

УДК 620.172/.178.2

К ВОПРОСУ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ СКЛАДЧАТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ТИПА Z-ГОФР НА ПОПЕРЕЧНОЕ СЖАТИЕ

© 2012 И. В. Двоеглазов, В. И. Халиулин

Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ имени А.Н. Туполева

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований прочности многослойных панелей со складчатым наполнителем из армированных композиционных материалов. Даны рекомендации по выбору формы и размеров образцов для повышения стабильности результатов эксперимента. Приводится сравнение прочности на поперечное сжатие складчатых наполнителей типа z-гофр, изготовленных из различных материалов, и их сравнение с сотовыми панелями.

Многослойные панели, складчатый наполнитель, z-гофр, статические испытания.

В конструкции летательных аппаратов широко используются многослойные панели с сотовыми и вспененными наполнителями. Данные конструкции обладают высокой удельной прочностью и жесткостью, но не лишены недостатков [1,2]: низкая ударная прочность, сложность с удалением конденсата, невысокая прочность на сдвиг. Применение гофрированных наполнителей в многослойных панелях позволяет избежать данных недостатков, однако вопросы их применения и расчета пока являются малоизученными [1]. Перспективным типом гофрированного наполнителя являются складчатые структуры (рис. 1). Новые технологии изготовления данных структур из высокопрочных армированных композиционных материалов (стекло, углепластики) [3] и широкие возможности по оптимизации их геометрических параметров позволяют добиться высоких прочностных характеристик наполнителя на поперечное сжатие, продольный сдвиг и изгиб.

В данной работе отражены исследования по разработке методик статических испытаний на поперечное сжатие многослойных панелей со складчатыми наполнителями типа z-гофр из композиционных материалов.

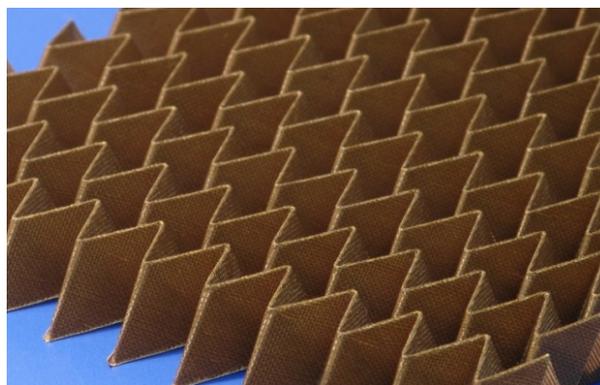


Рис. 1 Образец наполнителя типа z-гофр из органопластика

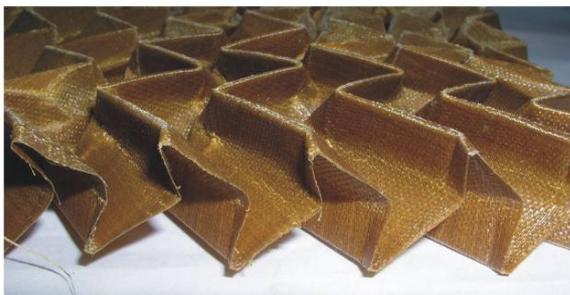
При постановке экспериментов по определению механических характеристик образцов легких наполнителей для многослойных панелей большое значение имеет способ изготовления наполнителей, геометрические размеры образцов и схема их нагружения [4,5]. Особое внимание этим факторам следует уделять при испытании панелей со складчатыми наполнителями, так как размеры их структурных элементов соизмеримы с размерами многослойной панели. Для испытания свойств сотовых или вспененных наполнителей существуют отечественные и зарубежные стандарты, в то время как для испытания складчатых наполнителей таких стандартов в настоящее время нет.

Определение вида образцов для испытаний на поперечное сжатие

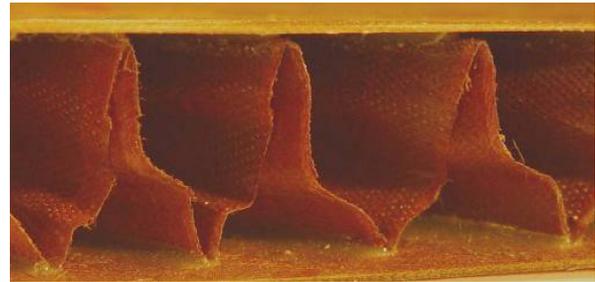
При исследовании свойств многослойных конструкций одной из первостепенных задач является определение вида и минимальных размеров испытуемого образца.

