

УДК 678.067:621.7

А.Н. Корнейчук¹, Ю.Г. Литковская¹, С.А. Чугунов¹, Г.В. Максимова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОСТОЙКИХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКРАНА

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-35-40

Приведены результаты исследований влияния угла наклона приложения нагрузки на прочностные свойства полиимидного стеклопластикового сотового заполнителя марки ССП-7-4,2. Установлено, что изменение показателей прочности при сжатии и сдвиге сотовых заполнителей зависит как от угла наклона, так и от направления приложения нагрузки. Показано, что следует учитывать прочностные показатели стеклопластиковых сотовых заполнителей в зависимости от направления воздействия нагружения как при эксплуатации изделия, так и при его изготовлении.

Ключевые слова: соты, стеклопластиковый сотовый заполнитель, полиимидное связующее, прочность при сжатии, прочность при сдвиге.

А.Н. Корнейчук¹, Ю.Г. Литковская¹, С.А. Чугунов¹, Г.В. Максимова¹

RESEARCH OF STRENGTH PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT FIBERGLASS HONEYCOMBS FOR CONSTRUCTION OF THE AERODYNAMIC SCREEN

This paper presents the results of researches of influence of a tilt angle of load application on strength properties of polyimide fiberglass honeycomb fillers of the SSP-7-4,2 brand. During this work it has been determined that change of indicators of compression and shear strengths of honeycombs depends both on the tilt angle, and on the direction of load application. It is shown that it is necessary to consider strength indicators of fiberglass honeycomb fillers depending on the direction of load application, both during operation and production.

Keywords: honeycombs, fiberglass honeycomb filler, polyimide resin, compression strength, shear strength.

¹Акционерное общество «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина» Государственный научный центр Российской Федерации [Joint Stock Company «Obninsk Research Produce Enterprise «Technology» named after A.G. Romashin» State Scientific Center of Russian Federation]; e-mail: info@technology.ru

Введение

К материалам, применяемым в конструкциях космической техники, предъявляются очень жесткие требования. Применяемые материалы должны обеспечивать увеличение скорости космических летательных аппаратов (КЛА), повышение их топливной эффективности и способности нести больше полезного груза. Особенно остро этот вопрос стоит для конструкций, которые при взлете и посадке испытывают высокие температурные нагрузки на аэродинамические поверхности изделий. Поэтому к материалам, применяемым в качестве тепловой защиты КЛА, предъявляется ряд специфических требований. Одно из основных – снижение массы конструкции КЛА путем применения новых композиционных материалов.

Замена традиционных материалов на композиционные аналоги позволяет эффективно решать не только эту задачу, что подтверждается широким применением деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиакосмической технике. Среди большого мно-

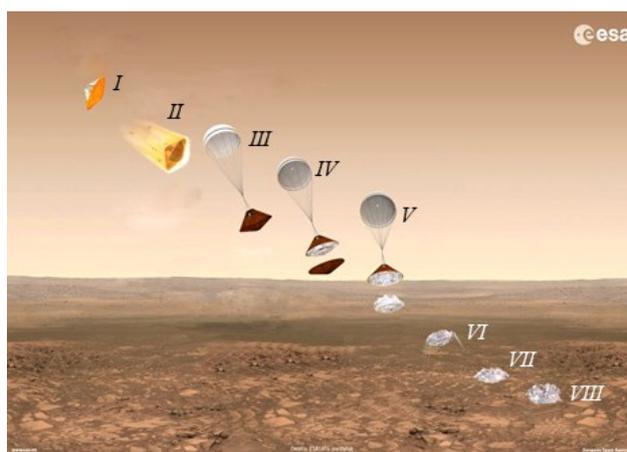
гообразием конструкционных материалов хорошо зарекомендовали себя многослойные конструкции с сотовым заполнителем.

Сотовые заполнители представляют собой пространственную структуру, состоящую из множества шестигранных ячеек. Благодаря высоким удельным характеристикам сотовые заполнители позволяют значительно снизить массу многослойной конструкции при сохранении высоких прочностных показателей [1–5]. В данной работе применяются разработанные в АО «ОНПП «Технология» стеклопластиковые сотовые заполнители или стеклосотопласты.

