

УДК 678.747.2

В.С. Дышенко¹, М.И. Минибаев¹, М.Н. Усачева¹**СОЗДАНИЕ ОТВЕРСТИЙ В ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ
КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ФОРМОВАНИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-93-101

Изготавливали монолитные образцы из углепластика на основе ткани, которые отверждали методом инфузии. Перфорацию выполняли на фрезерном станке с ЧПУ после отверждения и на специальной оснастке до отверждения. Конструктивно-подобные образцы вырезали из плит под углом 4–5 градусов; ориентация отверстий такая же, как и в реальных звукопоглощающих конструкциях. Образцы испытывали на прочность при растяжении по ГОСТ 56785–2015. Образцы, вырезанные из плит, перфорация в которых получена при формовании плиты, при растяжении дают результат на 25% выше, чем образцы, перфорация которых получена при обработке на станке с ЧПУ.

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, инфузия, углепластик, перфорация, полимерные композиционные материалы (ПКМ), обработка ПКМ.

V.S. Dyshenko¹, M.I. Minibaev¹, M.N. Usacheva¹**CREATING HOLES IN SOUND-ABSORBING
STRUCTURES DURING MOLDING**

Monolithic samples are made of carbon fiber based on fabrics that are cured by infusion. Perforation is carried out on a CNC milling machine after confirmation and on special equipment until confirmation. Samples are cut from the plate at an angle of 4–5°, as the orientation of the holes in real sound-absorbing structures. Samples tested for tensile strength according to GOST 56785–2015. Samples cut from plates made by molding give 25% higher results than samples obtained by processing on a CNC machine.

Keywords: sound-absorbing structures, infusion, carbon fiber reinforced plastic, perforation, polymer composite materials (PCM), PCM processing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все большее применение в разных отраслях, особенно в авиа-, ракето- и судостроении. Из ПКМ можно изготавливать пылезащитные устройства вертолетного двигателя [1], сэндвич-конструкции для панелей пола в самолетах и вертолетах [2], различные детали конструкционного назначения с функциональными свойствами [3], конструкции, сочетающие звуко- и радиозащитные свойства [4], а также многие другие ответственные детали. Полимерные композиционные материалы обладают малой плотностью, высокими физико-механическими, электроизоляционными, химическими и антифрикционными свойствами, возможностью гасить вибрации и шумы, поэтому из них (стекло- и углепластиков) изготавливают звукопоглощающие панели (ЗПП) для авиакосмической, строительной и автомобильной промышленности [5].

С каждым годом технологии авиастроения совершенствуются [6–8], и перед разработчиками при проектировании самолетов ставятся приоритетные задачи, первое место среди которых занимает задача безопасности, а затем стоит задача снижения уровня

шума двигателя летательного аппарата. Самолеты, используемые для полетов на дальние расстояния, являются более шумными из-за большей мощности двигателя; самолеты, которые эксплуатируют на ближние расстояния, – менее шумные. Несмотря на то, что последние выпускают в большем количестве, актуальность задачи по уменьшению уровня шума не снижается [9].

Шум авиационных двигателей производится вентиляторами в компрессорах двухконтурных турбореактивных двигателей (ДТРД), реактивной струей и внутренними источниками (в частности, турбиной). Главным источником шума является вентилятор, причем уровень шума в ДТРД ниже, чем в ТРД [10].

Скорость истечения газа оказывает самое большое влияние на уровень шума, поэтому снизить его в пассажирских самолетах позволяет переход от турбодвигателя к двухконтурным двигателям, где шум реактивной струи ниже из-за меньшей скорости. Однако, несмотря на это, у ДТРД главным источником шума является вентилятор.

Существуют основные способы уменьшения шума одноступенчатого вентилятора: отказ от входного направляющего аппарата (ВНА) вентилятора, снижение окружной скорости рабочего колеса, проектирование оптимального соотношения числа лопаток ВНА и рабочего колеса, а также увеличение расстояния между рядами лопаток. Применение турбовентиляторов с высокой частотой вращения хотя и снижает массу двигателя, но ограничивает его частоту вращения до 400–450 м/с. Рассматриваются и другие способы снижения шума, например его уменьшение в процессе распространения из воздухозаборника и выходного устройства. Это предложение включает облицовку стенок проточной части звукопоглощающими конструкциями (ЗПК) [10].