Большое влияние на прочность образцов при поперечном сжатии оказывает форма потери устойчивости граней, которая, в свою очередь, зависит от способа их закрепления по зигзагообразным линиям. Чтобы определить влияние подкрепления граней по зигзагообразным линиям, проводился эксперимент, при котором образцы нагружались в поперечном направлении до точки потери устойчивости и далее до полного разрушения. Уровень относительной деформации $[\square]$ при этом составлял от 0,25 до 0,7. Всего было испытано более 500 образцов из органопластика, стеклопластика, углепластика, арамидной бумаги Кевлар и базальтопластика. Испытания проводились на испытательной машине Instron 5882 (100кН).

Проведенный эксперимент показал, что форма потери устойчивости граней зависит в первую очередь от наличия их соединения с обшивками и цилиндрической жесткости грани. Для граней z-гофра, не склеенных с обшивками, схема потери устойчивости близка к схеме шарнирно опертой пластины по двум своим кромкам, нагруженной сжимающим усилием (рис. 2,а).



а



б



в

Рис. 2. Общий вид разрушения z-гофра:
а - не склеенного с обшивками органопластика;
склеенных с обшивками органопластика (б) и
стеклопластика (в)

Грани образцов заполнителей, склеенных с обшивками, защемлены по двум своим кромкам и ограничены в перемещения в плоскости обшивок, поэтому не могут принять другую форму складчатости. У образцов заполнителя из материалов, не обладающих высокой прочностью и жесткостью на сжатие (aramидная бумага Кевлар, органопластик), грани деформируются с образованием двух зон изгиба (рис. 2,б). При этом разрушения армирующего слоя не происходит даже при полном смятии панели ($[\square]=0,7$). У материалов, обладающих высокой прочностью и жесткостью на сжатие (углепластик, стеклопластик), происходит срез грани и полное разрушение заполнителя (рис. 2,в). Линия разрушения направлена перпендикулярно ребру по пилообразным линиям и, как правило, расположена в области, близкой к срединной плоскости заполнителя.

Прочность при поперечном сжатии у заполнителя, склеенного с обшивками, повышается на 25-40% по сравнению с образцами, не склеенными с обшивками.

Проблема выбора размеров образцов обусловлена разной степенью влияния краевого эффекта для заполнителей с разной жесткостью граней и разными пропорциями рельефа. Для некоторых типов заполнителей,

например сот, существуют рекомендации по выбору размеров испытываемых образцов, содержащих не менее 9 структурных элементов в ортогональных направлениях. По этой рекомендации вначале проводились испытания панелей, содержащих не менее 14-16 граней по длине и ширине панели. При длине грани у испытываемых образцов до 50 мм размеры панелей оказывались очень большими, что предъявляло повышенные требования к испытательному оборудованию и приводило к большим расходам на изготовление образцов и их испытание. Поэтому задача уменьшения размеров образцов для испытаний при сохранении адекватности результатов испытаний является весьма актуальной.

Испытания однотипных образцов, но с различными габаритными размерами, показали, что в зависимости от отношения количества элементов по зигзагообразным линиям к количеству элементов по пилообразным линиям можно получить результаты прочностных испытаний, отличающиеся друг от друга от 15 до 50%.

Это явление можно отнести к краевым эффектам. Оно обусловлено различными граничными условиями закрепления граней гофра в центре и по краям образца.

Одним из способов обеспечения равных условий нагружения граней по всей площади образца является сохранение ребер по пилообразным линиям, расположенным по его периметру.

Для оценки влияния краевого эффекта изготовлено две группы образцов многослойных панелей с однотипным стеклопластиковым наполнителем в виде z-гофра, с одинаковыми геометрическими и весовыми параметрами. Отличие между двумя группами образцов заключалось в схеме вырезки наполнителя. В первой группе вырезка наполнителя сделана таким образом, чтобы сохранить ребро жесткости вдоль пилообразной линии z-гофра на кромке. Во второй группе вырезка осуществлена без сохранения данного ребра.

По диаграммам нагружения на рис. 3 видно, что изменение вида краевой зоны образца сильно влияет на его прочностные свойства. Сохранение ребра по краевой зоне

меняет схему подкрепления грани и увеличивает прочность на 35%, а модуль упругости - на 12%.

По результатам эксперимента можно сделать рекомендацию о способе вырезки образцов для испытания на поперечное сжатие с обязательным сохранением ребра по пилообразным линиям на кромке образца (если не применяются другие способы компенсации краевого эффекта).

Для оценки возможности уменьшения размеров образцов для испытания при соблюдении данного способа вырезки образцов был проведен следующий эксперимент.

