

## СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И ПРОЧНОСТЬ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 539.3

### Оценка несущей способности трехслойных сотопанелей с металлокомпозитными несущими слоями в условиях статического и динамического нагружения

**А.В. ВОЛКОВ,**  
**Ю.О. СОЛЯЕВ,**  
канд. физ.-мат. наук  
(МАИ, Москва;  
ИПРИМ РАН, Москва),  
**Л.Н. РАБИНСКИЙ,**  
д-р физ.-мат. наук  
(МАИ, Москва),  
**А.А. ШАВНЕВ,**  
канд. техн. наук  
(ФГУП «ВИАМ», Москва)  
yos@iam.ras.ru

Представлены результаты моделирования трехслойных алюминиевых сотопанелей с несущими слоями, выполненными из дисперсионно-упрочненного алюминиевого сплава, наполненного частицами карбида кремния. Исследовано влияние объемного содержания наполнителя на несущую способность трехслойной свободно опертой панели в условиях статического нагружения равномерно распределенным давлением и в условиях динамического воздействия при ударе по поверхности панели жестким сферическим телом. Показано неоднозначное изменение статических и динамических характеристик панели в зависимости от объемного содержания наполнителя.

**Сотопанель, дисперсионно-упрочненный сплав, алюмокомпозит, карбид кремния, удар, моделирование**

Трехслойные композитные конструкции (сэндвич-панели) широко применяются при создании авиакосмической техники, так как имеют высокие значения удельных характеристик прочности и жесткости [1, 2]. Кроме этого, концепция трехслойных композитов позволяет создавать изделия многофункционального назначения, например, со встроенными элементами активной теплозащиты, акустической защиты и т.д. [3–6]. Применение композиционных материалов для создания несущих слоев или заполнителей в трехслойных конструкциях позволяет дополнительно улучшить их удельные механические характеристики [7, 8]. Металлокомпозиты в составе трехслойных конструкций в настоящее время используются достаточно редко, однако из-за преимуществ (высокой рабочей температуры, высокой электро- и теплопроводности и т.д.) также находят применение [9, 10].

В настоящей работе рассматриваются сотопанели с несущими слоями, выполненными из дисперсионно-армированного алюмокомпозита, наполненного частицами карбида кремния. Такие материалы системы алюминий – карбид кремния хорошо известны, их особенностью является тот факт, что добавление упрочняющих керамических частиц практически не изменяет кажущейся плотности материала [11, 12]. Возможность применения таких композитов для изготовления элементов конструкций летательных аппаратов и повышение местной устойчивости обшивки и снижение количества подкрепляющих элементов силового набора за счет применения металлокомпозита (модуль Юнга которого в 1,5 раза выше, чем у обычных алюминиевых сплавов) рассматривалась в работе [11].

В настоящей работе исследуется возможность не только повышения жесткости рассматриваемой металлокомпозитной трехслойной панели, но и ее несущей способности. Основной задачей расчетов является исследование влияния объемного содержания наполнителя на механические характеристики панели при статическом и ударном характере внешних воздействий.

#### Исходные данные и методика расчета

Рассмотрим трехслойную плоскую симметричную панель с сотовым заполнителем (рис. 1). Размеры панели в плоскости составляют  $310 \times 310$  мм. Толщина несущих слоев – 0,75 мм, толщина заполнителя – 20 мм, размер грани шестиугранной ячейки сотового заполнителя – 5 мм, толщины стенок сот – 0,0635 и 0,127 мм. Материал сот – алюминиевый сплав Д16, материал несущих слоев – алюмокомпозит на основе сплава Д16, наполненного частицами карбида кремния с объемным содержанием 0, 20, 30, 40 %. Материалы являются изотропными. Свойства рассматриваемых материалов были взяты из работы [12] и представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики металлокомпозитов на основе сплава Д16  
с различным объемным содержанием включений**

Объемное содержание наполнителя, %	Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	Предельные деформации, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
0	72	400	16	2,78
20	100	460	2,5	2,85
30	110	490	1,5	2,89
40	140	400	1,5	2,82

Коэффициент Пуассона композита принят равным стандартному для алюминия значению 0,33. Для описания упругопластического поведения материалов в расчетах использовался критерий Мизеса в предположении изотропного упрочнения, а диаграмма напряжения-деформации моделировалась билинейным законом. Использовался критерий прочности по предельным деформациям сдвига [13].

