

Влияние масштабного фактора при высокоскоростных испытаниях плоских образцов и моделей корпусов из композиционных материалов

Т.Д. КАРИМБАЕВ,

д-р техн. наук,

А.А. ЧЕРНЫШОВ,

аспирант

(ЦИАМ им. П.И. Баранова,

Москва)

chernyshovaa@bk.ru

Аналитически определены коэффициенты масштабирования в задачах оценки стойкости к высокоскоростному удару пластин и оболочек. Численным экспериментированием показана возможность применения определенных коэффициентов масштабирования при оценке стойкости к удару слоистых пластин и оболочек из материалов с ортотропными свойствами.

Масштабный коэффициент, высокоскоростной удар, модель корпуса, обрыв лопатки, композиционный материал

На практике часто встречаются сложные технические задачи, не поддающиеся непосредственному анализу и экспериментальным исследованиям, например, динамическое сопротивление подземных сооружений, удар по ядерным топливным капсюлям, реактивный удар ядерной энергетической установки и др.

Локализация оборвавшейся лопатки вентилятора в пределах корпуса авиационного двигателя подтверждается дорогостоящими экспериментальными исследованиями. Такие испытания обычно проводятся на последних этапах доводки двигателя, где риск получить отрицательный результат должен быть практически нулевым.

Подобные задачи из различных областей техники без привлечения моделей малого масштаба и без применения методов подобия [1] не могут быть успешно решены. В таких случаях необходимы исследования и испытания конструктивно-подобных элементов и маломасштабных моделей сложных технических сооружений и систем.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал, что прогнозирование характеристик сопротивления удару изделия по результатам испытаний геометрически подобных прототипов маломасштабного размера является актуальной и сложной задачей, которая к настоящему времени не получила надлежащего решения [2, 3].

Целью работы является установление на основе аналитических исследований параметров масштабирования в динамических задачах при высокоскоростных ударах [4]. Результаты наблюдений поведения малоразмерных образцов при высокоскоростных ударах позволят предсказать последствия взаимодействия ударника с проектируемой преградой, заметно удешевив и облегчив процесс отработки различных конструктивных решений.

Выберем объектом исследования слоистую ортотропную плоскую пластину. Рассмотрим четыре плоские квадратные слоистые пластины, размеры которых приведены в табл. 1. В расчетах образцы жестко закреплены по двум противоположным краям и свободны по двум другим краям. По центру пластины наносился удар сферическим ударником. Диаметры ударников выбирались в соответствии с размерами образца и коэффициентами масштабирования (см. табл. 1). Каждый образец подвергался удару со скоростями ударника $V_1 = 25$ м/с, $V_2 = 35$ м/с и $V_3 = 45$ м/с.

Таблица 1

Масштабный коэффициент, n	Размеры пластины, мм	Диаметр ударника, мм	Масса ударника, г
1/4	25×25×0,25 (один слой)	2,5	0,03516
1/2	50×50×0,5 (два слоя)	5	0,2813
3/4	75×75×0,75 (три слоя)	7,5	0,9493
1	100×100×1 (четыре слоя)	10	2,25

Пластина моделировалась тонкостенными оболочками. Изотропный материал ударника принимался абсолютно упругим. Материал слоя преграды представлял собой ортотропный материал. В качестве кри-

терия разрушения принимались предельные напряжения. Коэффициент трения между слоями, а также слоями и ударником – 0,2.

Для сравнительных исследований также выбраны четыре модели цилиндрических корпусов, размеры которых приведены в табл. 2. Три слоя корпуса моделировались тонкостенными оболочками. Внутренний слой жестко закреплен по одному из торцов, два наружных слоя свободны и связаны между собой только силами трения. Удар производился имитатором лопатки, который представлял собой правильную усеченную пирамиду с размерами, указанными в табл. 2. Окружная скорость, при которой обрывался имитатор лопатки, для различных корпусов выбиралась с условием равенства скорости на периферии имитатора лопатки для всех типов размера.

Таблица 2

Масштабный коэффициент, n	Модель корпуса, мм			Имитатор лопатки			
	d	l	t	L , мм	h , мм	t , мм	ω , 1/рад
1/4	500	150	$2 \cdot 3 = 6$	150	50	1–2	1680
1/2	1000	300	$4 \cdot 3 = 12$	300	100	2–4	840
3/4	1500	450	$6 \cdot 3 = 18$	450	150	3–6	560
1	2000	600	$8 \cdot 3 = 24$	600	200	4–8	420

Изотропный материал ударника принимался упругопластическим с билинейным законом деформирования. В качестве критерия разрушения имитатора лопатки задавалась предельная деформация, которая в расчетах принята равной 12 %.

На рис. 1, а представлен типичный график зависимости силы F , действующей на ударник, от перемещения Δ ударника для четырех пластин с масштабными коэффициентами n .