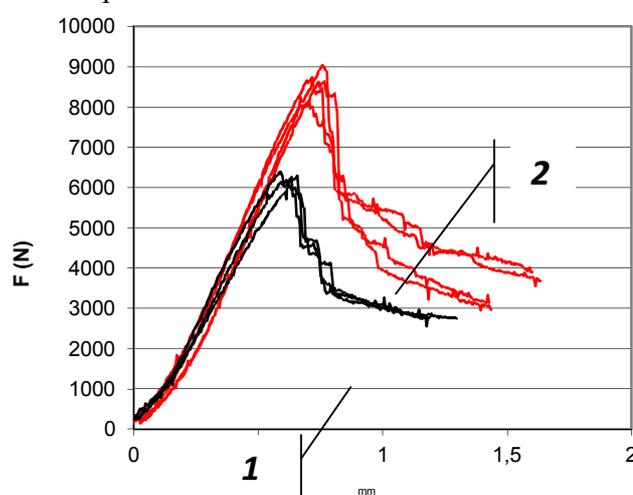


Рис. 3. Диаграммы нагружения 2 партий образцов: 1 – без сохранения ребра по кромке образца; 2 – с сохранением ребра

Изготовлено несколько партий деталей с различной площадью. Первая группа имела в своем составе по 4 элемента по пилообразным и зигзагообразным линиям (4x4) и габаритный размер 65x65 мм. Вторая группа образцов имела по 8 элементов вдоль пилообразных и зигзагообразных линий (8x8) и габаритный размер 125x130 мм. Площадь образцов второй группы в 4 раза больше площади образцов первой группы. Вырезка образцов для каждой партии деталей производилась с сохранением ребра по кромке образцов.

Испытания проводились по стандартной схеме нагружения при поперечном сжатии с одной самоориентирующейся плитой и с постоянной скоростью 5 мм/мин.

При оценке значения прочности образцов заполнителя типа z-гофр при поперечном сжатии условно считаем, что реальный заполнитель внутри панели заменен однородным заполнителем, приведенные прочностные и упругие характеристики которого определяются по принципу эквивалентности работы и характеризуются величиной приведенной прочности σ_z^{np} и приведенным модулем упругости E_z^{np} .

Эксперимент показал, что, используя данные приемы вырезки, можно уменьшить влияние краевого эффекта и габаритные размеры образцов. Расхождения в результатах испытания образцов составляют не более 3% по прочности (рис. 4), но при этом образцы с большей площадью (8x8 элементов) показывают более стабильные результаты.

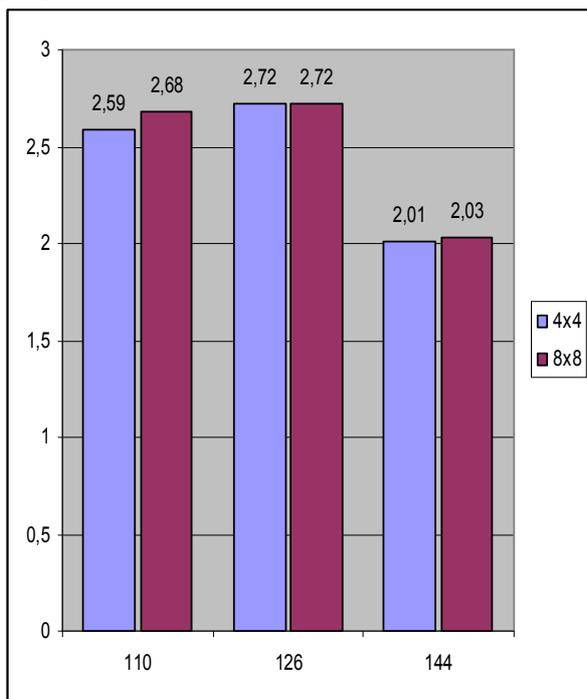


Рис. 4. Гистограммы зависимости предела прочности (МПа) от площади образцов при их оптимизированной форме

Таким образом, при выборе размеров образца для испытания необходимо учитывать геометрические параметры элементов z-гофра, вырезку образцов производить с учетом влияния краевого эффекта, особенно вдоль пилообразных линий. Минимальный размер образцов 100x100 мм, количество элементов в образце не менее 6 по зигзагообразным линиям и 4

по пилообразным линиям. Увеличение количества структурных элементов в образце желательно для повышения стабильности результатов эксперимента.