Достичь снижения шума можно тремя способами: применять двигатели с пониженным шумообразованием, использовать совершенную эксплуатацию самолетов и двигателей, рационально устанавливать двигатель на самолете [10].

Снижение шума на самолетах как гражданского, так и военного назначения возможно с помощью ЗПП, имеющих высокую стоимость, но низкую технологичность изготовления. Конструктивно они представляют собой оболочки сложной конструкции: это могут быть однослойные, трехслойные или пятислойные оболочки, которые выполняют в виде кожухов, диафрагм и т. п. Отверстия в панелях служат для различных целей: отверстия диаметром 1,6–2 мм – для поглощения шума, диаметром 6,5 мм – для крепежных элементов и др. Число небольших отверстий в ЗПК может достигать 200 тыс. Звукопоглощающая панель в разрезе представляет собой сэндвич-конструкцию. На предприятиях-изготовителях ЗПП при перфорации отверстий имеются некоторые проблемы [11–13].

В настоящее время представлено множество патентов на изобретения ЗПП. Во ФГУП «ВИАМ» запатентована звукопоглощающая панель для самолетостроения, судостроения и других отраслей. Это многослойная конструкция, где в качестве заполнителя используют легкий гофрированный листовый материал, а обшивки изготавливают из композиционного материала на основе фенольного связующего и тканого наполнителя. Такая панель лучше поглощает звук в широком диапазоне частот и обладает большей технологичностью [14].

В других российских патентах [15, 16] описана технология изготовления панели ЗПК способом намотки на формообразующие вкладыши. При таком способе производства повышается качество изготавливаемых изделий и уменьшается трудоемкость. Используется при производстве изделий для авиадвигателестроения, в частности для турбореактивных двигателей.

Звукопоглощающие панели с сотовым наполнителем, которые гасят звуковые колебания, создающиеся газоздушными потоками и их нагнетателями, могут использоваться не только в авиапромышленности, но и в строительной, транспортной отраслях и радиотехнике [17, 18].

Шумовое загрязнение среды является большой проблемой, так как негативно воздействует на человека, снижая производительность труда и увеличивая риск появления сердечно-сосудистых заболеваний. Полностью ликвидировать источник шума (автомобильные дороги, железнодорожный транспорт, наземное метро и пр.) не представляется возможным, но значительно уменьшить уровень его шума – вполне реально. Во ФГУП «ВИАМ» разработана полимерная композиционная ЗПП, которая применяется для производства шумозащитных экранов, используемых в специальных помещениях, вдоль автомагистралей и на производственных территориях [19].

Звукопоглощающая панель, применяемая в ограждающих конструкциях, представляет собой сэндвич-панель, где металлическая обшивка соединена со звукопоглощающим наполнителем [20] или где верхний лист является перфорированным, средний и нижний – жестким, а между ними расположен звукопоглощающий материал [21]. Такие материалы могут использоваться для облицовки производственных зданий. Известны также патенты шумозащитных ЗПП для строительной отрасли [22, 23].

Звукопоглощающие панели можно изготавливать из пеноматериала, который покрывают композиционным материалом, содержащим углеродные волокна и пропитанным смолой, после чего материал перфорируют. Данный метод позволяет сократить время, затраченное на производство ЗПП [24].

Пример использования ЗПК в мотогондоле двигателя самолета показан на рис. 1. Применение таких конструкций не вносит никаких изменений в работу двигателя [10].

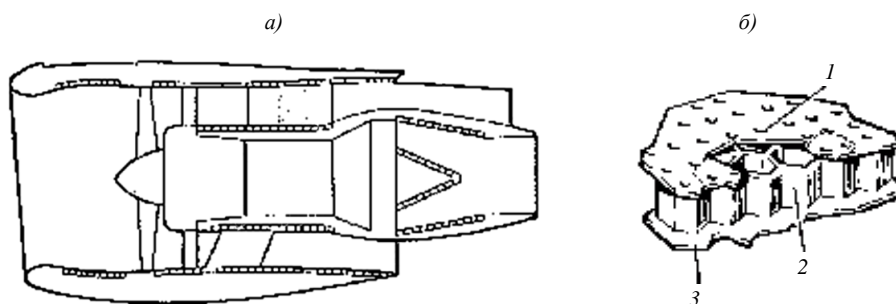


Рис. 1. Акустически обработанная мотогондола двигателя пассажирского самолета со звукопоглощающей панелью (а) и ее многослойная звукопоглощающая конструкция (б):

1 – перфорированная обечайка; 2 – сотовый наполнитель; 3 – опорная поверхность [25]

Гондола двигателя состоит из воздухозаборника (обогреваемой обечайки с воздушно-тепловой противообледенительной системой и шумопоглощающими панелями), левого и правого капотов вентилятора, левой и правой частей реверсивного устройства и сопла смешения. Только обогреваемая обечайка воздухозаборника выполнена из металла, а все остальные части мотогондолы – композитные с прокладкой из металлизированной сетки (молние- и радиозащита) (рис. 2) [26].

