

Заключение

Исследован процесс проникновения ступков пылевых частиц (в основе порошки SiC, фракции 1-100 мкм) в технически чистый алюминий (А7). Прошивка технически чистого металла (99,7% Al) в режиме сверхглубокого проникновения позволила получить прямое доказательство генерации энергии и сделать следующие основные выводы:

1. Процесс разгона частиц реализуется за счет генерации энергии в форме многочисленных микровзрывов вдоль формируемых канальных элементов;
2. Процесс сверхглубокого проникания сопровождается по оси каналов в зоне микровзрыва синтезом новых химических элементов (галлий, медь и железо), доля которых достигала 25% ;
3. Выполнена оценка исходного радиуса зоны синтеза, в ходе которой установлено, что радиус зоны обжатия при давлении 1016 Н/м² ориентировочно равен 0,746 А;

Список литературы

1. Новиков, Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты / Л.С. Новиков ; МГУ НИИ ядерной физики. – М. : Университетская книга, 2009. – 104 с.
2. Ушеренко, С.М. Энергия, генерируемая при проникании пылевых ступков / С.М. Ушеренко, Ю.С. Ушеренко, Е.И. Марукович // Изобретатель. – 2012. – № 10 (154). – С. 44–48.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕАКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРЕГРАДАМИ ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Е.А. Хмельников, К.В. Смагин, Т.Е. Заводова

Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского Федерального Университета Нижний Тагил, Россия

Перспективным направлением развития боеприпасов (БП) проникающего типа, особенно малого калибра, является использование в их конструкции «реакционных материалов» (РМ) вместо обычных взрывчатых веществ. Использование РМ позволяет решать широкий спектр задач – от увеличения могущества и эффективности действия БП до повышения их безопасности и надежности.

Материалом, способным к развитию химических реакций с выделением энергии при определенных условиях, является фторопласт (тетрафторэтилен). Условия протекания химической реакции могут быть реализованы как при статическом нагружении и нагреве [1], так и при высокоскоростной деформации материала с применением легких металлов (алюминий, магний, титан) [2].

При проведении исследований авторами была обнаружена химическая экзотермическая реакция [3], проходящая при ударе фторопластового ударника об алюминий содержащую преграду на скоростях встречи более 600 м/с (рис 1).

Целью исследования является подбор физико-математической модели, адекватно отражающей условия динамического взаимодействия фторопластового ударника с преградами из алюминиевых сплавов.

Решение проблемы расчета кинематических и динамических характеристик проникания фторопластового ударника в упругую преграду, может быть выполнено с использованием нескольких методов, реализованных в следующих программных продуктах: “Terminal ballistic” [3], “TIM-2D” [2].

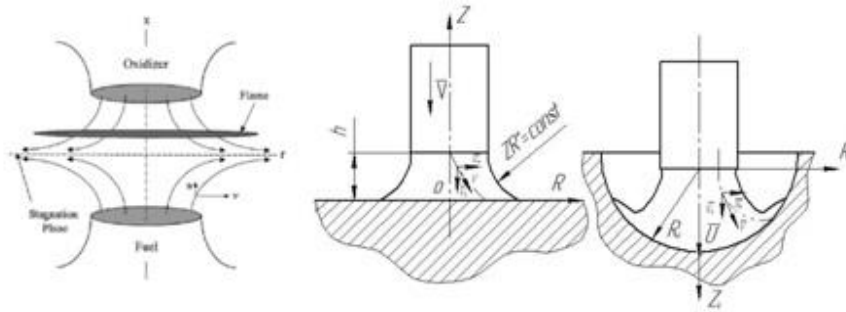


Рисунок 1. Схема проникания фторопластового снаряда в алюминий содержащую преграду с радиальной реализацией энергии

Для сравнения результатов расчетов вышеупомянутыми методами, был поставлен численный эксперимент с такими же входными параметрами, что и для натурного эксперимента. Расчеты проводились без учета дополнительной энергии, выделяющейся при химической экзотермической реакции. В процессе расчета были выбраны модели, описывающие упругопластическую деформацию ударника (модель Мизеса [2-3] и мишени (модели Джонсона-Кука, Мизеса, Глушака Б.Л.) и различные уравнений состояния материалов ударника и мишени (УРС Забабахина и «баротропная зависимость» [3]).

В таблице 1 представлены результаты расчета объема каверны. Зависимость объема каверны от скорости соударения фторопластового ударника с алюминий содержащей преградой представлена на рисунке 2.