Для нивелирования масштабного фактора были использованы масштабные коэффициенты для силы F и перемещения Δ . Для силы F масштабный коэффициент составил $1/n^2$, для перемещения Δ он был равен $1/n$. На рис. 1, б приведен график зависимости силы F от перемещения Δ с учетом полученных масштабных коэффициентов.

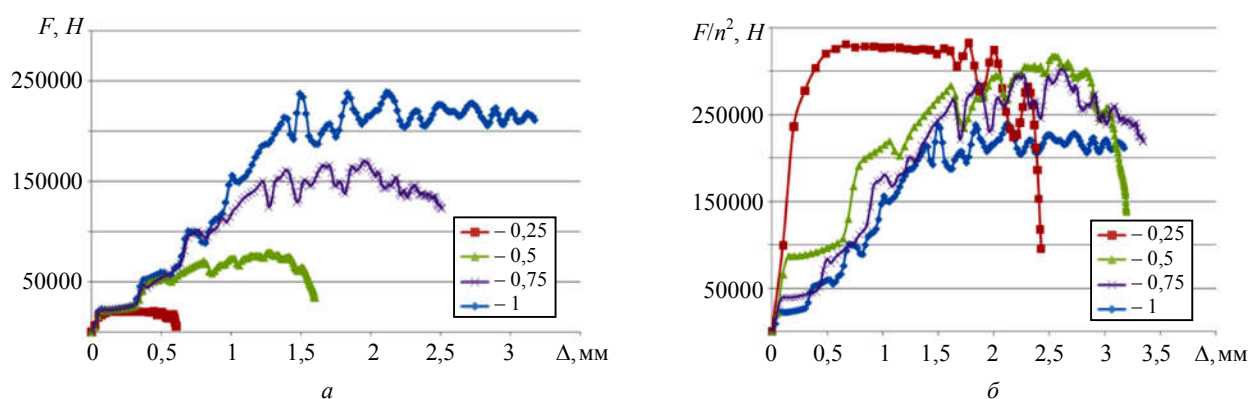


Рис. 1

Как видим (см. рис. 1, б), зависимости «нормализованной» силы F от «нормализованного» перемещения Δ по внешнему виду подобны для трех типов пластин. Пластина меньшего размера отличается тем, что в ней был всего один слой материала, а как известно, во многом благодаря трению между слоями происходит гашение энергии удара.

Методом трапеций были посчитаны площади S под каждой кривой зависимости силы F от перемещения Δ ударника для четырех типов пластин, приведенных на рис. 1. Вычисленные площади S (табл. 3) соответствуют работе U , выполненной ударником при деформировании пластины. Работа U , умноженная на n^{-3} , соответствует «нормализованной» площади S/n^3 под кривыми зависимости «нормализованной» силы F от «нормализованного» перемещения Δ (см. рис. 1). Из табл. 3 можно видеть, что погрешности в величинах нормализованных площадей S/n^3 для образцов разного размера достаточно малы. Это обстоятельство позволяет принять работу $U = S/n^3$ за параметр приведения к единому масштабу при исследовании стойкости на удар образцов.

Таблица 3

n	$V_1 = 25 \text{ м/с}$			$V_2 = 35 \text{ м/с}$			$V_3 = 45 \text{ м/с}$		
	S	S/n^3	$\Delta S/n^3, \%$	S	S/n^3	$\Delta S/n^3, \%$	S	S/n^3	$\Delta S/n^3, \%$
1/4	$1,08 \cdot 10^4$	$6,91 \cdot 10^5$	8,85	$2,15 \cdot 10^4$	$1,38 \cdot 10^6$	10,9	$3,21 \cdot 10^4$	$2,05 \cdot 10^6$	7,0
1/2	$8,34 \cdot 10^4$	$6,74 \cdot 10^5$	6,2	$1,72 \cdot 10^5$	$1,38 \cdot 10^6$	10,9	$2,52 \cdot 10^5$	$2,02 \cdot 10^6$	5,0
3/4	$2,80 \cdot 10^5$	$6,64 \cdot 10^5$	4,52	$5,68 \cdot 10^5$	$1,35 \cdot 10^6$	8,6	$8,20 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^6$	1,3
1	$6,35 \cdot 10^5$	$6,35 \cdot 10^5$	0	$1,24 \cdot 10^6$	$1,24 \cdot 10^6$	0	$1,92 \cdot 10^6$	$1,92 \cdot 10^6$	0

Принятые масштабные коэффициенты могут быть использованы для многослойных ортотропных пластин.

Таким образом, показано, что формы разрушения и механизмы разрушения были подобными во всех четырех масштабных размерах исследованных образцов при соответствующих скоростях удара. Это обстоятельство позволяет экстраполицией перейти на любой уровень энергий, в том числе на уровни энергий, имеющих место при обрыве реальной лопадки и перемещениях реального корпуса.

