены распределения удельной энергии сдвиговых деформаций начиная с 25 кДж/кг с интервалом от 75 до 200 кДж/кг; на рис. 1, в – удельного объема микроповреждений начиная с 0,0001 $\text{см}^3/\text{г}$ с интервалом до 0,02 $\text{см}^3/\text{г}$. Видно, что ударник

в ходе процесса деформируется и срывается, слоистая преграда выдерживает удар, хотя и значительно разрушается. На тыльной поверхности преграды формируется выпуклость, но сквозного пробития преграды не наблюдается.

Под действием ударника более половины слоев преграды разрушаются в области взаимодействия. Слои интерметаллида и титанового сплава разрушаются по разным механизмам. В титановом сплаве, в сравнении с интерметаллидом, в большей степени накапливается энергия сдвиговых деформаций (E_{sh}) вследствие пластических деформаций слоя и в значительно меньшей – удельный объем микроповреждений (V_f), что наглядно иллюстрирует рис. 1, в. Титановые слои таким образом препятствуют распространению магистральных трещин, формирующихся в хрупких интерметаллидных слоях под действием как сжимающих (в области удара перед ударником), так и растягивающих напряжений в остальных областях преграды. Области с максимальными значениями E_{sh} наблюдаются вдоль контактных поверхностей взаимодействующих тел. Области с максимальными значениями V_f наблюдаются около свободных поверхностей преграды (лицевой и тыльной), что обусловлено действием отраженных волн разгрузки, а также по ходу движения ударника.

На рис. 2 приведены распределения удельного объема микроповреждений в радиальном сечении во взаимодействующих телах в момент времени 60 мкс. Уровни V_f аналогичны рис. 1, в.

Рис. 1. Радиальное сечение ударника и многослойной преграды, вариант «ж» в таблице:
а – расчетная конечно-элементная сетка в начальный момент времени;
б, в – поля удельной энергии сдвиговых деформаций (кДж/кг) и удельного объема микроповреждений ($\text{см}^3/\text{г}$) во взаимодействующих телах в момент времени 60 мкс

Результаты моделирования для слоев МИСКМ различной толщины

	Толщина слоя, мм		Поверхностная плотность, г/см ²	Глубина проникания, мм		Средняя скорость, м/с	
	Al ₃ Ti	BT6		40 мкс	60 мкс	40 мкс	60 мкс
а	1,04	0,13	6,81	22,9	—	440	—
б	0,70	0,47	7,52	21,9	26,4	410	220
в	0,47	0,70	7,99	23,0	28,7	430	250
г	0,23	0,94	8,49	24,2	—	470	—
д	0	1,17	8,97	18,7	20,9	200	50
е	1,17	0	6,54	21,1	25,4	350	150
ж	0,94	0,23	7,02	17,0	18,5	150	30

Рис. 2. Удельный объем микроповреждений в радиальном сечении взаимодействующих тел в момент времени 60 мкс. Параметры вариантов а – е представлены в таблице

Указанные варианты отличаются соотношением толщин слоев интерметаллида и титанового сплава, при этом в варианте «а» толщина интерметаллидного слоя выше рассмотренного ранее (вариант «ж»), а в вариантах «б–г» – ниже. Для сравнения приведены результаты для монолитных преград из ВТ6 (рис. 2, д) и Al_3Ti (рис. 2, е). Все перечисленные варианты демонстрируют худшие результаты по сравнению с ранее рассмотренным вариантом. Этот же вывод подтверждают результаты расчетов, приведенные в таблице, где даны глубины внедрения и средние скорости ударника в моменты времени 40 и 60 мкс. Причем для некоторых вариантов не приводятся значения для момента времени 60 мкс, так как результат взаимодействия – сквозное пробитие – определяется раньше.

Заключение

Результаты численного моделирования деформирования и разрушения многослойных композитов титан – триалюминид титана при высокоскоростном ударе показывают, что композиционная преграда с отношением слоев триалюминид титана / титановый сплав ≈ 4 демонстрирует отсутствие пробития. Преграда из титанового сплава также выдерживает удар. Остальные композиционные преграды с соотношением слоев как выше 4, так и ниже, так же как и преграда целиком из интерметаллида, демонстрируют пробитие преграды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00037).

Список литературы

1. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic – intermetallic laminate composites // JOM. – 2005. – March. – P. 25–31.
2. Gerasimov A.V., Pashkov S.V., Cherepanov R.O. Protection of lightweight structural elements against explosive and impact loading // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – V. 11, no. 18. – P. 9430–9435.
3. Зелепугин С.А., Шкода О.А., ЛепакOVA О.К., Зелепугин А.С., Касацкий Н.Г., Шавнев А.А. Краснов Е.И. Синтез металл–интерметаллидного слоистого композиционного материала системы $Ti-TiAl_3$ различными методами // Труды ВИАМ. – 2016. – № 11(47). – С. 23–31.
4. Пацелов А.М., Лавриков Р.Д., Гладковский С.В., Бородин Е.М. Разрушение ударным нагружением слоистых композитов $Ti-Al_3Ti$ с объемной долей интерметаллической фазы до 80% // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18, № 4–2. – С. 1687–1688.
5. Cao Y., Zhu S., Guo C., Vecchio K.S., Jiang F. Numerical investigation of the ballistic performance of metal-intermetallic laminate composites // Applied Composite Materials. – 2015. – V. 22, no. 4. – P. 437–456.
6. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение металл – интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 369–382.
7. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение многослойных металл–интерметаллидных композитов при динамическом нагружении // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (4). – С. 1490–1492.
8. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Khristenko Yu.F. Computational modeling of brittle fracture under dynamic loading // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11, no. 24. – P. 14560–14565.
9. Зелепугин С.А. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия тел с учетом модели разрушения эрозийного типа // Вычислительные технологии. – 2001. – Т. 6, ч. 2. – С. 163–167.
10. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Смолин А.Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1997. – № 37(6). – С. 742–750.