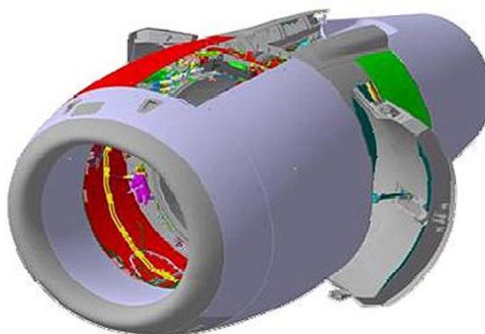


Рис. 2. Модель мотогондолы двигателя [27]

Звукопоглощающая панель у гондолы может содержать с внешней стороны одну ячеистую сердцевину с покрытием, не пропускающую воздух, а с внутренней стороны покрытие перфорировано. Таким образом достигают увеличения эффективности поглощения звуков [28]. Для гондолы турбодвигателя используются также сотовые конструкции, которые просты в производстве и эффективно снижают шум [29]. Известен патент [30], где описана ЗПП, оснащенная крепежными элементами, встроенными в наружную обшивку, что позволяет поворачивать крепежный элемент относительно оси вращения. Это способствует сохранению свойств звукопоглощения при упрощении крепления панели.

Противообледенительная система с отбором горячего воздуха от третьей ступени компрессора высокого давления двигателя встроена в конструкцию воздухозаборника. Звукопоглощающую канальную панель выполняют в виде двух обшивок, между которыми клеивают сотовый наполнитель. Со стороны проточной части обшивку перфорируют (рис. 3) [31].

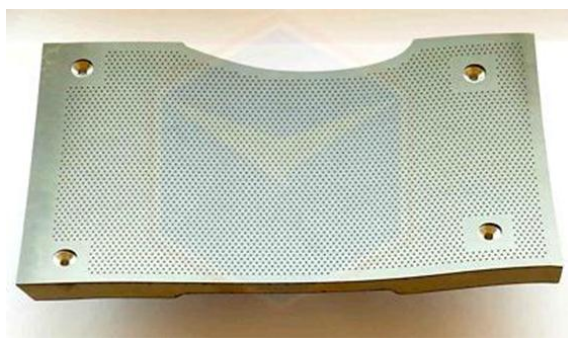


Рис. 3. Панель мотогондолы звукопоглощающей конструкции [34]

Для современных самолетов существуют разные типы и формы воздухозаборников с различным их расположением, так как благодаря этим конструкциям должны максимально эффективно использоваться кинетическая энергия набегающего потока и создаваться наименьшее лобовое сопротивление. Форма внутреннего канала воздухозаборника должна обеспечивать наименьшие потери энергии на трение и в то же время отвечать условиям лучшей аэродинамики летательного аппарата [32].

Звукопоглощающие панели изготавливают и для эжекторного сопла. Такая панель содержит внешнюю обшивку со звукопоглощающей перфорацией, внутреннюю обшивку и ячеистую середину, расположенную между наружной и внутренней обшивками. Внутренняя часть конструкции состоит из композиционного материала. Звукопоглощающая панель обладает повышенной прочностью [33].

Целью работы является получение перфорированных отверстий в ЗПК при формовании и исследование подготовленных образцов на растяжение.

Работа выполнена в рамках реализации стратегического научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексная проблема 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Материалы и методы

Объектами исследования являлись монолитные плиты (по 1 шт. каждой) из углепластика на основе ткани:

- с саржевым плетением (плита 1);
- с саржевым плетением с последующей перфорацией, выполненной на фрезерном станке с ЧПУ (плита 2);
- с саржевым плетением с последующей перфорацией, выполненной на специальной оснастке (плита 3).

