

П. А. Радченко, Р. Р. Балохонов, А. В. Радченко

Влияние многослойного покрытия на поведение стальной подложки конструкции при динамическом нагружении

A. V. Radchenko, R. R. Balokhonov, P. A. Radchenko

Multilayer Coating Effect on a Steel Backplate Behavior of a Structure under Dynamic Loading

Исследованы особенности деформирования и разрушения материала с многослойным покрытием при высокоскоростном ударном взаимодействии. Краевая динамическая задача в трехмерной постановке решается численно методом конечных элементов. Многослойное покрытие задается в расчетах явно. При моделировании механической реакции стальной подложки, ударника и подслоя покрытия из NiAl используются соотношения Прандтля-Рейса и уравнение состояния в форме Ми-Грюнаизена. Поведение материала покрытия из WC-Co описывается упруго-хрупкой моделью. Для описания разрушения материала высокопрочного покрытия используется критерий Хоффмана, который учитывает различную прочность на растяжение и сжатие. Исследовано влияние высокопрочного покрытия на эволюцию волновой картины и напряженно-деформированное состояние в стальной подложке. Показано, что наличие многослойного покрытия способствует повышению динамической прочности стальной основы. Установлено, что уменьшение проникающей способности ударника, связанное с наличием покрытия, нелинейно зависит от скорости взаимодействия.

Ключевые слова: механика сред со структурой, численное моделирование, композиты с покрытиями, деформация, разрушение.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-26

Введение. Высокоскоростное (сверхзвуковое) газопламенное напыление (HVOF) является сравнительно недавним дополнением к семейству процессов газотермического напыления. Данная методика по праву считается наиболее современной из технологий напыления. Из-за малой скорости частиц при газоплазменном напылении поверхность частиц успевает окислиться, что приводит к низкой плотности формирования покрытий. Увеличение скорости частиц при меньшей их температуре позволило снизить уровень окисленности частиц и повысить плотность порошкового покрытия. В порошковых распылителях HVOF первого и второго поколений использовалось цилиндрическое сопло, тогда как в третьем поколении используются расширя-

In the paper, features of deformation and destruction of a multilayer-coated material under high-velocity impact interaction are investigated. Three-dimensional boundary problem is solved numerically by the finite element method with explicitly defined multilayer coating. The Prandtl-Reuss equation and the Mi-Gruneisen equation of state are utilized for mechanical reaction modeling of a steel backplate, a projectile and a covering sublayer made of NiAl. An elastic-brittle model describes the behavior of covering material made of WC-Co. Fracturing description of the material with high strength coating is provided by Hoffman criterion that considers various strength of stretching and compression. Influence of high strength coating on evolution of wave pattern and stress-strain state of a steel backplate is examined. It is shown that multilayer coating increases dynamic strength of a steel base. Also, it is found that reduction of projectile penetration power by multilayer coating depends nonlinearly on speed of interaction.

Key words: continuum mechanics, numerical modeling, composite materials, fracture.

ющиеся профильные сопла Лавала. Такой подход позволяет скорости потока газа превышать 2000 м/с, а скорости частиц порошка — 800 м/с. При HVOF-методике достигается высокая адгезия, а пористость покрытия не превышает 1% [1].

В данной работе исследуется поведение стальной подложки с многослойным покрытием, нанесенным методом HVOF, при динамическом нагружении конструкции ударником при различных скоростях взаимодействия. Задача решалась численно, методом конечных элементов с использованием явной конечно-разностной схемы в рамках модели [2]. Границы раздела между слоями покрытия полагались плоскими, не обладающими кривизной.

Постановка задачи. Рассматривается взаимодействие стального компактного цилиндрического ударника с многослойной преградой. Диаметр ударника равен длине и составляет 2 мм. В качестве материала ударника применялась сталь марки «Сталь 3». Исследуются два типа преград. В первом типе преграды верхний слой нанесен методом HVOF и содержит 87% WC и 13% Co, толщина этого слоя 0,25 мм. Второй слой толщиной 0,205 мм — сплав из 95% Ni и 5% Al. Третий слой толщиной 1,5 мм — подложка из стали 316L, состоящей из 0.03% C, 1% Si, 2% Mn, 0.045% P, 0.03% S, 16–18% Cr, 2–3% Mo и 10–14% Ni.