При изготовлении образцов панелей со складчатым заполнителем необходимо принять меры, позволяющие снизить влияние отклонений в технологических параметрах формования заполнителя, склейки панели, погрешностей, вносимых технологической оснасткой, и отклонений размеров от номинальных геометрических параметров заполнителя. С целью минимизации влияния данных факторов при изготовлении образцов для проведенных исследований использовались приспособления, позволяющие контролировать геометрию заполнителя; разработан технологический процесс, позволяющий в автоматическом режиме поддерживать необходимую температуру и давление во время полимеризации образцов в автоклаве; отработана схема склейки образцов заполнителя с обшивками.

Рекомендации по проведению испытаний панелей с z-гофром на поперечное сжатие

После обработки анализа экспериментальных результатов были сформулированы следующие рекомендации:

1. Образцы испытывать только со склеенными несущими слоями.

2. Обшивки не должны иметь локальной формы потери устойчивости при поперечной нагрузке на заполнитель (требование к толщине и жесткости несущих слоев).

3. Вырезку образца для испытания из блока заполнителя производить с сохранением ребра по пилообразным линиям по кромке образца.

4. Требования к размерам образцов зависят от геометрических параметров заполнителя и используемого материала.

Общие требования:

- площадь образца должна быть не менее 140 см².

- число граней вдоль пилообразным линиям должно быть не менее 6, число граней по зигзагообразным линиям может

варьироваться в зависимости от геометрии заполнителя и прочностных свойств материала;

- отношение числа граней вдоль зигзагообразных линий к числу граней вдоль пилообразных линий всегда должно быть больше 1.

5. Скорость нагружения образцов: 5-10 мм/мин.

Исследование механических свойств складчатых заполнителей из различных материалов и сравнение их с сотовыми заполнителями

При изготовлении складчатых заполнителей нет существенных ограничений на выбор материала, достаточно, чтобы он мог изгибаться на малый радиус (складываться). Поэтому z-гофр может быть изготовлен из таких материалов, как угле-орган-, стекло-базальтопластиков, арамидных бумаг, металлической фольги, сеток, и даже из гибридных материалов в виде АЛОРов и СИАЛов [3]. Такая технологическая схема обладает большой универсальностью и позволяет на одном и том же оборудовании изготавливать z-гофр из разных материалов,

обеспечивающих заполнителю различную плотность, прочность и жесткость. При разработке технологических схем производства складчатых заполнителей было изготовлено и испытано большое число образцов из различных композитов. По результатам данных исследований проводилось сравнение весовой эффективности использования различных материалов, а также сравнение их прочности со стеклом и полимерсотопластами. На гистограммах рисунков 4 представлено сравнение прочности и жесткости образцов z-гофра из различных материалов и разной плотности при поперечном сжатии, а также их сравнение с характеристиками сотопластов.

Эксперимент показал, что наиболее высокие прочностные характеристики можно получить, используя z-гофр из углепластика. Высокая прочность материала и малый удельный вес позволяют добиться высокой весовой эффективности данных панелей по сравнению с остальными материалами. Прочность при поперечном сжатии z-гофра из углепластика с объемной плотностью около 90 кг/м³ составляет 8,9 МПа.

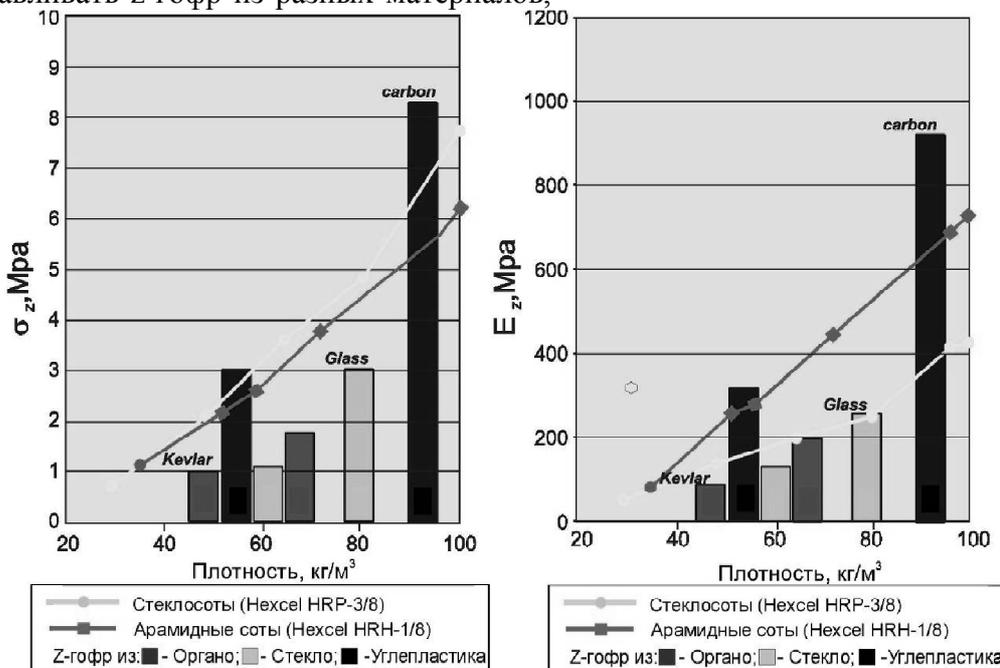


Рис. 4. Сравнительная диаграмма прочностных свойств при поперечном сжатии сотовых заполнителей (линейная диаграмма) и z-гофра из различных материалов (гистограмма)

