

УДК 539.3

РАЗРУШЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2011 г.

С.А. Зеленугин^{1,2}, С.С. Шнаков²¹Томский научный центр СО РАН²Томский госуниверситет

szel@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Численно методом конечных элементов в осесимметричной постановке исследовано поведение многослойной преграды, состоящей из слоев интерметаллида Al_3Ti – титановый сплав ВТ6, при высокоскоростном ударе. Для описания процесса разрушения интерметаллида применена модель разрушения плотных хрупких материалов широкодиапазонного типа. Найдено оптимальное для исследованных условий нагружения соотношение толщин компонентов композиционного слоя.

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

Оптимальные эксплуатационные свойства большинства современных конструкций можно получить при условии применения составных элементов из слоистых композиционных материалов. В последние годы в качестве перспективного легкого прочного материала рассматривается металл-интерметаллидный слоистый композит (МИСК). В случае слоистых композитов $Ti-Al_3Ti$ удельная жесткость (модуль/плотность) почти вдвое выше, чем у стали, удельная ударная вязкость и удельная прочность являются сравнимыми или выше, чем почти у всех металлических сплавов, а удельная твердость коррелирует со многими керамическими материалами.

Изучение поведения МИСК в условиях высокоскоростного удара актуально. В настоящее время исследования поведения данных композитов при динамическом нагружении в научной литературе посвящено только несколько экспериментальных работ [1]. При этом в ходе экспериментов не удается выявить последовательность, время действия и вклад различных механизмов разрушения в развитие областей повреждений в композиционной преграде. Поэтому при анализе поведения МИСК особенно важным становится численное моделирование, которое позволяет в рамках единого математического подхода исследовать процесс высокоскоростного нагружения композиционных преград в широком диапазоне начальных условий.

Для численного анализа поведения многослойных композитов при высокоскоростном нагружении развиты теоретические модели поведе-

ния на макроуровне керамикоподобных и металлических материалов (составляющих многослойный композит), модель разрушения эрозионного типа, модель зарождения и роста микротрещин активного типа [2–6]. Для описания процесса разрушения интерметаллида применена модель разрушения плотных хрупких материалов широкодиапазонного типа [2, 6]. Модель учитывает возможность разрушения материала при превышении в ударной волне предела упругости (HEL), использует ступенчатую зависимость динамического предела текучести от достигнутого уровня поврежденности, описывающую падение прочностных свойств при заданных значениях удельно-го объема трещин:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 P_f K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}} \right) \left(1 - \frac{V_f}{V_4} \right), & \text{если } V_f < V_f^k, \\ \sigma_f K_T, & \text{если } V_f^k \leq V_f < V_4, \\ 0, & \text{если } V_f \geq V_4, \end{cases}$$

$$P_f = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_{sh} < \sigma_{HEL}, \\ P_f^k, & \text{если } \sigma_{sh} \geq \sigma_{HEL}, \end{cases}$$

где σ_{sh} – напряжение в ударной волне, V_f^k , σ_f , P_f^k , σ_{HEL} – константы.

В зависимости от величины P_f^k может моделироваться хрупкий характер разрушения материала в ударной волне (≈ 0), что характерно для карбида бора, пластический (≈ 1), что характерно для карбида кремния, промежуточный, совме-

щающий пластический и хрупкий механизмы деформирования (оксид алюминия, нитрид алюминия, диборид титана, двуокись циркония) [7].

Рассмотрен процесс взаимодействия цилиндрического ударника радиусом 3.075 мм, длиной 23 мм из вольфрамового сплава с преградой, состоящей из семнадцати чередующихся композиционных слоев интерметаллид Al_3Ti – титановый сплав ВТ6. Суммарная толщина преграды составила 19.89 мм. Толщина отдельного слоя интерметаллида составила 0.94 мм, слоя из титанового сплава – 0.23 мм. Начальная скорость удара 900 м/с.

На рис. 1 приведены конфигурации взаимодействующих тел и поля удельного объема микроповреждений, отчетливо указывающие на послойный характер разрушения композиции преграды, причем слои, обладая разными физико-механическими характеристиками, разрушаются по различным механизмам.

нее стойкой к ударно-волновому нагружению по сравнению с композиционной. Для исследованных условий взаимодействия эффективными к высокоскоростному удару (отсутствие пробития) проявили себя преграды, содержащие высокопрочную керамику из оксида алюминия, преграда, целиком состоящая из титанового сплава, и композиционная преграда с соотношением толщин слоев $\sim 4:1$. При этом преграда из оксида алюминия демонстрирует низкую трещиностойкость, что может приводить к ее полному разрушению после соударения. Преграда из титанового сплава ВТ6 выдерживает удар на пределе пробития.