Материалы и методы

Конструктивные особенности сотового заполнителя в конструкции аэродинамического экрана

Аэродинамический экран является частью десантного модуля (рис. 1), предназначенного для доставки на поверхность Марса научно-исследовательского оборудования и марсохода



- I – Вхождение десантного модуля в атмосферу**
 Время: 0 с
 Высота: 121 км
 Скорость: 21000 км/ч
- II – Срабатывание тепловой защиты при торможении в атмосфере**
 Время максимального нагрева: 1 мин 12 с
 Высота: 45 км
 Скорость: 19000 км/ч
- III – Раскрытие парашюта**
 Время: 3 мин 21 с
 Высота: 11 км
 Скорость: 1700 км/ч
- IV – Отделение аэродинамического экрана и включение радара**
 Время: 4 мин 1 с
 Высота: 7 км
 Скорость: 320 км/ч
- V – Отделение парашюта с задней крышкой**
 Время: 5 мин 22 с
 Высота: 1,2 км
 Скорость: 240 км/ч
- VI – Включение реактивного двигателя**
 Время: 5 мин 23 с
 Высота: 1,1 км
 Скорость: 250 км/ч
- VII – Отключение реактивного двигателя – свободное падение**
 Время: 5 мин 52 с
 Высота: 2 м
 Скорость: 4 км/ч
- VIII – Посадка**
 Время: 5 мин 53 с
 Высота: 0 м
 Скорость: 10 км/ч

Рис. 1. Схема посадки десантного модуля на поверхность Марса

в рамках проекта «Экзо-Марс» – совместной программы Европейского космического агентства (ЕКА) и российской госкорпорации «Роскосмос» по исследованию Марса, основной целью которой является поиск доказательств существования в прошлом и настоящем жизни на Марсе [6–9]. Основная задача аэродинамического экрана – защита оборудования от аэродинамических нагрузок (скоростного напора и температурного воздействия) при вхождении десантного модуля в атмосферу Марса. Аэродинамический экран (рис. 2) состоит из силовой конструкции и теплозащитного кожуха (далее – кожух), на который наносится теплозащитное покрытие.

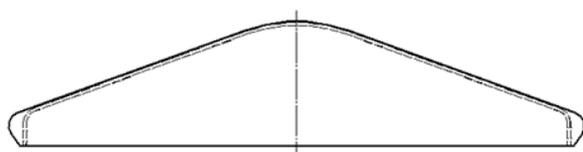


Рис. 2. Аэродинамический экран

При разработке кожуха аэродинамического экрана требовалось учитывать следующие основные требования:

- минимальная масса конструкции;
- температура эксплуатации – не менее 250°C;
- обеспечение сложной геометрической формы.

Еще одной особенностью, обусловленной неравномерностью температурного поля на поверхности аэродинамического экрана, являлась

необходимость переменной толщины кожуха с большим перепадом высот – от 5 до 100 мм.

Исходя из вышеуказанных требований, для кожуха аэродинамического экрана предложена трехслойная конструкция с сотовым наполнителем (ТСК). Наиболее перспективными наполнителями, удовлетворяющими заданным требованиям, являются термостойкие полиимидные стеклосотопласты типа ССП-7 с размером граней ячеек 3,5 и 4,2 мм, разработанные в АО «ОНПП «Технология». Свойства выбранных стеклосотопластов представлены в таблице.

С учетом нагрузок, которые воздействуют на аэродинамический экран при скоростном напоре, и требований к минимальной массе конструкции, в качестве наполнителя ТСК выбран стеклосотопласт марки ССП-7-4,2.

Технологические особенности использования сотового наполнителя сложной геометрической формы

Стеклопластиковые сотовые наполнители типа ССП-7 изготавливают на основе полиимидного связующего СП-97К, они могут длительно эксплуатироваться при температурах до 300°C, сохраняя при этом высокие прочностные характеристики [10–13].