Для оценки несущей способности панели в условиях статического нагружения на ее верхней поверхности задавалось равномерно распределенное давление (рис. 1, *a*). По контуру нижнего несущего слоя задавались условия свободного опирания, что приближенно соответствует условию подкрепления панели элементами силового набора. Задача решалась в формулировке с учетом «больших прогибов». Для оценки несущей способности панели в условиях динамического нагружения был рассмотрен случай нормального соударения сферического стального ударника с панелью. Диаметр фрагмента панели составлял 100 мм, диаметр ударника – 14 мм. Таким образом, оценивалась прочность панели при ударе жестким малоразмерным объектом, размеры которого сопоставимы с размером ячейки сотового заполнителя. В динамических расчетах использовалась модель редуцированного размера – с обрезанными по кругу краями (рис. 1, *б*). Задавались условия свободного опирания по контуру верхней и нижней пластин несущих слоев, что позволяет ускорить расчеты без существенного снижения точности получаемых результатов [13].

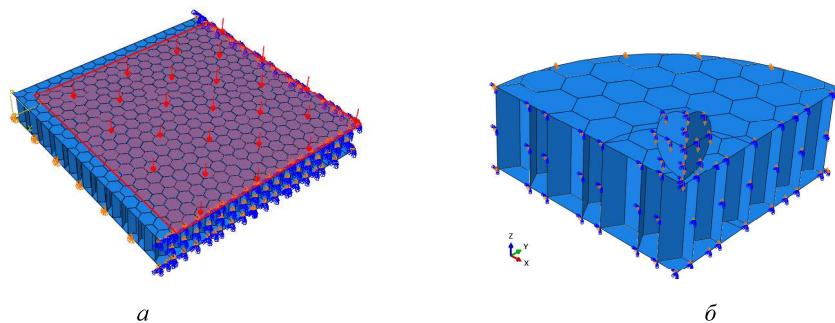


Рис. 1. Фрагменты геометрии трехслойной панели с сотовым заполнителем, использованные в статических (*а*) и динамических (*б*) расчетах

В результате статических расчетов определялся уровень максимального давления, при котором в элементах панели не возникали пластические деформации. В динамических расчетах оценивалось максимальное значение начальной кинетической энергии ударника и критической скорости соударения, которые не приводят к сквозному пробитию панели.

Численное моделирование было проведено в системах Abaqus/Standard и Abaqus/Explicit с использованием разработанных пользовательских скриптов, автоматизирующих порядок определения критических нагрузок. Расчеты проводились с учетом симметрии для 1/4 части модели. Все элементы панели моделировались элементами типа Plate. Общее число элементов в моделях составляло примерно 60000–90000. Соединение между сотами и несущими слоями задавалось условием жесткого сцепления (Tie Constraint). Шаг по времени динамического расчета составлял 0,0025 с.

### Результаты расчетов

На рис. 2 показан пример распределения интенсивности напряжений в несущих слоях и в заполнителе панели при статическом нагружении. Видно, что наиболее нагруженной оказывается центральная часть несущих слоев, где реализуются наибольшие прогибы, а в заполнителе максимум интенсивности

напряжений располагается вблизи краев, что характерно для рассматриваемого случая нагружения плоских панелей.

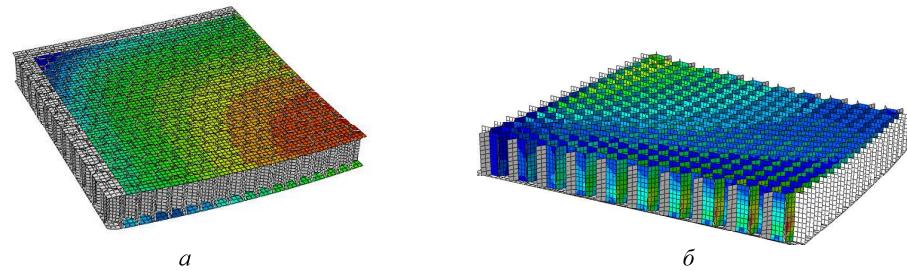


Рис. 2. Интенсивность напряжений в элементах панели при статическом нагружении:  
а – несущие слои; б – сотовый заполнитель

На рис. 3 показаны три характерных результата динамических расчетов.

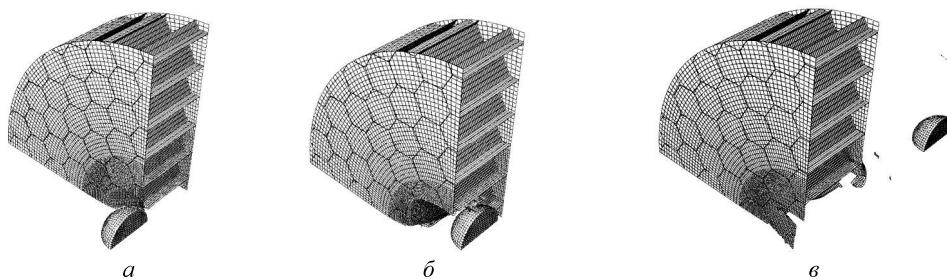


Рис. 3. Примеры результатов динамических расчетов для различных начальных скоростей ударника:  
а – полное пробитие; б – ударник застрял в сотах; в – ударник был остановлен внешним несущим слоем