Для исследованных условий нагружения найдено соотношение толщин слоев интерметаллид (алюминид титана Al_3Ti) / металл (титановый сплав ВТ6), близкое к 4, при котором многослойная композиционная металл-интерметаллидная преграда оказывается наиболее эффективной (отсутствие пробития, наименьшая глубина кратера

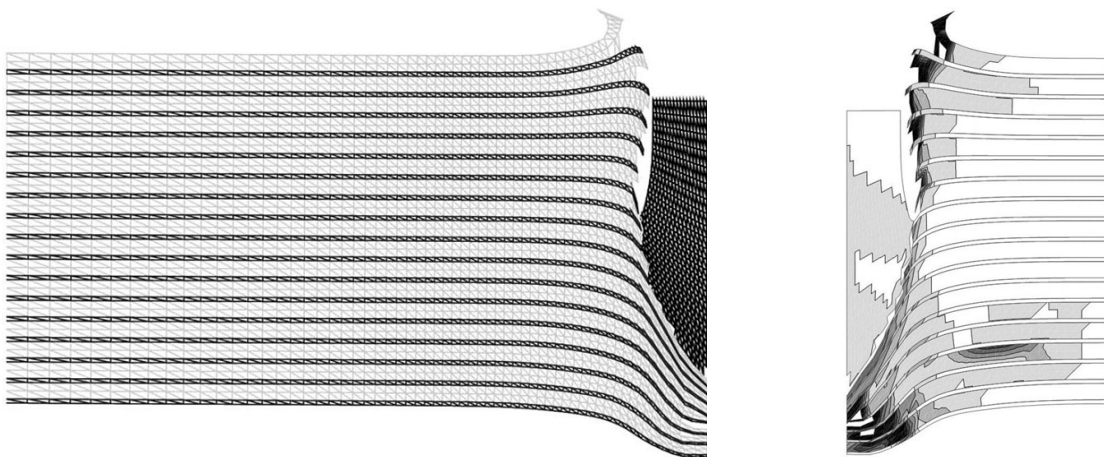


Рис. 1. Радиальное сечение ударника и многослойной МИСК-преграды в момент времени 45 мкс (слева) и поля удельного объема микроповреждений во взаимодействующих телах в момент времени 60 мкс (справа)

Микроповреждения накапливаются в значительно большей степени в слоях интерметаллида, чем в титановых, которые в данном случае тормозят распространение трещин между слоями преграды.

Проведены сравнения эффективности преград к высокоскоростному удару. Исследованы многослойные металл-интерметаллидные композиционные преграды, однородные из материалов, составляющих композиционный слой – интерметаллидные, металлические, а также из прочных и высокопрочных керамических материалов на основе оксида алюминия с различным соотношением толщин композиционного слоя. Показано, что однородная преграда из интерметаллида Al_3Ti или из титанового сплава ВТ6 является ме-

в композиционной преграде, высокая трещиностойкость) к динамическому воздействию.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №10-08-00514, 09-08-99059).

Список литературы

1. Vecchio K.S. // JOM. 2005. March. P. 25–31.
2. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15, №3. С. 369–382.
3. Шипачев А.Н., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. // Деформация и разрушение материалов. 2010. №4. С. 20–24.
4. Зелепугин С.А., Иванова О.В., Юношев А.С., Сильвестров В.В. // Докл. РАН. 2010. Т. 434, №5.

С. 643–647.

5. Зелепугин А.С., Зелепугин С.А., Скрипняк В.А.
// Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2010. №3 (11). С. 100–106.

6. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. // Изв. вузов. Физика. 2008. Т.51, №8/2. С. 166–173.

7. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортон В.Е. // Изв. РАН. МТТ. 1999. №5. С. 173–188.

FAILURE OF METALLIC-INTERMETALLIC MULTILAYERED COMPOSITES UNDER DYNAMIC LOADING

S.A. Zelepugin, S.S. Shpakov

The behaviour of a multilayered target consisting of intermetallide Al_3Ti – titanium alloy Ti-6-4 layers under high-velocity impact is investigated numerically by a finite element method in an axisymmetrical statement. A failure model of wide-range type is applied for the description of a failure process of intermetallide. The optimum ratio of thicknesses of the components of the composite layer is found for the investigated loading conditions.

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