Конструкция кожуха, как было отмечено ранее, представляет собой изделие сложной геометрической формы. В особенности это проявляется в зоне скругления между конической и цилиндрической частью аэродинамического экрана (рис. 3), где минимальная высота сотового

Свойства термостойких полиимидных стеклосотопластов

Сотопласт	Номер технических условий	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
ССП-7-3,5	ТУ1-596-481–2011	65–90	2,2–3,0
ССП-7-4,2		55–75	1,6–2,6

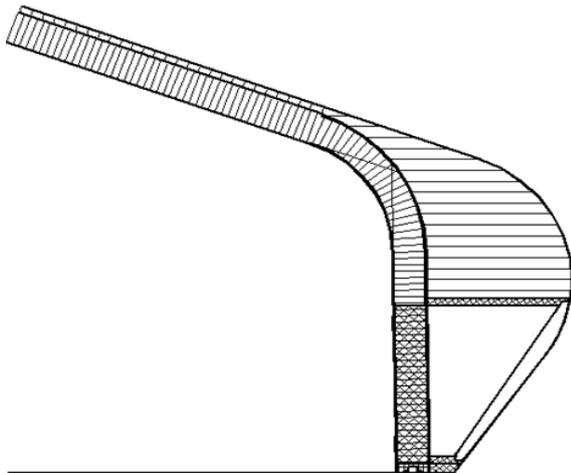


Рис. 3. Сечение аэродинамического экрана в зоне скругления между конической и цилиндрической частью

заполнителя составляет 5 мм (в зоне конуса), а максимальная – достигает 100 мм.

Перепад высот для сотового заполнителя приводит не только к технологическим сложностям при его изготовлении и формовании, но и к снижению упруго-прочностных характеристик [14]. Кроме того, следует также учитывать и нагрузки на сотовый наполнитель при приклеивании к нему несущих слоев.

В данной схеме давление при склеивании обшивки и стеклосотопласта (рис. 3) прикладывается не параллельно каналам сотовой структуры, по направлению к которым сотовый наполнитель обладает наибольшей прочностью при сжатии.

При формовании трехслойной конструкции кожуха использован совмещенный метод вакуумного формования наружной обшивки с одновременным приклеиванием ее к сотовому наполнителю. Сотовая структура в данном случае выполняет еще и роль оснастки для формования несущего слоя и, соответственно, подвергается воздействию через формирующую цулагу (эластичную мембрану). При изготовлении сотового заполнителя сложной геометрической формы не избежать его нагружения под углом к каналам сотовой структуры. Для того чтобы не произошло разрушения сотового заполнителя при воздействии давления при формовании (склеивании), требуется учитывать снижение значений прочностных характеристик сотовой структуры в зависимости от угла приложения нагрузки.

Результаты и обсуждение

Исследование прочности сотовой структуры

Прочностные свойства стеклосотопласта определяются как свойствами матрицы, так и свойствами наполнителя. При повышенных температурах прочностные показатели начинают в большей степени определяться свойствами матрицы.

Для получения стеклосотопластов, применяемых в конструкции аэродинамического экрана, использу-

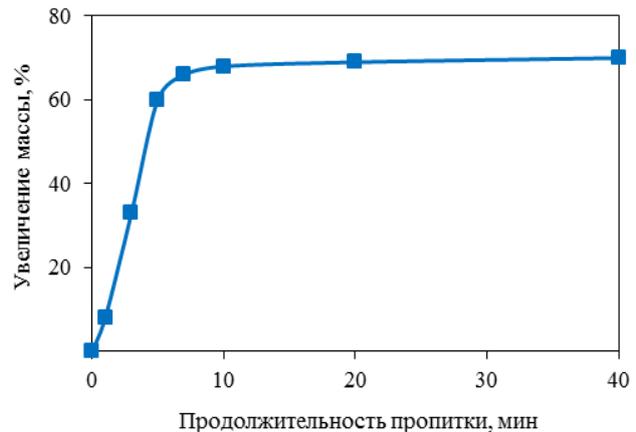


Рис. 4. Влияние продолжительности пропитки на количество нанесенного связующего на стеклоткань Э1-100

ется полиимидное связующее марки СП-97К. Основной операцией технологического процесса производства стеклосотопласта, которая влияет на параметры плотности и прочности получаемых стеклосотопластов, является операция пропитки.

Однородность свойств по объему сотовой структуры определяется как свойствами самого связующего, так и условиями пропитки. С увеличением вязкости связующего возрастает его содержание на стенках ячеек и, соответственно, повышаются плотность и прочность получаемых стеклосотопластов.