показали, что для многих материалов критической нагрузкой является нагрузка потери устойчивости граней структуры. В этом случае для повышения прочности заполнителей (из таких материалов, как арамидные бумаги, базальто - и стеклопластики) необходимо повышать устойчивость граней либо за счет увеличения толщины материала, либо за счет уменьшения геометрических размеров элементарной ячейки заполнителя.

Всего было испытано более 200 образцов из различных материалов с различной конфигурацией рельефа. Проведенные исследования показали, что заполнители типа z-гофр обладают широкими возможностями по оптимизации геометрических параметров. Это дает им определенную перспективу применения в авиационных сэндвич панелях.

Изменяя длину ребра по зигзагообразным линиям и угол между гранями по пилообразным линиям, можно оптимизировать прочностные свойства заполнителя при продольном сдвиге в двух направлениях без изменения его плотности, высоты или используемого материала.

Сопоставление результатов испытаний сэндвич панелей с заполнителем типа z-гофр и стеклосотами показывает, что преимущество стеклосот в прочности при поперечном сжатии наблюдается при плотностях заполнителя до 80 кг/м³. При плотностях заполнителя свыше 80 кг/м³ более высокую прочность показывают сэндвич панели с z-гофром.

При сопоставлении прочности панелей с z-гофром из различных

материалов, как и следовало ожидать, наилучшие механические характеристики показал заполнитель из углепластика. Его прочность превосходит прочность сотовых заполнителей во всем диапазоне объемной плотности, как при поперечном сжатии, так и при продольном сдвиге.

Библиографический список

1. Панин, В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем [Текст] / В.Ф. Панин – М.: Машиностроение, 1982.
2. Mudra, C. Alternative sandwich core structures – Efficient investigation of application potential by using finite element modeling [Text] / C. Mudra, D. Hachenberg // In: SAMPE Europe international conference, Paris; 2003. p. 444.
3. Халиулин, В.И. О разработке технологических схем изготовления складчатых конструкций из ПКМ с повышенной прочностью структурных элементов [Текст] / В.И. Халиулин, И.В. Двоглазов, В.В. Батраков // Сборник докладов научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование», Казань, 2003.
4. Ендогур, А.И. Сотовые конструкции [Текст] / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский – М.: Машиностроение, 1986.
5. Heimbs, S. Sandwich structures with folded core: mechanical modeling and impact simulations [Text] / S. Heimbs, S. Kilchert, S. Fischer, M. Klaus, E. Baranger // In: SAMPE Europe international conference, Paris; 2009. p. 324–31.

ON THE DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL METHODS IN RESEARCH OF FOLDED CORE TYPE Z-CRIMP ON THE TRANSVERSE COMPRESSIVE TEST STRENGTH

© 2012 I. V. Dvoeglazov, V. I. Khaliulin

Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev

This article reports the experience in conducting strength tests of folded cores reinforced composite materials. In order to increase the stability of the experimental results are given tips on how to test. Examples of types of fracture fillings such as z-crimp made of different materials are given.

Sandwich panels, Folded core, z-crimp, static tests.

Информация об авторах

Двоглазов Игорь Владимирович, старший научный сотрудник кафедры производства летательных аппаратов, Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ имени А.Н. Туполева. E-mail: pla.kai@mail.ru. Область научных интересов: исследование механических характеристик композиционных материалов, технология изготовления композитных конструкций.

Халиулин Валентин Илдарович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов, Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ имени А.Н. Туполева. Область научных интересов: разработка новых технологических процессов изготовления интегральных и многослойных композитных конструкций.

Dvoeglazov Igor Vladimirovich, Senior Fellow of aircraft production department, Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev. E-mail: pla.kai@mail.ru. Area of research: the study of mechanical properties of composite materials, manufacturing techniques of composite structures.

Khaliulin Valentin Ildarovich, Doctor of Technical Sciences, professor, Head of aircraft production department, Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev. Area of research: development of new manufacturing processes of integrated composite structures and multi-layer composite structures.