УДК 519.63

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СКОРОСТЯХ УДАРА ДО 5000 М/С

^{1,2}Зелепугин С.А., ^{1,2}Попов А.А.¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, e-mail: popov.alexey1997@gmail.com;²Томский научный центр СО РАН, Томск, e-mail: szel@yandex.ru

Численно моделируется взаимодействие ударника из высокопрочной стали с многослойной металло-интерметаллидной преградой, состоящей из шести композиционных слоев, каждый из которых состоит из слоя интерметаллида (Al_3Ti) и слоя титанового сплава (ВТ6). При моделировании процесса взаимодействия применена модель повреждаемой среды. Для описания процесса разрушения слоев из титанового сплава использовалась кинетическая модель разрушения активного типа. Разрушение интерметаллида описывается моделью хрупкого разрушения. Общая система уравнений представляет собой систему дифференциальных уравнений с частными производными гиперболического типа, для решения которой требуется привлечение численных методов. В качестве численного метода использован модифицированный метод конечных элементов без построения глобальной матрицы жесткости, используемый для решения динамических задач. Численные расчеты проводились при различных начальных скоростях удара в диапазоне 2000–5000 м/с с целью выявить влияние начальной скорости ударника на характер разрушения многослойного композита. Полученные результаты показывают, что с ростом начальной скорости удара возрастает роль ударно-волновых процессов в характере разрушения преграды. В интерметаллидных слоях металло-интерметаллидной композиционной преграды наблюдается расслоение вдоль границ со слоями из титана, причем степень расслоения возрастает с ростом скорости удара.

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

NUMERICAL SIMULATION OF THE FRACTURE OF MULTILAYER METAL-INTERMETALLIC COMPOSITES AT IMPACT VELOCITIES UP TO 5000 M/S

^{1,2}Zelepugin S.A., ^{1,2}Popov A.A.¹National Research Tomsk State University, Tomsk, e-mail: popov.alexey1997@gmail.com;²Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk, e-mail: szel@yandex.ru

The interaction of a high-strength steel impactor with a multilayer metal-intermetallic target consisting of six composite layers, each of which contains an intermetallic layer (Al_3Ti) and a layer of titanium alloy (Ti-6-4) has been numerically simulated. A damaged medium model is used to simulate the interaction process. To describe the fracture of titanium alloy layers, a kinetic fracture model is applied. A brittle fracture model is used to describe the fracture of intermetallics. The system of equations comprises hyperbolic partial differential equations, the solution of which requires the use of numerical methods. A modified finite element method (without a global stiffness matrix) is used to solve dynamic problems. Numerical computations are carried out at different initial impact velocities in the range of 2000–5000 m/s in order to find the effect of the initial velocity of the impactor on the fracture of the multilayer composite. The obtained results have shown that the role of shock-wave processes in the fracture of a target increases with an increase in the initial impact velocity. The composite target demonstrates the separation of layers along the boundaries, and the degree of separation increases with increasing the impact velocity.

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

В настоящее время вопросам получения материалов с улучшенными свойствами [1–3], исследованиям процессов их деформирования и разрушения при различных видах нагружения [2–4] уделяется повышенное внимание. Одним из видов перспективных конструкционных материалов считаются металло-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (МИСКМ) [5]. Из-за особенностей своей структуры МИСКМ обладают высокими удельными прочностными характеристиками и являются баллистически стойкими. МИСКМ представляют собой пример так называемых биоподобных материалов и имеют многослойную компо-

зицию из взаимно чередующихся слоев интерметаллида и слоев металла или сплава. На создание таких материалов ученых натолкнуло исследование структур природных биологических систем, например структуры раковины морского моллюска *Haliotis rufescens* (abalone, морское ушко) представляет собой твердые хрупкие слои $CaCO_3$, склеенные пластичной граничной органической фазой. В случае композитов $Ti-Al_3Ti$, триалюминид титана (Al_3Ti), который обладает высокой твердостью и прочностью на сжатие при относительно низкой плотности, имитирует роль плиток $CaCO_3$, а пластичные и трещиностойкие слои из титанового сплава (ВТ6),

необходимые для остановки магистральных трещин и рассеивания энергии удара за счет пластической деформации, выступают в роли граничной связующей фазы.

Процессы динамического нагружения МИСКМ до сих пор мало исследованы. Им посвящено незначительное число как экспериментальных, так и теоретических работ. В экспериментальных исследованиях достаточно трудно регистрировать динамику высокоскоростного процесса. Анализ сохраненных после нагружения образцов не дает достоверной оценки механизмов разрушения. Численное моделирование, в рамках используемых математических моделей, позволяет исследовать динамику деформирования и разрушения нагружаемых тел [6].