Ранее выполненные исследования [15] показали, что при проведении однократной пропитки из-за малого наноса связующего получается стеклосотопласт с низкой плотностью и, как следствие, с низкой прочностью при сжатии. В связи с этим выбрана двухкратная пропитка стеклосотопласта.

Пропитку экспериментальных образцов термостойкого стеклосотопласта проводили путем двухкратного погружения их в ванну, заполненную связующим СП-97К. Оптимальное время выдержки в пропиточной ванне определяли на образцах стеклоткани марки Э1-100 размером 100×100 мм с нанесенными клеевыми полосами, взвешенных до пропитки с точностью до третьего знака после запятой. Образцы погружали в пропиточную ванну со связующим СП-97К и выдерживали в течение 1, 3, 5, 7, 10 и 20 мин. После выдержки образцы извлекали из пропиточной ванны, подвешивали для стекания избытка связующего в течение 15 мин, после чего взвешивали. По полученным данным можно выбирать оптимальную продолжительность пропитки и таким образом регулировать прочностные свойства (рис. 4). Для проведения дальнейших исследований продолжительность пропитки образцов стеклосотопласта составила 7 мин.

Помимо продолжительности пропитки на физико-механические свойства стеклосотопласта также влияет

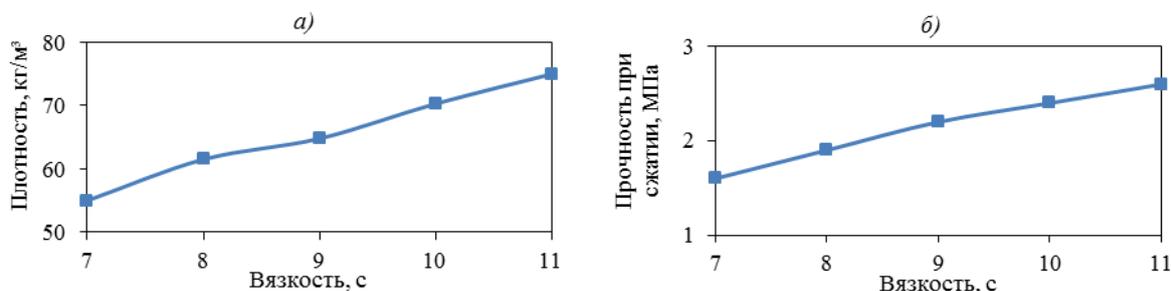


Рис. 5. Зависимость плотности (а) и прочности при сжатии (б) стеклосотопласта ССП-7-4,2 от вязкости связующего

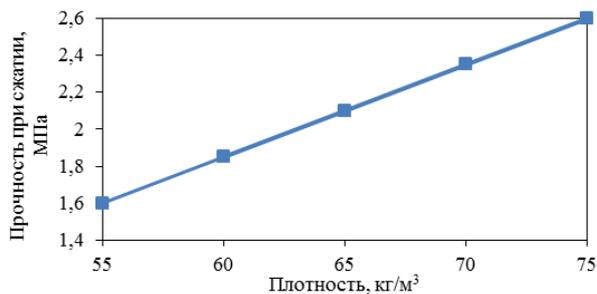


Рис. 6. Зависимость прочности при сжатии стеклосотопласта ССП-7-4,2 от плотности

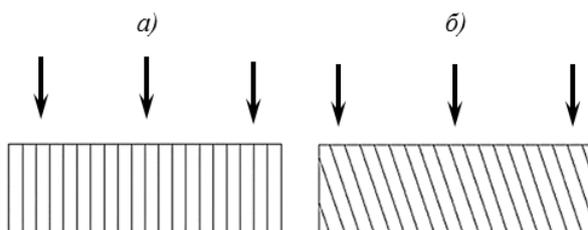


Рис. 7. Нагружение стеклосотопласта параллельно каналам ячеек (а) и под углом (б)

показатель вязкости связующего. Проведены исследования влияния вязкости связующего СП-97К на плотность получаемых сотопластов (рис. 5, а). Видно, что увеличение вязкости связующего приводит к увеличению плотности стеклосотопласта вследствие большего налипания связующего и увеличения толщины стенки ячейки. Видно (рис. 5, б), что увеличение толщины стенки ячейки приводит к увеличению показателей прочности при сжатии.