Сводка результатов расчетов представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Наступление критического состояния для различных вариантов наполнения несущих слоев и различных режимов деформирования сотопанели**

Содержание наполнителя, %	Максимальное давление (соты/несущие слои), МПа	Критическая скорость соударения, м/с	Кинетическая энергия ударника при пробитии, Дж
0	0,198/0,956	74	247
20	0,208/1,073	49	108
30	0,210/1,134	49	108
40	0,217/0,909	40	72

Значения установленных предельных параметров нагружения металлокомпозитных панелей, нормированных относительно соответствующих параметров для панелей, выполненных из сплава Д16, представлены на рис. 4, а. Как видно из представленных результатов, в условиях статического нагружения для рассматриваемого варианта геометрии панели переход в пластическое состояние реализуется в первую очередь в сотах. При увеличении объемного содержания наполнителя происходит повышение предельно допустимого давления, и максимальный эффект реализуется при наполнении 40 %. Этот результат объясняется тем, что деформации сдвига в сотовом заполнителе обратно пропорциональны изгибной жесткости панели, которая, в свою очередь, линейно зависит от модуля упругости несущих слоев. Пластические деформации в материале несущих слоев возникают значительно позже, чем в сотах (см. табл. 2). Оптимальным, с точки зрения предотвращения неупругих деформаций несущих слоев, оказывается уровень объемного содержания наполнителя 30 %, при котором металлокомпозит имеет достаточно высокий модуль упругости (порядка титановых сплавов) и повышенный предел текучести.

Прочность при ударном нагружении панели с металлокомпозитными несущими слоями оказывается ниже, чем у аналогичной панели из ненаполненного сплава, что объясняется снижением пластических свойств металлокомпозита [12]. Как видно из графиков (см. рис. 4, а), повышение нормированных параметров жесткости панели составляет примерно 100 % при использовании максимального наполнения. Значение давления, определяющее несущую способность панели при статическом нагружении, изменяется в пределах 15 %. Критическая скорость соударения может снижаться на 40–50 %.

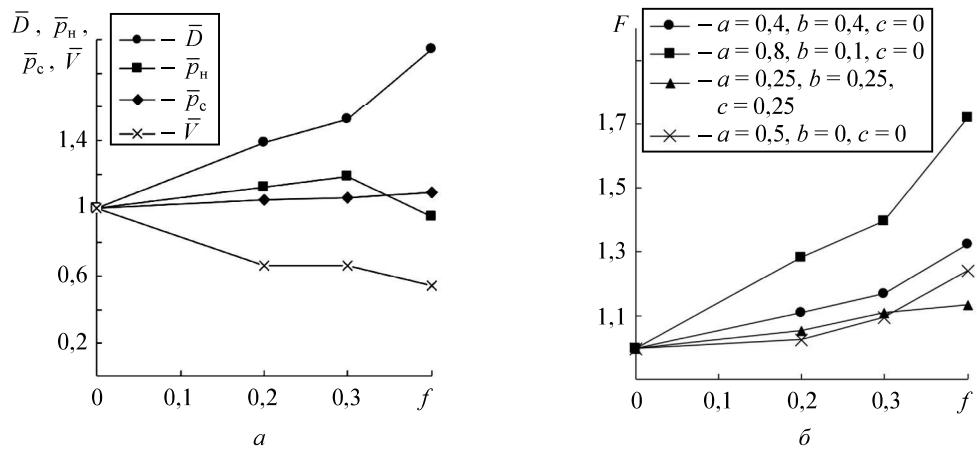


Рис. 4. Влияние объемного содержания керамических частиц карбида кремния в материале несущих слоев на механические характеристики сотопанели: *а* – нормированные значения изгибной жесткости  $\bar{D}$ , максимального давления (не приводящего к пластическим деформациям сотов  $\bar{p}_c$  и несущих слоев  $\bar{p}_H$ ) и критической скорости соударения  $\bar{V}$ ; *б* – изменение безразмерного показателя качества панели  $F$

Для проектирования и оптимизации конструкции панели могут быть предложены различные варианты показателей качества, учитывающих возможные случаи нагружения и характеристики панели. Вариант такого показателя может быть вычислен в виде суммы нормированных характеристик панели с весовыми коэффициентами  $a, b, c$ :

$$F = a \bar{D} + b \bar{p}_c + c \bar{p}_H + (1 - a - b - c) \bar{V}, \quad a \geq 0, \quad b \geq 0, \quad c \geq 0, \quad a + b + c \leq 1.$$

Зависимость этого показателя качества панели от параметров наполнения несущих слоев показана на рис. 4, б. При проектировании конструкций с использованием ограничений на параметры жесткости, устойчивости и стойкости к возникновению пластических деформаций введенный показатель качества растет, и применение металлокомпозитных несущих слоев позволяет существенно повысить значения и абсолютных, и удельных характеристик конструкции, так как ее масса не зависит от параметров наполнения. Учет динамических показателей панели (см. рис. 4, б) приводит к снижению эффектов от применения металлокомпозита, и эти случаи должны рассматриваться с точки зрения нормирования допустимых динамических нагрузок.