Таблица 1. Параметры объема каверны при взаимодействии фторопластового ударника с преградой из АМц (Ø13мм, m=8.6г)

Скорость, м/с	ТИМ-2D (Мизес)	ТИМ-2D (Глушак)	ТИМ-2D (Дж.-Кук)	Master Professional	МКЧ	Опыт
м/с	см ³	см ³	см ³	см ³	см ³	см ³
507	0.065	0.077	0.015	0,875	0,073	1.200
685	0.537	0.682	0.064	1,084	0,693	1.450
930	3.270	3.147	0.620	6,763	2,607	4.000
1108	6.055	5.827	2.276	7,872	4,049	6.500
1406	13.010	11.742	6.369	3,939	7,05	11.500

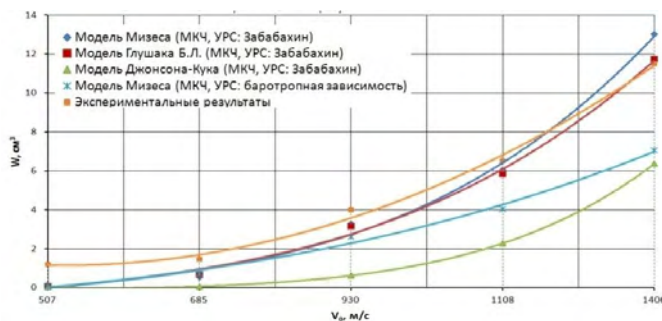


Рисунок 2. Зависимость объема каверны от скорости соударения фторопластового бойка с преградой из АМц

Выделение химической энергии происходит с некоторой задержкой и поэтому ее влияние начинает сказываться в глубинных слоях, что приводит к увеличению объема каверны.

Величина дополнительной химической энергии определяется как [3]:

$$E_x = A_{уд} (W_{оп} - W_{рас}) \quad (1)$$

где $W_{оп}$ и $W_{рас}$ – опытный и расчетный объемы каверны.

Анализ графика показывает, что модели Мизеса и Глушака дают завышенные результаты для объема каверны. С точки зрения авторов процесс упругопластического взаимодействия фторопластового ударника и алюминиевой преграды, наиболее адекватно описывается моделью Джонсона-Кука с УРС Забабахина и моделью Мизеса с УРС в виде «баротропной зависимости» при расчете по методу МКЧ [1].

Появление сажи на поверхности преграды, а также наличие фторидов алюминия показывают, что в процессе проникания идет интенсивная окислительная реакция материала преграды.

При этом слои материала преграды и деформирующегося бойка движутся параллельно (рис. 1). Процессы параллельного окисления были рассмотрены на различного рода газовых смесях и сформированы в методе Counterflow Diffusion Flame (CDF), впервые предложенном Цудзи и Ямаока [6].

Ламинарное противоточное диффузионное пламя обычно рассматривается как чистое диффузионное пламя. В этом случае для описания процессов, происходящих во время проникания фторопластового ударника в алюминиевую преграду, выбирается модель противоточного диффузионного пламени, установившегося в передней области цилиндрической пористой горелки (рис. 1).

Скорость потока окислителя (фторопласта) можно рассчитать, как радиальный компонент скорости срабатывающей части снаряда (рис.1). Образующая боковой поверхности ударника, как показатели экспериментальные результаты, хорошо описывается в цилиндрической системе координат ORZ (рис.1) уравнением вида

$$ZR^n = \text{const} \quad (2)$$

где $n > 0$ - показатель степени, зависящий от материала ударника и условий его деформирования. Полагая, что уравнение линий тока для скорости частиц материала ударника в процессе его деформирования также будет описываться уравнением (2). Найдем функциональную связь между осевой g_z и радиальной g_r компонентами скорости данной частицы материала:

$$g_r = -\frac{R}{nZ} g_z \quad (3)$$

Компоненты скорости должны удовлетворять уравнению неразрывности, которое для несжимаемой среды в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{\partial g_z}{\partial Z} + \frac{\partial g_r}{\partial R} + \frac{g_r}{R} = 0 \quad (4)$$

Уравнение неразрывности с учетом (3) имеет вид

$$nZ \frac{\partial g_z}{\partial Z} - 2g_z - R \frac{\partial g_z}{\partial R} = 0 \quad (5)$$

На границе раздела жесткой и пластической областей ударника осевая компонента скорости частиц деформированного материала будет равна скорости жесткой части ударника, т.е. при $Z=h \rightarrow g_z = -V$. Из решения уравнения (5) при заданном граничном условии находим выражение для осевой компоненты скорости частиц деформированного материала:

$$g_z = -V \left(\frac{Z}{h} \right)^{2/R} \quad (6)$$

где h - текущая высота деформированной части ударника.