В результате для исследуемого стеклосотопласта ССП-7-4,2 получена зависимость прочности при сжатии от плотности в требуемом интервале значений – от 55 до 75 кг/м³ (рис. 6).

Известно, что сотовый наполнитель имеет наибольшие прочностные показатели в направлении, параллельном каналам ячеек (рис. 7).

В данной работе исследовано изменение прочностных характеристик стеклосотопластов в зависимости от угла наклона приложения нагрузки. Изготовлены образцы стеклосотопласта марки ССП-7-4,2 с различными углами наклона каналов ячеек – от 0 до 25 градусов (через каждые 5 градусов) и определены их показатели прочности при сжатии по ОСТ 1 90150–74 (рис. 8). Сущность метода заключается в определении величины разрушающей силы при сжатии по высоте стандартного образца усилиями, направленными вдоль стенок ячеек сотового наполнителя. Для испытаний использовали цилиндрические образцы диаметром 50,0±0,5 мм. Опорные поверхности образца должны быть перпендикулярными к продольной оси образца (допуск 0,1 мм) и параллельными между собой (допуск 0,1 мм). Видно, что угол наклона каналов сотовой структуры влияет на прочность при сжатии. Следует отметить, что значительное снижение прочно-

сти происходит уже при величине угла 15 градусов: стеклосотопласт теряет почти 50% исходной прочности. При этом характер разрушения образцов свидетельствует о возникновении касательных напряжений, в результате чего образец испытывает сложное нагружение (сжатие+сдвиг). Исходя из этого можно предположить, что в зависимости от направления резки падение свойств неоднородной сотовой структуры будет отличаться.

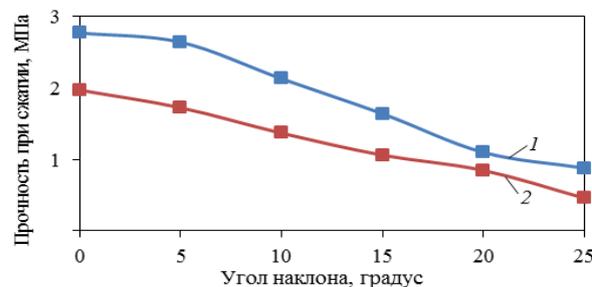


Рис. 8. Зависимость прочности при сжатии стеклосотопласта ССП-7-4,2 от угла наклона приложения нагрузки в направлении, параллельном (1) и перпендикулярном (2) двоянным стенкам сотового наполнителя

На рис. 9 представлены два направления резки сотовой структуры под углом: первое горизонтальное – параллельно двоянным стенкам, второе (вертикальное) – перпендикулярно двоянным стенкам.

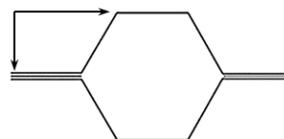


Рис. 9. Направления резки сотового наполнителя

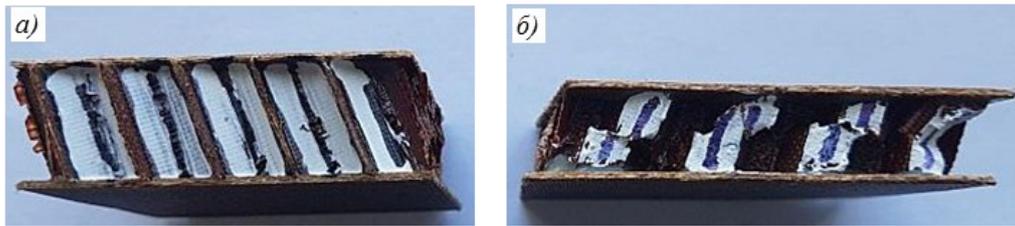


Рис. 10. Образцы с нанесенными маркерами до (а) и после нагружения (б)

Исследования подтвердили предположение о том, что полученная зависимость (рис. 8, кривая 1) демонстрирует меньшее снижение прочности образцов, вырезанных по направлению параллельно сдвоенным стенкам, при тех же углах наклона каналов ячеек.

