

**ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ  
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СО РАН  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**Т Р У Д Ы**

**XIV Всероссийского семинара «Динамика Многофазных Сред»,  
приуроченного к 75-летию академика РАН Фомина В.М.  
2 – 5 ноября 2015 г.**

**Новосибирск  
2015**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ НА ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, Н.Т. Югов

*Научно-исследовательский институт прикладной математики  
и механики Томского государственного университета  
634050, г. Томск, Россия*

Современные защитные конструкции космических летательных аппаратов, как правило, содержат слой из материалов теплозащитного покрытия (ТЗП) [1]. Композиционные материалы на основе полимерных волокон с использованием эпоксидной смолы в качестве связующей (органопластики) находят широкое применение в качестве элементов конструкций, несущих высокие силовые и тепловые нагрузки. Анализ и численное моделирование процессов мощного импульсного энерговыделения, в частном случае – высокоскоростного удара, в таких композиционных материалах требуют знания их теплофизических свойств в широком спектре возникающих при воздействии состояний. Однако имеющийся набор опытных данных о композиционных полимерных материалах крайне невелик.

В данной работе в рамках механики сплошной среды строится математическая модель поведения защитной конструкции, содержащей материал ТЗП, при высокоскоростном соударении с метеорной частицей, разработанная на основе [2]. Рассмотрим конструкцию из пяти разнесенных преград: первая преграда состоит из слоя ТЗП толщиной 10 мм, слоя углепластика толщиной 1 мм и слоя алюминия толщиной 0.33 мм; вторая, третья и четвертая преграды выполнены из алюминия толщиной 0.66 мм; пятая преграда – углепластик толщиной 1 мм. ТЗП представляет собой гомогенную смесь смол и керамик средней плотностью  $\rho_0 = 0.65 \text{ г/см}^3$  и относительным объемом пустот 66 %.

На рис. 1 представлена ударная адиабата матрицы материала ТЗП, построенная как зависимость  $D = c_{m0} + qU$  скорости ударной волны  $D$  от массовой скорости  $U$ . Параметры уравнений состояния [3] и математической модели исследуемых в данной работе композиционных материалов приведены в таблице. Для численной реализации математической модели используется методика расчета на основе модифицированного метода конечных элементов [4].

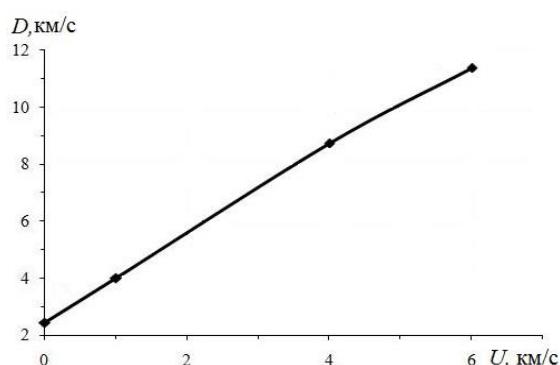


Рис. 1 Ударная адиабата ТЗП.

Таблица. Параметры уравнений состояния и математической модели

Материал	$\rho_{m0}$ , г/см <sup>3</sup>	$c_{m0}$ , км/с	$q$	$\gamma_{m0}$	$\mu_{m0}$ , ГПа	$\sigma_{ms}$ , ГПа	$R_c$	$R_p$	$T_c$	$a_s$ , ГПа	$\alpha_{00}$	$\zeta^*$	$e^*$
ТЗП	1.92	2.0	1.76	1.41	3.64	0.0136	0.015	0.011	0.073	0.01	1.01	0.68	0.3
Сталь	7.85	4.56	1.50	2.26	82.0	1.00	-	-	-	0.17	1.0006	0.3	1.5
Д16Т	2.63	5.386	1.39	2.13	27.7	0.18	-	-	-	0.27	1.0002	0.3	1.0
Углепластик	1.46	2.9	1.22	0.26 0.48	6.67	1.575	1.22	1.66	0.7877	1.05	1.004	0.05	0.4

Обозначения:  $\rho_{m0}$ ,  $c_{m0}$ ,  $\gamma_{m0}$ ,  $\mu_{m0}$ ,  $\sigma_{ms}$  – начальные плотность и объемная скорость звука, коэффициент Грюнайзена, модуль сдвига и динамический предел текучести матрицы,  $R_c$ ,  $R_p$ ,  $T_c$  – пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении и чистом сдвиге соответственно,  $a_s$ ,  $\alpha_{00}$ ,  $\zeta^*$ ,  $e^*$  – константы.

Рассмотрим соударение стального сферического элемента диаметром 2 мм при взаимодействии с данной разнесенной конструкцией под углом 60° при различных скоростях. На рис. 2 представлены результаты взаимодействия при скорости  $V_0 = 3000$  м/с.

При движении в слое ТЗП стальная частица незначительно деформируется. Канал в ТЗП по диаметру практически повторяет размер частицы. При 8 мкс происходит пробитие слоя углепластика, и частица взаимодействует с тонкими алюминиевыми преградами. К 40 мкс она достигает второй слой углепластика и при 51 мкс останавливается, не пробив его. За время взаимодействия стальной шарик «сработался», если начальная масса его была 0.031 г, то после взаимодействия она составляет 0.029 г. В течение всего процесса в зоне взаимодействия ТЗП и первого слоя углепластика в результате ударно-волновых процессов происходит разрыхление ТЗП и отслоение его от углепластика. В результате зона разрушения ТЗП возрастает.