В настоящее время численным методам исследования механического поведения сложных технических систем уделяется повышенное внимание. Очень часто для анализа используются коммерческие программные продукты, такие как MatLab [7, 8], ALGOR, САПР Solid Works (Cosmos Works), ANSYS [9]. Наиболее популярным численным методом, используемым для решения задач деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций, является метод конечных элементов (МКЭ), который лежит в основе упомянутых выше программных пакетов. Вместе с тем актуальной остается разработка исследовательских программных комплексов на основе МКЭ [6, 10].

В данной работе методом численного моделирования исследуется процесс нагружения многослойной преграды Ti-Al₃Ti при начальных скоростях удара 2000, 3000 и 5000 м/с. Такие скорости в экспериментах могут обеспечиваться с использованием легкогазовой установки. Цель работы – оценить влияние начальной скорости ударника на характер разрушения преграды, на ее прочностные характеристики и степень поврежденности после взаимодействия. Для численного моделирования динамических процессов используется исследовательский программный комплекс на основе МКЭ.

Материалы и методы исследования

В работе используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся наличием в материале микроповреждений. В качестве параметра поврежденности материала применяется удельный объем микроповреждений V_f :

$$V_f = \frac{W_f}{\rho_c W_c}, \quad (1)$$

где W_f – объем, занимаемый микроповреждениями, ρ_c – плотность неповрежденной

части, W_c – объем, занимаемый неповрежденной частью среды.

Система основных уравнений состоит из уравнений неразрывности, движения и энергии, являющихся следствиями законов сохранения массы, импульса и энергии [11]. Уравнение состояния (УРС) строится по типу уравнения Ми-Грюнайзена, в котором предполагается наличие «холодной» и «тепловой» частей. УРС определяет давление в неповрежденном веществе во всем диапазоне условий нагружения как функцию удельного объема и удельной внутренней энергии. Коэффициенты УРС определяются через константы ударной адиабаты Гюгонио. Для связывания компонент девиатора напряжений и компонент тензора скоростей деформаций используются определяющие соотношения, содержащие производную по Яуманну. Для описания пластичности течения используется условие текучести Мизеса. В процессе вычислений рассматривается влияние температуры и поврежденности материала на модуль сдвига и динамический предел текучести [11].

Для слоев из титанового сплава применяется кинетическая модель разрушения активного типа [11], которая позволяет моделировать разрушение в металлах при растяжении. Для слоев из интерметаллида применяется модель разрушения хрупкого типа. В отличие от кинетической модели активного типа, в которой разрушение элементов происходит под действием только растягивающих напряжений, в модели хрупкого разрушения учитываются как растягивающие, так и сжимающие компоненты напряжений. Следовательно, динамический предел текучести σ в модели хрупкого разрушения зависит как от сжимающих компонент напряжений (2), так и от растягивающих (3):

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0, & \text{если } \sigma_z \geq P_f \\ K_f \sigma_0, & \text{если } \sigma_z < P_f \end{cases}, \quad (2)$$

где σ_z – компонента напряжения в ударной волне ($\sigma_z < 0$ при сжатии), P_f – константа материала ($P_f < 0$), а коэффициент K_f может быть изменён от 0 до 1.

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

где V_4 , V_f^k , σ_f – константы [12].

Модели разрушения активного и хрупкого разрушения работоспособны в период распространения ударных волн (области

сжатия) и волн разгрузки (области растяжения). При интенсивном взаимодействии и деформировании контактирующих тел применяется модель разрушения эрозионного типа. В ней критерием разрушения служит критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций E_{sh}^c . Текущее значение этой энергии определяется формулой

$$\rho \frac{dE_{sh}}{dt} = S_{ij} \epsilon_{ij}, \quad (4)$$

где S_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений, ϵ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций.

Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций выбирается зависящей от условий взаимодействия:

$$E_{sh}^c = a_{sh} + b_{sh} v_0, \quad (5)$$

где v_0 – начальная скорость удара, a_{sh} и b_{sh} – константы.

Когда в расчетной ячейке выполняется условие $E_{sh} > E_{sh}^c$, эта ячейка считается разрушенной согласно модели разрушения эрозионного типа и удаляется из дальнейшего расчета, а параметры соседних ячеек корректируются с учетом законов сохранения, то есть масса расчетных узлов также должна быть уменьшена на величину массы разрушенного материала.