Для визуального подтверждения смешанного характера нагружения изготовлены трехслойные образцы на основе стеклосотопласта ССП-7-4,2 с максимальным углом наклона каналов ячеек 25 градусов (рис. 10). На образцы нанесены специальные маркеры. Применение обшивок необходимо для обеспечения равномерности нагружения образца и предотвращения смещения направления нагружения из-за неравномерной жесткости стенок ячеек внутри образца. Образцы подвергали испытаниям на сжатие. Смещение маркеров происходит в двух направлениях (рис. 10), что подтверждает смешанный характер нагружения сотового заполнителя.

На основании полученных результатов целесообразно исследовать влияние угла наклона приложения нагрузки на сдвиговые характеристики сотового заполнителя. Аналогичным образом изготовлены образцы стеклосотопласта марки ССП-7-4,2 с различными углами наклона каналов ячеек – от 0 до 25 градусов (через каждые 5 градусов) и определены их прочностные показатели

при сдвиговых нагрузках по ОСТ1 90122–74. Образец для испытаний (рис. 11) представлял собой две одинаковые панели сотового заполнителя, склеенные с тремя стальными пластинами, которые служат для передачи усилий с одного торца сотового заполнителя на другой, вызывающих в последнем напряжения сдвига. Приклеивание стальных пластин к панелям сотового заполнителя производили с помощью клея ВК-36.

При сдвиговых нагрузках помимо направления резки важным условием является выбор направления угла наклона ячеек по отношению к направлению приложения нагрузки. В случае совпадения этих направлений устойчивость стеклосотопласта будет обеспечиваться только прочностными характеристиками армирующего наполнителя. Для корректного определения сдвиговых показателей сотовой структуры необходимо располагать образцы так, чтобы направление угла наклона ячеек было противоположным направлению приложения нагрузки.

Результаты испытаний (рис. 12) показали, что сдвиговые характеристики сотового заполнителя также изменяются в зависимости от направления резки. Необходимо отметить, что при нагружении в направлении, параллельном сдвоенным стенкам ячеек, наблюдается снижение сдвиговых характеристик (рис. 12, кривая 1), а в направлении, перпендикулярном сдвоенным стенкам ячеек

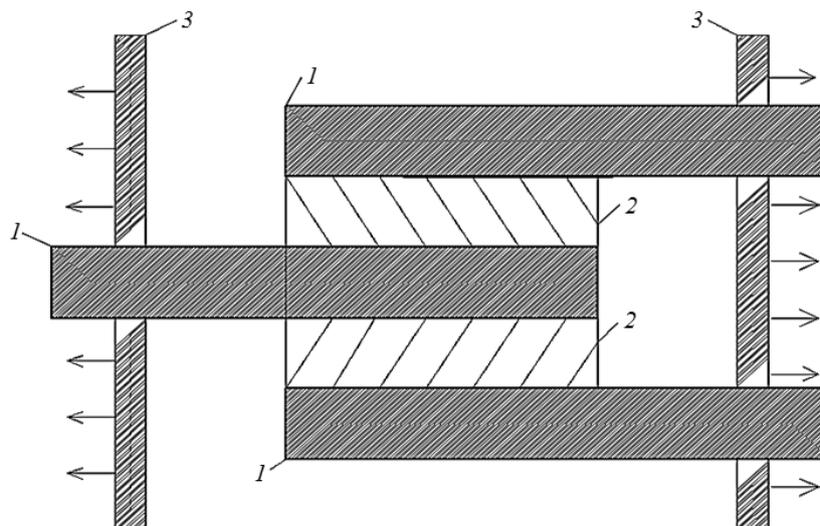


Рис. 11. Образец для испытаний на сдвиг:

1 – металлическая пластина; 2 – образцы стеклосотопласта; 3 – растягивающие элементы

(рис. 12, кривая 2), прочность при сдвиге практически не изменяется. Это объясняется тем, что в первом случае двоякие стенки ячеек выполняют функцию ребер жесткости. При изменении угла наклона изменяется рычаг приложения нагрузки, т. е. с увеличением угла наклона величина разрушающего напряжения снижается. При нагружении в направлении, перпендикулярном стенкам ячеек, сотовый наполнитель не имеет ребер жесткости и, как следствие, его сдвиговые характеристики практически не зависят от угла приложения нагрузки.