Таким образом, в работе представлены результаты моделирования сотопанели, несущие слои которой выполнены из металлокомпозитного материала на основе алюминиевого сплава. На основе расчетов показано, что, несмотря на значительное улучшение показателей жесткости панели и, как следствие, связанных с ней характеристик, таких, как критические нагрузки в задачах устойчивости или стойкость к возникновению пластических деформаций в заполнителе, прочность конструкции при динамическом ударном нагружении может снижаться вследствие снижения пластичности металлокомпозита. Таким образом, с точки зрения проектирования рассмотренных конструкций, при выборе оптимальных параметров наполнения сплава необходимо устанавливать компромисс между требованиями по повышению характеристик жесткости и требованиями по повышению несущей способности при воздействии интенсивных локализованных нагрузок. С точки зрения отработки технологии получения рассмотренного металлокомпозита, принципиальным является повышение его предельных деформаций, которое для рассмотренных элементов конструкций является даже более важным, чем повышение предела текучести или прочности.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20105) в МАИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. 408 с.
- Гайнутдинов В.Г., Абдуллин И.Н., Мусави-сафави С.М. О расчете проектных значений плотности рациональной трехслойной конструкции со стержневым заполнителем // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 1. С. 59–63.

3. Gibson R.F. A Review of Recent Research on Mechanics of Multifunctional Composite Materials and Structures // Composite Structures. 2010. Vol. 92. Iss. 12. P. 2793–2810.
4. Шабалов А.В. и др. Моделирование трансформирования шестилучевой складчатой структуры // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 108–117.
5. Lurie S.A. et al. Design of the Corrugated-Core Sandwich Panel with External Active Cooling System // Composite Structures. 2018. Vol. 188. P. 278–286.
6. Solyaev Yu. et al. On a Combined Thermal/Mechanical Performance of a Foam-Filled Sandwich Panels // International Journal of Engineering Science. 2019. Vol. 134. P. 66–76.
7. Старовойтov Э.И., Леоненко Д.В., Рабинский Л.Н. Колебания элементов авиационных конструкций, возбужденные тепловым воздействием // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 25–32.
8. Тестоедов Н.А., Нағовицин В.Н., Пермяков М.Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах // Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева. 2016. № 1. С. 200–211.
9. Ko W.L., Jackson R.H. Compressive and Shear Buckling Analysis of Metal Matrix Composite Sandwich Panels under Different Thermal Environments // Composite Structures. 1993. Vol. 25. Iss. 1–4. P. 227–239.
10. Андреев П.В., Еремин А.Г., Федоров М.Ю. Применение композиционных и керамических материалов в силовых элементах конструкции космических ядерных энергоустановок // Вестник МАИ. 2012. № 2. С. 106–111.
11. Chawla N., Chawla K.K. Metal Matrix Composites. Wiley, 2006. 355 p.
12. Березовский В.В. и др. Исследование механических свойств металлического композиционного материала на основе алюминиевого сплава, армированного дисперсными частицами карбида кремния // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 12. С. 12–16.
13. Foo C.C., Seah L.K., Chai G.B. Low-Velocity Impact Failure of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels // Composite Structures. 2008. Vol. 85. Iss. 1. С. 20–28.

Поступила в редакцию 8.02.20

После доработки 19.02.20

Принята к публикации 19.02.20

## Evaluation of the Load Bearing Capacity of the Honeycomb Core Sandwich Panels with Face Sheets Made of Metal Matrix Composite under Static and Dynamic Loading

A.V. VOLKOV<sup>1,2</sup>, YU.O. SOLYAEV<sup>1,2</sup>, L.N. RABINSKII<sup>1</sup>, AND A.A. SHAVNEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

<sup>2</sup> Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>3</sup> The All-Russian Institute of Aviation Materials (VIAM), Moscow

*This paper presents the simulation results for the three-layered aluminum honeycomb panels with face sheets made of composite aluminum alloy filled with silicon carbide particles. The effect of the filler volume fraction on the load bearing capacity of a simply supported panel under condition of static loading with uniformly distributed pressure and under the impact over the panel surface with a rigid spherical body is investigated. It is shown that the static and dynamic characteristics of the panel change in a different way depending on the filler volume fraction.*

**Honeycomb core, particulate composite, aluminum composite, silicon carbide, impact, numerical simulation**