Рассматривается осесимметричная задача высокоскоростного взаимодействия ударника из высокопрочной стали, имеющего оживальную форму головной части, с многослойной композиционной преградой. Для решения задачи используется метод конечных элементов.

Результаты исследования и их обсуждение

Численно моделировалось взаимодействие многослойной преграды Ti – Al₃Ti, состоящей из шести композитных слоев, общей толщиной ≈ 7 мм, с осредненной плотностью 3513,32 кг/м³ с ударником из высокопрочной стали. Соотношение толщин слоев интерметаллида к титановому сплаву в композитном слое составляет $\approx 4/1$. Диаметр ударника 4,2 мм, длина 14,5 мм. На-

чальная скорость ударника варьировалась. Расчеты проводились при скоростях 2000, 3000 и 5000 м/с. В преграде реализовано неравномерное разбиение и, так как задача решалась в осесимметричной постановке, оно реализовано вдоль радиуса преграды, при этом размер элементов увеличивается по мере удаления от области взаимодействия. Константы моделей можно найти в [11].

Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций (5) зависит от условий взаимодействия и задается функцией начальной скорости удара, следовательно, её значение для каждого материала варьировалось при различных начальных скоростях ударника. Значения критической величины энергии сдвиговых деформаций для трех материалов, используемых в расчете, представлены в таблице.

При начальной скорости ударника, равной 2000 м/с, к моменту времени 5,5 мкс (рис. 1, а) во втором композитном слое внутри интерметаллида зарождается макротрещина. Макротрещина начинает расти и к моменту откола части тыльной поверхности преграды, соответствующему 10,5 мкс (рис. 1, б), в данном слое образуется магистральная макротрещина.

На рис. 2 показана степень повреждения преграды и отчетливо видна тенденция роста макротрещин в слоях интерметаллида. Более интенсивному росту трещин препятствуют слои из титанового сплава. К моменту времени окончания взаимодействия преграды и ударника происходит расслоение преграды. При 2000 м/с повреждения в сечении преграды будут иметь конусообразный вид, что характерно для хрупкого разрушения.

С ростом начальной скорости ударника возрастает роль ударно-волновых процессов, распространяющихся в преграде, и под действием волн разгрузки происходит ее расслоение (рис. 3). Стоит отметить, что при увеличении начальной скорости удара степень расслоения преграды увеличивается. При этом расслоение многослойного металло-интерметаллидного композита происходит за счет формирования макротрещин в интерметаллидных слоях.

Значения критической величины энергии сдвиговых деформаций E_{sh}^c

v_0 , м/с	E_{sh}^c , Дж/кг		
	Высокопрочная сталь ($a_{sh} = 3330$ Дж/кг; $b_{sh} = 0,33$)	Al ₃ Ti ($a_{sh} = 1000$ Дж/кг; $b_{sh} = 0,5$)	BT6 ($a_{sh} = 3170$ Дж/кг; $b_{sh} = 0,167$)
2000	3960	2000	3500
3000	4290	2500	3670
5000	4950	3500	4000

Рис. 1. Поля удельной энергии сдвиговых деформаций (кДж/кг) при начальной скорости удара 2000 м/с: а) в момент времени 5,5 мкс; б) в момент времени 10,5 мкс

Рис. 2. Поля удельного объема микрповреждений ($\text{см}^3/\text{г}$) при начальной скорости удара 2000 м/с: а) в момент времени 5,5 мкс; б) в момент времени 10,5 мкс

Рис. 3. Поля удельного объема микрповреждений ($\text{см}^3/\text{г}$) в преградах, взаимодействующих с ударниками с различными начальными скоростями: а) 2000 м/с; б) 3000 м/с; в) 5000 м/с

При относительно низких скоростях удара (700–1100 м/с [6, 11]) роль ударно-волновых процессов значительно ниже, и поэтому больший вклад в разрушение преграды вносят деформационные растягивающие нагрузки, действующие при внедрении ударника, а не волны разгрузки. Но при этом области с большими значениями удельного объема микроповреждений проявляются в слоях интерметаллида, а титановые слои, как и в случае более высоких скоростей удара, препятствуют распространению магистральных трещин [13].