Плиты из углепластика изготавливали методом инфузии. Перфорацию отвержденной плиты производили на фрезерном станке Datron M8 (плита 2) или до отверждения на специальной оснастке (плита 3). Для сравнения одну плиту не перфорировали (плита 1).

Для изготовления монолитных плит собирали пакет-заготовку (схема сборки показана на рис. 4), состоящую из полиэтиленового рукава (внешнего) и трубки подачи связующего, расположенной на распределительной сетке, которая находится поверх жертвенной разделительной ткани, необходимой для удаления распределительной сетки с поверхности готового изделия после пропитки. Жертвенную ткань укладывали непосредственно на пакет наполнителя из углеродной ткани. Углеродную преформу собирали в пакет из шести слоев ткани. На оснастку предварительно надевали внутренний рукав из полиэтилена, который при герметичном соединении с внешним полиэтиленовым рукавом посредством спайки нагревательным элементом или склеиванием герметизирующим жгутом обеспечивал герметичность пакета-заготовки.

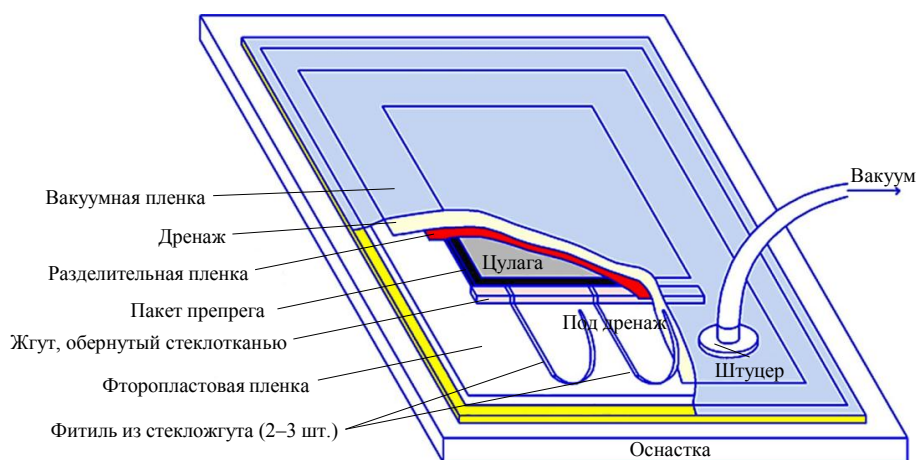


Рис. 4. Схема сборки пакета-заготовки для изготовления монолитных плит из углепластика

Для изготовления перфорированных плит из углепластика производили специальную оснастку.

Специальная оснастка (рис. 5) состоит из поливинилхлоридного основания с цилиндрическими отверстиями, в которые вставлены цилиндрические штифты. Сверху находится верхняя крышка из оргстекла с несквозными отверстиями.



Рис. 5. Специальная оснастка для перфорирования углепластика:
а – вид сбоку; б – вид сверху

В основании, где выполнена перфорация, существует система специальных каналов для распределения связующего и точек его подачи, куда вставлялись с натягом

штифты, имеющие ограничительную шляпку, цилиндрическую часть и коническую вершину.

Сухую ткань надевали на формообразующие штифты. Конические вершины предназначены для сдвига основных и уточных нитей и уменьшения количества порванных волокон в процессе сборки пакета. Каждый слой ткани надевался на штифты отдельно с последующей подформовкой. Сухой пакет ткани должен быть расположен не выше цилиндрической части штифта (рис. 6).

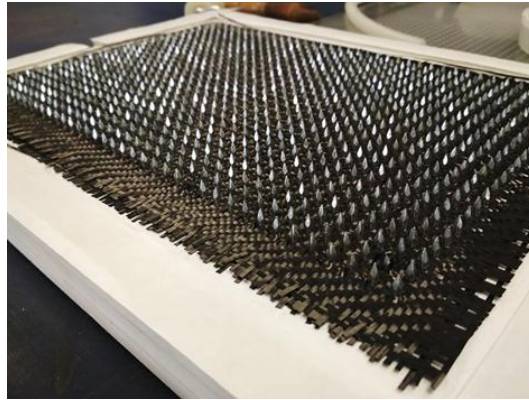


Рис. 6. Сборка сухого пакета на специальной оснастке

Далее сверху устанавливали верхнюю крышку из оргстекла, которая по коническим вершинам, как по направляющим в прессе, насаживалась на штифты, а потом устанавливали фитинги – точки подачи связующего и точки подачи вакуума. Весь пакет герметизировали по периметру жгутом и затем производили предварительное вакуумирование всего пакета. После выдержки пакета под вакуумом начинался процесс пропитки связующим (инфузия).