Представим типичные графики зависимости кинетической энергии имитатора лопадки E_k (рис. 2, а) и потенциальной энергии моделей корпуса E_p (рис. 3, а) от времени t . Для нивелирования масштабного фактора были подобраны масштабные коэффициенты для кинетической энергии имитатора лопадки E_k и потенциальной энергии модели корпуса E_p $1/n^3$, а также для времени $t - 1/n$. Приведем зависимости «нормализованной» кинетической энергии имитатора лопадки E_k (рис. 2, б) и «нормализованной» потенциальной энергии моделей корпуса E_p (рис. 3, б) от «нормализованного» времени t .

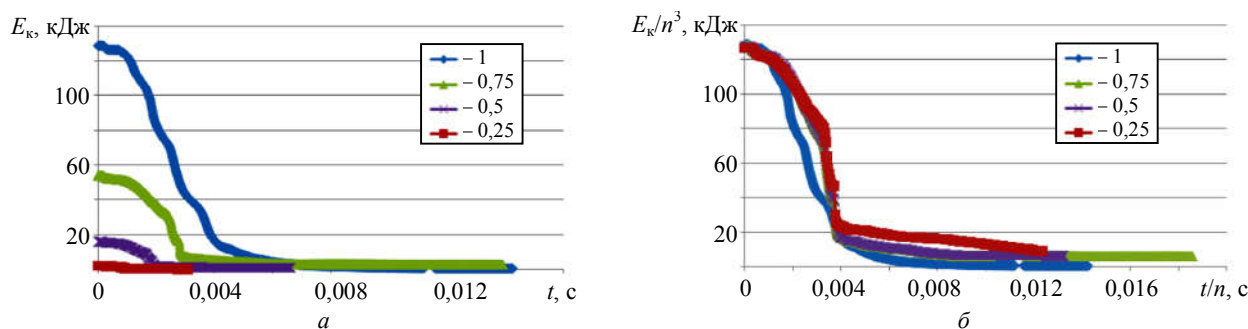


Рис. 2

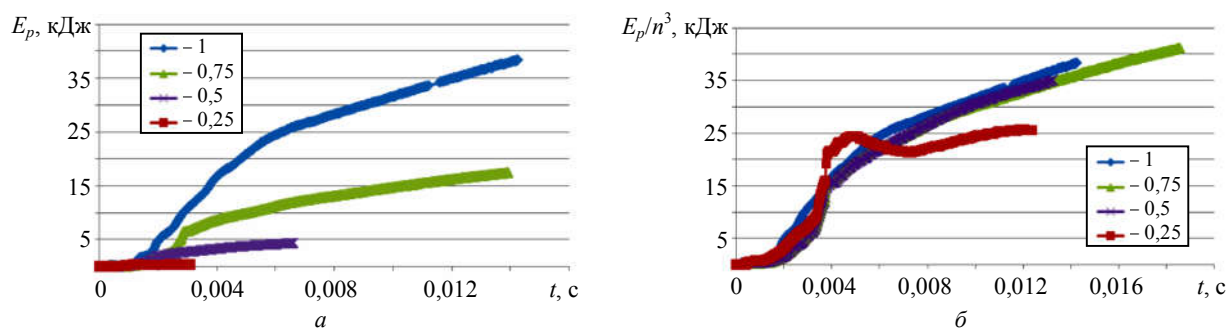


Рис. 3

Как видим, графики зависимости (см. рис. 2, 3, б) подобны для всех четырех типов размеров моделей корпусов при учете масштабных коэффициентов.

В результате проведенных исследований установлены параметры масштабирования, с помощью численного эксперимента показана возможность их применения при оценке стойкости к удару слоистых конструкций из ортотропных материалов. Полученные результаты позволяют приступить к разработке основ моделей подобия в задачах обеспечения безопасности неметаллическими корпусами при разрушении лопаток вентиляторов перспективных турбореактивных двигателей сверхвысокой степени двухконтурности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 439 с.
2. Jones N. Some Comments on the Scaling of Inelastic Structures Loaded Dynamically // Proc. of the Symposium On Size-Scale Effects in the Failure Mechanism of Materials and Structures, Oct. 3–7, 1994, Turin. London: E&FN Spon, 1996. P. 541–554.

3. Carrillo J.G. et al. Scaling Effects in the Low Velocity Impact Response of Fibre Metal Laminates // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2008. Vol. 27. Iss. 9. P. 893–907.
4. Герасимов А.В., Паилов С.В. Численное моделирование соударения высокоскоростных элементов с корпусом и заполнителем аэрокосмической конструкции // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 3–8.

Поступила в редакцию 15.06.17

Scaling Effects in the Impact Resistance of Flat and Cylindrical Samples from Composite Materials

T.D. KARIMBAEV AND A.A. CHERNYSHOV

The scaling factors in the problems of assessing the resistance to high-speed impact of plates and shells are analytically determined. Numerical experimentation shows the possibility of applying certain scaling factors in assessing the impact resistance of laminated plates and shells from materials with orthotropic properties.

Scale factor, high-speed impact, model of fan case, blade-out, composite material