Подставляя (6) в (3), получим:

$$g_R = v \frac{R}{nh} \left(\frac{h}{Z} \right)^{\frac{n-2}{n}} \quad (7)$$

Определяя из решения задачи пластического деформирования фторопластового ударника при его взаимодействии с преградой величины радиальной и осевой компонент скорости, находим скорость движения окислителя вдоль образующей каверны g_R и величину давления на границе контакта снаряда с преградой.

Скорость тепловыделения и скорость реакции может быть рассчитана по квази-одномерному уравнению сохранения энергии и уравнению неразрывности, соответственно.

$$Q = A^{-1} \left[\rho_0 v_0 \sum_i G_i C_{pi} \frac{dT}{dy} - \frac{d}{dy} \left(A \lambda \frac{dT}{dy} \right) \right] \quad (8)$$

Чистая скорость реакции K_i , т.е. чистая молярная скорость генерации или потребления видов i в единицу объема за единицу времени химической реакции, рассчитывается по:

$$K_i = \frac{pv}{M_i} \frac{dG_i}{dy} \quad (9)$$

В этих уравнениях, A – соотношение поток-трубка-площадь в любой точке, T температура газа, ρ плотность газовой смеси, C_{pi} теплоемкость при i постоянном давлении, λ теплопроводность газовой смеси, и M_i молекулярная масса. Индекс 0 обозначает некоторую точку отсчета G_i

Масса потока:

$$G_i = \rho Y_i (v + v_{di}) \quad (10)$$

где v скорость потока.

Массовая концентрация Y_i задается:

$$Y_i = \frac{X_i M_i}{\sum_i X_i M_i} \quad (11)$$

где X_i молярная доля i частицы.

Скорость диффузии определяется:

$$v_{di} = - \frac{D_i}{X_i} \frac{dX_i}{dy} \quad (12)$$

где D_i это двоичный коэффициент диффузии.

Плотность газовой смеси рассчитывается исходя из измеренных температуры и концентрации стабильных уравнений состояния:

$$p = \frac{\rho R^\circ T}{\sum_i X_i M_i} \quad (13)$$

где p давление и R° универсальная газовая постоянная.

Соотношение поток-трубка-площадь A определяется из плотности и измеряемой скорости по общему уравнению неразрывности [5]:

$$\rho v A = \rho_0 v_0 \quad (14)$$

В предположении, что двоичные коэффициенты диффузии всех пар равны и что массовая концентрация Y_i это функция i консервативного скаляра ξ (или какой-либо функции Шваб-Зельдовича), уравнение состояния для скорости реакции может быть преобразовано в простую форму:

$$w_i = -\rho D (g_R \xi)^2 \frac{d^2 Y_i}{d\xi^2} \quad (15)$$

где w_i является чистой скоростью реакции (масса на единицу объема в секунду), g_R – единая скорость потока окислителя и D – молекулярная диффузия.

Отличительной чертой этого уравнения является то, что для получения скорости химической реакции необходимы измерения только состава и температуры. Необходимые параметры температуры мы получаем при решении задачи упруго-пластики в каждой ячейке.

Для учета влияния химической энергии на процесс проникания в метод крупных частиц введен блок расчета тепловыделения по модели CDF, при этом целесообразно производить расчеты по методу CDF для химических взаимодействий между Эйлеровым и Лагранжевым этапами.

Важным этапом, на котором возникает химическая реакция, является создание смешанной ячейки, в которой появляются продукты реакции в виде фторида алюминия. Возникновению этой реакции способствует давление, возникающее на поверхности контакта. Проведенный расчет позволил оценить величину возникающих давлений (рис. 3). Анализ показывает, что максимальные давления значительно превышают величину предельных давлений, при которых возбуждается химическая реакция (200 МПа) [1].



Рисунок 3. Давления, возникающие на границе контакта в смешанных ячейках, МПа

Для определения скорости химической реакции был проведен анализ радиальных скоростей течения фторопласта (рис. 4).