Изготовили три типа плит:

- исходный материал (плита 1);
- с перфорацией, выполненной на фрезерном станке (плита 2);
- с перфорацией при формовании плит (плита 3).

Плиты отверждали и на фрезерном станке с ЧПУ вырезали образцы для испытаний на растяжение – по 5 шт. из каждой плиты длиной $250 \pm 0,1$ мм и шириной $25 \pm 0,1$ мм. Конструктивно-подобные образцы вырезали из плит под углом 4–5 градусов; ориентация отверстий такая же, как и в реальных ЗПК (рис. 7). Такой прием используется для предотвращения перерезания волокон вдоль оси в зоне каждого отверстия – концентратора напряжения.

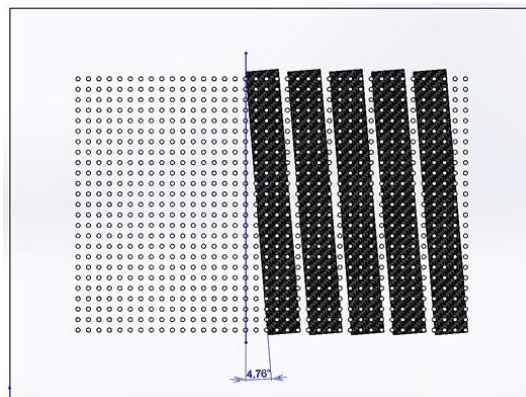


Рис. 7. Схема раскроя образцов из плиты

Очень важным моментом для изготовления перфорации в углепластике и при контурной обработке на фрезерном станке с ЧПУ является подбор режимов резки. Разработанные режимы резки отверстий специальными фрезами в заготовках из композиционного углепластика позволяют обеспечить высокую производительность обработки при жестких ограничениях по точности размеров, форме и качеству поверхностного слоя.

Углепластики состоят из двух компонентов: матрицы – полимерного связующего на основе эпоксидных и фенолформальдегидных смол и волокнистого наполнителя в виде ткани. На начальном этапе обработки на матрицу приходится основная силовая нагрузка при резке инструментом. После вывода инструмента из зоны обработки нарушается геометрическая форма обработанного отверстия как в осевом, так и в поперечном направлениях, и материал имеет существенные упругие деформации. Армирующие волокна также вносят дополнительную погрешность и оказывают большое влияние на стойкость режущего инструмента в процессе резки.

В наибольшей степени высокие функциональные свойства композиционных углепластиков проявляются после рациональной обработки отверстий с учетом физико-химических особенностей обрабатываемого материала, режущего инструмента и условий обработки на конкретной операции.

Результаты и обсуждение

Все образцы проходили испытание на прочность при растяжении по ГОСТ 56785–2015 на машине для механических испытаний LFM-250 при температуре 24,5 °С и влажности 41,1%.

Результаты испытаний образцов из углепластика, изготовленных из трех типов плит, и характер разрушений представлены на рис. 8 и в таблице.