На рис. 3 представлены результаты взаимодействия стального шарового элемента диаметром 2 мм с разнесенной конструкцией под углом 60° при  $V_0 = 9000$  м/с. В данном варианте стальная частица разрушилась при 5 мкс при столкновении со второй алюминиевой преградой.

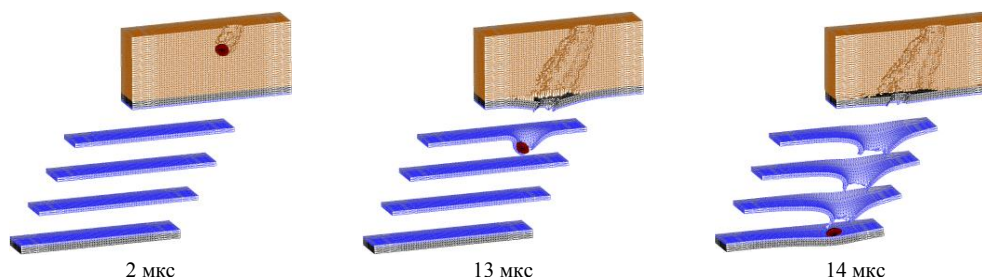


Рис. 2. Хронограмма взаимодействия стального шарового элемента диаметром 2 мм со слоисто-разнесенной (ТЗП + углепластик + алюминиевые соты + углепластик) конструкцией под углом 60° при  $V_0 = 3000$  м/с

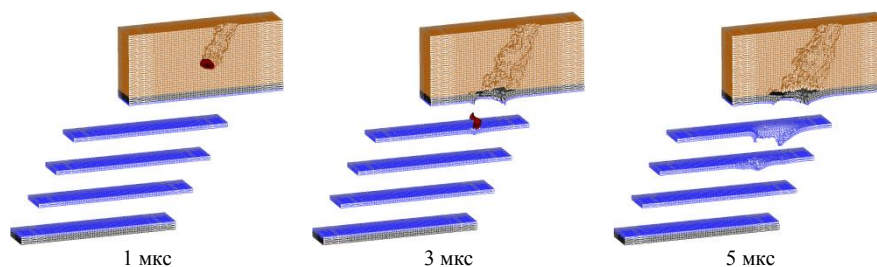


Рис. 3. Хронограмма взаимодействия стального шарового элемента диаметром 2 мм со слоисто-разнесенной (ТЗП + углепластик + алюминиевые соты + углепластик) конструкцией под углом  $60^\circ$  при  $V_0 = 9000$  м/с

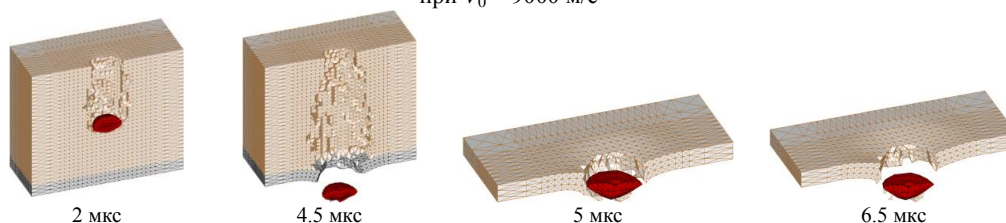


Рис. 4. Хронограмма взаимодействия стального шарового элемента диаметром 2 мм со слоисто-разнесенной (ТЗП + углепластик + углепластик) конструкцией при  $V_0 = 5000$  м/с

В случае, когда диаметр алюминиевых сот превышает диаметр метеорной частицы, при нормальном ударе может возникнуть ситуация, когда ударник пролетает соты насквозь. Этот вариант рассмотрен на рис. 4. Ударник взаимодействует сначала со слоистой преградой (ТЗП + углепластик), затем со вторым слоем углепластика. Как видно из рисунка стальная частица пробивает первый слой углепластика при 4.5 мкс, при этом ее скорость составляет 2454 м/с. Затем она пробивает второй слой углепластика, остаточная скорость составляет 1849 м/с.

В статье использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 9.1.02.2015 в рамках Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2015 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финченко В.С., Иванков А.А., Шматов С.И., Мордвикин А.С. Предварительные результаты расчетных и экспериментальных исследований основных параметров аэротермодинамики десантного модуля проекта «Экзомарс» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, 2014, №2. С. 65–75.
2. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления, Томск: STT, 2005.
3. Мак-Куин Р., Марш С., Тейлор Дж. Уравнения состояния твердых тел по результатам исследований ударных волн. В кн. Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973.
4. Югов Н.Т., Белов Н.Н., Югов А.А. Расчет адиабатических нестационарных течений в трехмерной постановке (РАНЕТ-3). Пакет программ для ЭВМ. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство о гос. Регистрации программы для ЭВМ №2010611042. 2010.