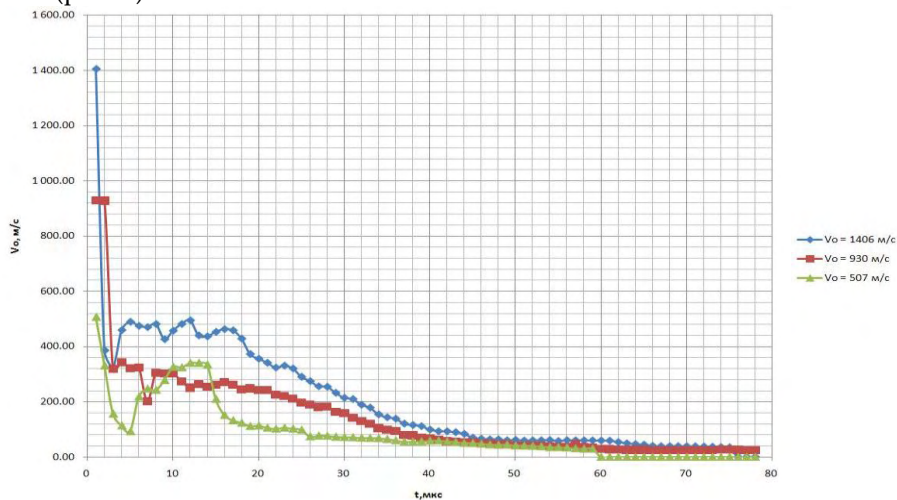


Рисунок 4. Радиальные скорости течения фторопласта в смешанной ячейке, м/с

Анализ показывает, что применение метода МКЧ-CDF позволяет получить результаты, которые качественно и количественно совпадают с результатами эксперимента.

Выводы

1. Исследование процесса деформирования фторпластового ударника на преграде содержащей алюминий с учетом процесса параллельного окисления позволило разработать комбинированный метод расчета этого процесса.

2. Предложенный метод позволяет учитывать результаты проникания фторопласта в алюминий содержащие преграды в широком диапазоне скоростей проникновения с высокой степенью точности (погрешность составляет менее 10%)
3. Результаты делают возможным применение этого метода для расчета проникания других взаимодействующих пар, таких как фторопласт-титан.
4. Анализ результатов показывает, что при таких условиях взаимодействия химическая реакция не реализуется в полной мере. Повышение количества полезно используемой химической энергии возможно при использовании смесей, полученных путем механического перемешивания алюминиевых и фторопластовых нано частиц, в качестве материала ударника. Ударник может быть получен компрессионным обжатием механо-активируемой смеси.

Список литературы

1. А.В. Стыров, В.В. Селиванов, А.И. Осипов, Е.А. Хмельников Исследование процесса взаимодействия алюминия с фторопластом в условиях высокоскоростного соударения // Тез. докл. XIII Всесоюз. семинара Электрофизика горения.- Чебоксары, 1990
2. E.A. Khmelnikov; A.V. Styrov; K.V. Smagin; V.L. Rudenko etc.; 27th International Symposium on Ballistics, Vol.2, 2013, 1264.
ISBN: 978-160595106-5
3. E.A. Khmelnikov; A.V. Styrov; K.V. Smagin; N.S Kravchenko etc.; Defence Technology, Vol. 11, Issue 1, 2015, 56.
DOI: 10.1016/j.dt.2014.09.006
4. О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 392 с.
5. Hiroshi Tsuji, Counterflow diffusions flames. 1982. Institute of Interdisciplinary Research, Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Komaba, Merguro-Ku, Tokyo 153, Japan

NUMERICAL SIMULATION OF PROCESSES OCCURING DURING THE INTERACTION OF REACTION MATERIALS WITH BARRIERS FROM LIGHT ALLOYS

E.A.Khmelnikov, K.V. Smagin, T.E. Zavodova

NizhnyTagilTechnicalInstitute (branch) Ural Federal University, NizhnyTagil, Russia

A promising direction of development of penetrating ammunition, especially small-caliber, one is the use of "reactionary materials" (RM) in their designs instead of conventional explosives. Using the RM allows us to solve a wide range of problems - from increasing the power and effectiveness of the submunitions to increasing safety and reliability of the ammunitions.

Tetrafluoroethylene (PTFE) is RM, which is capable to develop chemical reactions with the release of energy only under certain conditions. Conditions of the chemical reaction can be implemented as at under static loading and heating [1] and during high-speed deformation of the material on the light alloy-based target, such as aluminum (Al), magnesium (Mg), titanium (Ti) [2].

Studies conducted by the authors discovered a chemical exothermic reaction [3] derived by reacting PTFE striker and aluminum-based target at impact of velocity more than 600 m/s (see figure 1).

The purpose of the study is the selection of physical-mathematical model that adequately describes the conditions of dynamic interaction between PTFE striker and target made of aluminum alloys.