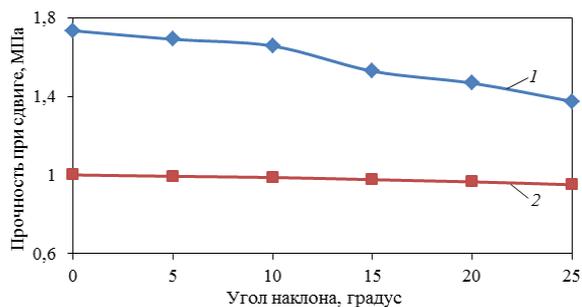


Рис. 12. Зависимость прочности при сдвиге стеклосотопласта ССП-7-4,2 от угла наклона приложения нагрузки в направлении, параллельном (1) и перпендикулярном (2) двояким стенкам сотового наполнителя

Проведенные исследования физико-механических характеристик сотового наполнителя марки ССП-7-4,2 помогли определить минимально возможное количество стыков сотового

заполнителя в зоне скругления между конической и цилиндрической частью аэродинамического экрана с учетом допустимых при формовании несущего слоя углов наклона каналов сотовой структуры к направлению приложения давления.

Заключения

1. В результате проведенных исследований для стеклосотопласта марки ССП-7-4,2 получены зависимости показателей плотности и прочности при сжатии от вязкости связующего и параметров пропитки, позволяющие регулировать свойства стеклосотопласта в процессе изготовления.

2. При использовании сотовых структур сложной геометрической формы следует учитывать прочностные показатели сотового наполнителя по направлению к воздействию нагружения как при эксплуатации в изделии, так и при изготовлении.

3. Прочность при сжатии сотового наполнителя при его нагружении под углом к направлению каналов сотовой структуры снижается с увеличением величины угла – при величине угла 15 градусов снижение свойств составляет более 50%.

4. Прочность при сжатии и сдвиге сотового наполнителя при его нагружении под углом к направлению каналов сотовой структуры зависит также от направления резки относительно направления двояких стенок сотового наполнителя. Прочностные показатели при нагружении параллельно двояким стенкам стеклосотопласта выше, чем при нагружении перпендикулярно двояким стенкам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин М.Ю. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
2. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
3. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: справочник. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
4. Михайлин Ю.А. Применение полиимидных материалов в зарубежной авиационной и космической технике // Пластические массы. 1981. №10. С. 23–30.
5. Любин Дж. Справочник по композитным материалам. М.: Машиностроение, 1988. 584 с.
6. Бецис Д. История проекта ExoMars: Как все начиналось // GALSPACE: проект «Исследование Солнечной системы» [Электронный ресурс]. URL: galspace.spb.ru/index472-1.html (дата обращения: 01.06.2019).
7. The ExoMars Programme 2016–2020 // European Space Agency [Электронный ресурс]. URL: www.exploration.esa.int/mars/46048-programme-overview (дата обращения: 01.06.2019).
8. Роскосмос и Европейское космическое агентство подписали договор по «Экзомарсу» // Lenta.ru: интернет-газета [Электронный ресурс]. URL: www.lenta.ru/news/2013/03/14/exomars (дата обращения: 01.06.2019).
9. Эйсмонт Н., Батанов О. «ЭкзоМарс»: от миссии-2016 к миссии-2020 // Наука и жизнь. 2017. №4. С. 2–14.
10. Волков В.С., Денисова Е.В., Шуль Г.С. и др. Разработка термостойких стеклопластиковых сотовых наполнителей // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. XX Междунар. науч.-технич. конф. Обнинск, 2013. С. 86–87.
11. Волков В.С., Корнейчук А.Н., Денисова Е.В. и др. Новые термостойкие стеклопластиковые сотовые наполнители // Авиационная промышленность. 2014. №3. С. 52–56.
12. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2014. 664 с.
13. Тростянская Е.Б., Михайлин Ю.А., Бухаров С.В. Тенденции применения и развития композиционных материалов в самолетостроении // Авиационная промышленность. 2002. №2. С. 18–22.
14. Степанов Н.В., Савельев Д.И., Петрова О.Л. и др. Экспериментальная зависимость жесткостных характеристик сотовой структуры от высоты наполнителя // Конструкции из композиционных материалов. 2009. №1. С. 48–53.
15. Крюков А.М. Исследование влияния режимов формования на свойства крупногабаритных стеклосотопластов и разработка их технологии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 23 с.