Второй тип преграды — однослойная монолитная преграда из стали 316L. Толщина первой и второй преград одинакова — 1,955 мм. Толщины слоев в расчетах для первой преграды задавались на основе экспериментальных данных, полученных на сканирующем электронном микроскопе [3]. Механические характеристики используемых материалов приведены в таблице. Начальная скорость ударника варьировалась от 50 до 400 м/с. Угол встречи (угол между нормалью к преграде и продольной осью ударника) составляет $\alpha = 0^\circ$ (нормальный удар).

Механические характеристики материалов

	Сталь 3	316L	NiAl	WC-Co
Плотность, кг/м ³	7850	8031	5900	13900
Модуль Юнга, ГПа	204	200,38	169	398
Коэффициент Пуассона	0,3	0,29	0,32	0,25
Предел текучести, МПа	1010	262	1453	—
Предел прочности, МПа	—	—	—	4500

Обсуждение результатов. На рисунке 1 приведена расчетная конфигурация ударника и преграды первого типа для начальной скорости 200 м/с в момент времени 3 мкс. В сечении XZ градациями серого цвета представлены области разрушения, реализующиеся в верхнем слое, полученном методом HVOF. Уровень разрушения характеризуется относительным объемом — отношением объема разрушенного материала в конечном элементе (V_p) к общему объему элемента (V_0). Значение $V_p/V_0 = 1$ соответствует полному разрушению материала.

К 3 мкс наблюдается разрушение материала верхнего слоя преграды по всей его толщине, диаметр разрушенной зоны незначительно превышает диаметр ударника. Разрушение верхнего слоя происходит за счет развития в нем растягивающих напряжений, возникающих в результате воздействия волн разгрузки и внедрения ударника.

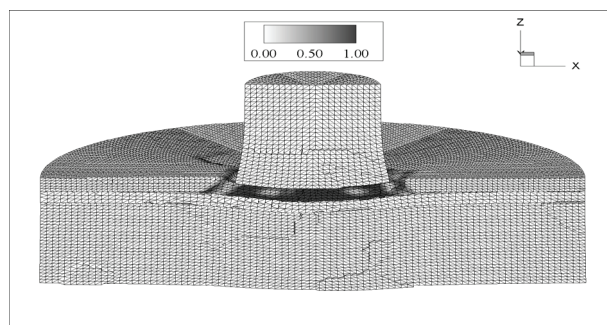


Рис. 1. Расчетная конфигурация. Момент времени $t = 3$ мкс

Развитие волновых процессов в преградах можно проследить по графикам на рисунке 2, где представлены распределения в различные моменты времени напряжения σ_z на оси симметрии по толщине слоистой и монолитной преград. В момент удара по преградам начинают распространяться волны сжатия, причем в многослойной преграде амплитуда волны сжатия на 17% выше, чем в монолитной (кривые 1). Это обусловлено более высокими упругими характеристиками WC-Co по сравнению со сталью 316L. Затем в зону контакта ударника с преградой приходят волны разгрузки, которые образовались в результате отражения волны сжатия от боковой и тыльной поверхности ударника. Эти волны разгрузки распространяются по преграде по направлению к тыльной поверхности, понижая напряжения за волной сжатия. Причем снятие сжимающих напряжений в многослойной преграде сопровождается разрушением верхнего слоя из WC-Co, и как следствие — ослабление волны разгрузки. Это иллюстрируют кривые 5–8 на рисунке 2а — к 1,1 мкс напряжения равны нулю по всей толщине верхнего слоя. Поэтому максимальные растягивающие напряжения, которые возникают в подложке в зоне интерференции волн разгрузки, распространяющихся с боковой и тыльной поверхностей ударника и тыльной поверхности преграды, в слоистой преграде меньше на 33%, чем в монолитной. Это существенно снижает вероятность возникновения откольных разрушений в стальной подложке. На рисунке 3 приведены кривые, описывающие изменения во времени глубины внедрения ударника в слоистую и монолит-

ную преграды для различных начальных скоростей взаимодействия.

Полученные результаты свидетельствуют, что в рассмотренном диапазоне скоростей глубина внедрения ударника меньше в случае слоистой преграды. Например, к 3 мкс разница в глубине крате-

ра для слоистой и монолитной преграды составляет: для начальной скорости 100 м/с — 57%, для 200 м/с — 21%, для 400 м/с — 18%. Уменьшение разницы в глубине внедрения ударника d с ростом скорости взаимодействия связано с уменьшением влияния прочностных свойств при увеличении скорости удара.