Уменьшение скорости движения ударника после взаимодействия с преградой (запреградная скорость) зависит от начальной скорости его движения (рис. 4). При начальной скорости удара, равной 2000 м/с, запре-

градная скорость ударника уменьшается на 35 %, при 3000 м/с уменьшается примерно на 17,5 %, а при начальной скорости движения ударника, равной 5000 м/с, его запреградная скорость уменьшается на 6,3 %.

В процессе взаимодействия с преградой ударник разрушается (срабатывается), что приводит к уменьшению его длины. На рис. 5 видно, что скорости изменения длины ударника для различных начальных скоростей удара разные, но после взаимодействия с преградой длина ударника $L_{уд}$, во всех трех случаях изменяется примерно на одну величину, разность длин к 10 мкс составляет 0,69–3,44 %. Длина ударника после взаимодействия с преградой в рассматриваемом диапазоне скоростей удара уменьшается примерно в 2 раза.

Рис. 4. Зависимость безразмерной величины v/v_0 , выражающей отношение скорости тыльной части ударника к его начальной скорости, от времени процесса взаимодействия, при различных начальных скоростях удара: 1 – 2000 м/с, 2 – 3000 м/с, 3 – 5000 м/с

Рис. 5. Зависимость длины ударника от времени для различных начальных скоростей удара: 1 – 2000 м/с, 2 – 3000 м/с, 3 – 5000 м/с

Заключение

Результаты численного моделирования деформирования и разрушения МИСКМ Ti-Al₃Ti показывают, что с ростом начальной скорости удара в исследуемом диапазоне скоростей 2000–5000 м/с возрастает роль ударно-волновых процессов в характере разрушения преграды. В отличие от более низких скоростей удара, при которых больший вклад в характер разрушения многослойной преграды вносит деформационный фактор, действующий в области внедрения ударника, при более высоких скоростях происходит расслоение преграды, вызванное действием волн разгрузки. В интерметаллидных слоях металло-интерметаллидной композиционной преграды наблюдается расслоение вдоль границ со слоями из титана, причем степень расслоения возрастает с ростом скорости удара.

Список литературы

1. Щербаков А.В., Баринов В.Ю., Щукин А.С., Ковалев И.Д., Щербаков В.А., Маликина Т.Д., Альхименок А.И. Синтез композита TiB₂-30CrB методом электротеплового взрыва под давлением // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 4. С. 344–349.
2. Машеков С.А., Нугман Е.З., Тусупкалиева Э.А., Машекова А.С., Мауленова М.Р. Ударное разрушение наноструктурированного алюминиевого сплава АД31 после различных видов термической обработки и прокатки в винтообразных валках // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 4. С. 97–102.
3. Столбовский А.В., Попов В.В., Попова Е.Н., Фалахутдинов Р.М., Шорохов Е.В. Особенности деформационного поведения бронз при динамическом канально-угловом прессовании // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 11–5. С. 858–863.
4. Чикишев Е.В., Гаспарян Г.Д. Математическая модель процесса резания с применением ультразвуковых колебаний и анализ устойчивости процесса // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 7. С. 142–149.
5. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic intermetallic laminate composites. *JOM*. 2005. Vol. 57. no. 3. P. 25–31. DOI: 10.1007/s11837-005-0229-4.
6. Зелепугин А.С., Зелепугин С.А. Численное моделирование разрушения многослойных композитов титан-триалюминид титана при высокоскоростном ударе // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. № 11–2. С. 194–198.
7. Семёнов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MatLab // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 8. С. 56–64.
8. Остапчук А.К., Кузнецова Е.М., Дмитриева О.В. Экспериментальные исследования и моделирование устойчивости процесса резания при обработке стальных деталей // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 1. С. 43–47.
9. Шеромова И.А., Завзятый В.И., Железняков А.С. Использование компьютерных технологий для моделирования деформационных свойств легкодеформируемых материалов // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 11–2. С. 326–331.
10. Курепин М.П., Сербиновский М.Ю. Эффективные методики конечно-элементного моделирования сложных конструкций энергетического машиностроения // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 10. С. 19–25.
11. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение металло-интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2009. Т. 15. № 3. С. 369–382.
12. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Khristenko Yu.F. Computational modelling of brittle fracture under dynamic loading // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. no. 24. P. 14560–14565.
13. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Popov A.A., Yanov D.V. Numerical simulation of metal-intermetallic laminate composites failure under dynamic loading // *Proceedings at the 9th ICCM2018, 6th-10th August 2018, Rome, Italy* / Eds: G.R. Liu, Patrizia Trovalusci. USA: Scienteck Publisher LLC, 2018. Vol. 5. P. 467–471.