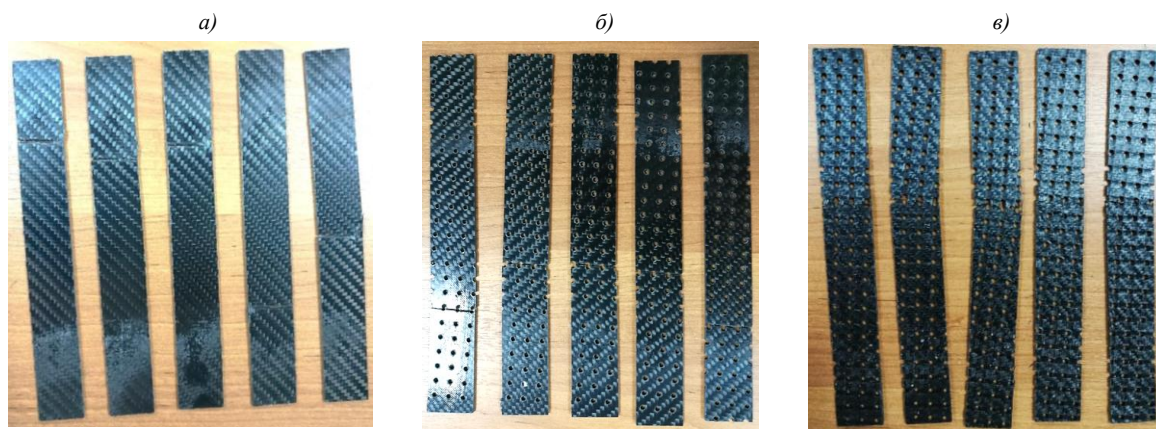


Рис. 8. Разрушение монолитных образцов (плита 1 – а); с перфорацией, выполненной на станке с ЧПУ (плита 2 – б) и с перфорацией, выполненной при формовании плит (плита 3 – в)

Полученные результаты показывают, что сохранение прочности при растяжении у образцов из углепластика с перфорацией, выполненной на фрезерном станке, составляет 46,6%, а у образцов с перфорацией, выполненной при формовании плит углепластика, 62,9%. Это связано с тем, что при перфорации на фрезерном станке происходят повреждение углеродных волокон и «зарождение» концентраторов напряжения в образцах углепластика, что влечет за собой снижение их прочности. При перфорации образцов из углепластика при формовании происходит искривление углеродных волокон, что, естественно, приводит к снижению прочности по сравнению с исходными значениями, но снижение не такое значительное, как при перфорации, выполненной на фрезерном станке.

**Прочность при растяжении образцов из углепластика,
изготовленных из трех типов плит**

| Тип плиты | Условный номер образца | Нагрузка, Н | Среднее значение нагрузки, Н | Предел прочности, МПа | Модуль упругости, ГПа | Относительное удлинение, % | Потеря прочности, % |
|-----------|------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------------|
| 1 | 1-1 | 38590 | 36072 | 710 | 72 | 0,60 | – |
| 1 | 1-2 | 36070 | | 650 | 66 | 0,60 | |
| 1 | 1-3 | 33120 | | 600 | 65 | 0,75 | |
| 1 | 1-4 | 36420 | | 670 | 66 | 0,90 | |
| 1 | 1-5 | 36160 | | 660 | 65 | 0,90 | |
| 2 | 2-1 | 18030 | 16800 | 275 | 48 | 0,65 | 53,4 |
| 2 | 2-2 | 18180 | | 275 | 43 | 0,70 | |
| 2 | 2-3 | 16950 | | 255 | 42 | 0,65 | |
| 2 | 2-4 | 16760 | | 255 | 42 | 0,65 | |
| 2 | 2-5 | 14080 | | 220 | 43 | 0,55 | |
| 3 | 3-1 | 19900 | 22684 | 300 | 55 | 0,60 | 37,1 |
| 3 | 3-2 | 19850 | | 300 | 55 | 0,60 | |
| 3 | 3-3 | 22870 | | 350 | 53 | 0,75 | |
| 3 | 3-4 | 25420 | | 385 | 51 | 0,90 | |
| 3 | 3-5 | 25380 | | 385 | 52 | 0,90 | |

Фрактографический анализ свидетельствует, что в зависимости от способа изготовления отверстий меняется характер разрушения образцов:

– в образцах 1-1–1-5 – разрушение хрупкое, происходит в плоскости поперечного сечения без расслаивания;

– в образцах 2-1–2-5 – разрушение хрупкое, происходит в плоскости поперечного сечения без расслаивания;

– в образцах 3-1–3-5 – разрушение хрупкое с фрагментацией на уровне волокон.

Заключения

Образцы, вырезанные из плит, перфорация в которых получена при формовании плиты, при растяжении дают результат на 25% выше, чем образцы, перфорация которых получена при обработке на станке с ЧПУ. Такой способ изготовления реальных панелей для ЗПК увеличивает прочность обшивки и снижает трудоемкость ее изготовления.

Библиографический список

1. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
2. Шершак П.В., Косарев В.А., Рябовол Д.Ю. Гибридные обшивки в сэндвич-конструкциях панелей пола летательных аппаратов // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 35–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41.
3. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
4. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 60–67. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-60-67.
5. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Петрова А.П. Полимерный звукопоглощающий материал-конструкция для снижения шума на местности авиационных двигателей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №2 (62). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-6-6.
6. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
7. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. №5–6. С. 40–44.

8. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
9. Дударев А.С. Анализ технологичности конструкций заполнителя звукопоглощающих панелей авиационных двигателей // Вестник СПГУ. 2013. №3 (72). С. 68–73.
10. Кириакиди С.К., Самохвалов В.В. Конструкция воздухозаборника самолетов: учеб. пособие. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 101 с.
11. Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К. и др. Проектирование самолетов: учебник для вузов / под ред. С.М. Егера. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 616 с.
12. Глаголев А.Н., Гольдинов М.Я., Григоренко С.М. Конструкция самолетов: учебник для авиационных техникумов. М.: Машиностроение, 1975. 479 с.
13. Сидоров Д.Е. Моделирование формообразования отверстий при сверлении полимерных композиционных материалов // Вестник современных технологий. 2018. №4 (12). С. 69–75.
14. Звукопоглощающая панель: пат. 2307216 Рос. Федерация. №2005140791/03; заявл. 27.12.05; опубл. 27.09.07.
15. Способ изготовления панели звукопоглощающего устройства: пат. 2382698 Рос. Федерация. №2008134771/03; заявл. 25.08.08; опубл. 27.02.10.
16. Способ изготовления панели звукопоглощающего устройства: пат. 2384721 Рос. Федерация. №2008141667/06; заявл. 20.10.08; опубл. 20.03.10.
17. Звукопоглощающая сотовая панель: пат. 2686915 Рос. Федерация. №2017146121; заявл. 26.12.17; опубл. 06.05.19.
18. Звукопоглощающая сотовая панель: пат. 179829 Рос. Федерация. №2017115461; заявл. 09.02.16; опубл. 25.05.18.
19. Шульдешов Е.М., Краев И.Д., Платонов М.М. Полимерная композиционная звукопоглощающая панель // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №5 (53). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-7-7.
20. Звукопоглощающая панель: пат. 162637 Рос. Федерация. №2015153670/03; заявл. 14.12.15; опубл. 20.06.16.
21. Звукопоглощающая акустическая панель: пат. 162968 Рос. Федерация. №2015149996/03; заявл. 20.11.15; опубл. 10.07.16.
22. Шумозащитная звукопоглощающая панель: пат. 2542788 Рос. Федерация. №2013116704/03; заявл. 12.04.13; опубл. 20.10.14.
23. Применение пористых нетканых холстов в звукопоглощающих панелях: пат. 2560735 Рос. Федерация. №2012126805/03; заявл. 27.01.15; опубл. 20.08.15.
24. Способ изготовления звукопоглощающей панели, в частности, для использования в авиации: пат. 2519382 Рос. Федерация. №2011129699/05; заявл. 27.01.13; опубл. 10.06.14.
25. Проектирование мотоустановки среднемагистрального пассажирского самолета // Мир авиации. URL: <http://www.aviationsweb.ru/study-59-3.html> (дата обращения: 26.03.2020).
26. Зоншайн С.И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1966. 364 с.
27. РУДы и реверс // Sukhoi Superjet 100: Реальность против домыслов. URL: <http://superjet.wikidot.com/wiki:rud> (дата обращения: 12.02.2020).
28. Способ изготовления звукопоглощающей панели, в частности, для гондолы авиадвигателя: пат. 2450367 Рос. Федерация. №2009135690/28; заявл. 06.02.08; опубл. 10.04.11.
29. Сотовая конструкция для звукопоглощающей панели: пат. 2477223 Рос. Федерация. №2010119056/05; заявл. 27.11.11; опубл. 10.03.13.
30. Звукопоглощающая панель гондолы турбореактивного двигателя, оснащенная встроенными крепежными элементами: пат. 2579785 Рос. Федерация. №2013107955/06; заявл. 07.07.11; опубл. 10.04.16.
31. Максимов И.А., Секистов В.А. Двигатели самолетов и вертолетов: основы устройства и летной эксплуатации. М.: Воениздат, 1977. 343 с.
32. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. 408 с.
33. Звукопоглощающая панель для эжекторного сопла: пат. 2526215 Рос. Федерация. №2011100140/28; заявл. 27.07.12; опубл. 20.08.14.
34. ОНПП «Технология» улучшили звукопоглощающие панели для авиационных двигателей. URL: https://plastinfo.ru/information/news/36950_07.03.2018/?top=7 (дата обращения: 14.02.2020).