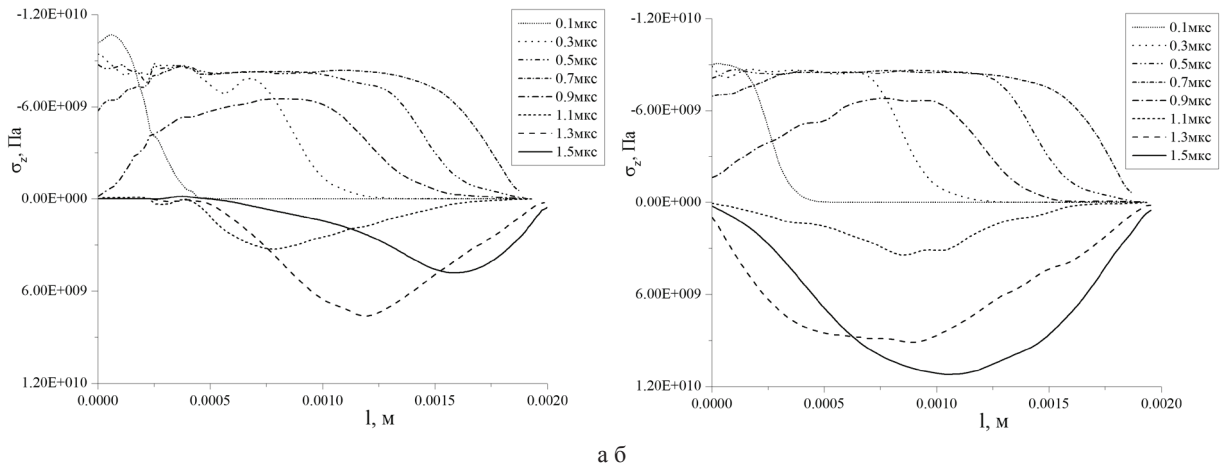


Рис. 2. Распределение напряжений по толщине слоистой (а) и монолитной (б) преграды

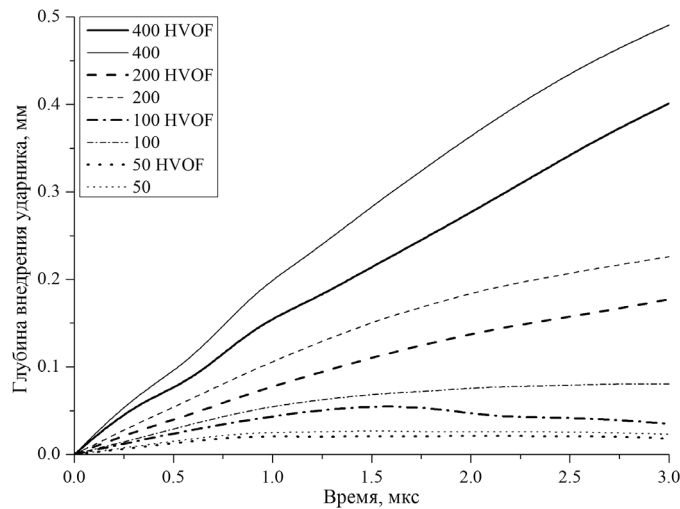


Рис. 3. Глубина внедрения ударника в слоистую и монолитную преграды

Заключение. В работе проведен сравнительный анализ проникающей способности ударника в стальную монолитную преграду и преграду с многослойным NiAl — WC-Co покрытием. Исследования показали, что наличие высокопрочного слоя, полученного методом HVOF, повышает сопротивление разрушению конструкции при ударном нагружении. Повышение прочности не пропорционально соотношению объемов покрытия и преграды, а достигает-

ся за счет изменения характера развития волновых процессов и связанного с этим снижения уровня растягивающих напряжений в зоне вероятного откола. В результате происходит более интенсивное торможение и деформирование ударника на начальной стадии процесса, что приводит к уменьшению его проникающей способности. Данный эффект наиболее ярко выражен для низких и средних скоростей ударника.

Библиографический список

1. J. Stokes. The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process. — Dublin City University, Dublin. — 2005.
2. Радченко А. В. Модель поведения хрупких анизотропных материалов при динамических нагрузках и ее приложения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2003. — №.2.
3. Jiang J., Fasth A., Nylen P., Choi W. B. Microindentation and Inverse Analysis to Characterize Elastic-Plastic Properties for Thermal Sprayed Ti²AlC and NiCoCrAlY // Journal of Thermal Spray Technology. — 2009. — V. 18, №2.