

УДК 628.517.699.844

В.А. Сагомонова¹, С.С. Долгополов¹, В.В. Целикин¹, А.Е. Сорокин¹

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩЕГО СЛОЯ НА СВОЙСТВА
КОМПОЗИТНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ
ЗВУКОТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-87-95

Приведены результаты исследования влияния наличия интегрированного вибропоглощающего слоя на физические и вибропоглощающие свойства экспериментальных образцов композитных звуко теплоизолирующих сэндвич-панелей различного состава и структуры. Установлены факторы, влияющие на уровень свойств изготовленных экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем. Проведен анализ влияния состава и структуры экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем на ее характеристики.

Ключевые слова: сэндвич-панель, полимерный композиционный материал, обшивка, стеклопластик, препрег, сотовый наполнитель, сердечник, стеклосотопласт, интегрированный вибропоглощающий слой, коэффициент механических потерь, звукоизоляция, звукопоглощение, поверхностная плотность, теплопроводность, прессование, галтелирование.

V.A. Sagomonova¹, S.S. Dolgoplov¹, V.V. Tselikin¹, A.E. Sorokin¹

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AN INTEGRATED
VIBRATION-ABSORBING LAYER ON THE PROPERTIES
OF COMPOSITE THREE-LAYER SOUNDPROOFING SANDWICH PANELS**

Presents the results of a study of the influence of the presence of an integrated vibration absorbing layer on the physical and vibration damping properties of the experimental samples of composite heat- and soundproofing panels of various compositions and structures. The factors affecting the level of properties of the manufactured experimental samples of composite heat- and soundproofing panels are established. The influence of the composition and structure of experimental samples of composite heat- and soundproofing panel on its characteristics is analyzed.

Keywords: sandwich panel, polymer composite material, sheathing, fiberglass, prepreg, honeycomb, core, fiberglass reinforced plastic, integrated vibration-absorbing layer, mechanical loss coefficient, sound insulation, sound absorption, surface density, thermal conductivity, pressing, filleting.

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 современные авиа-, машиностроение и другие отрасли промышленности немислимы без композиционных материалов [1–6]. Например, трехслойные сотовые конструкции находят широкое применение в авиастроении для изготовления панелей интерьера, пола, лопастей вертолетов, а также при производстве космической техники и в строительстве [7–10].

Трехслойная конструкция включает два несущих слоя из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и расположенный между ними легкий наполнитель, как правило сотовый. Главная особенность трехслойной конструкции с наполнителем состоит в том, что в результате разнесения несущих слоев на некоторое расстояние друг от друга достигается большее отношение жесткости конструкции к ее массе [11].

Основными причинами использования ПКМ в конструкции панелей пола самолета также является снижение массы при обеспечении прочностных и эксплуатационных показателей [10]. При этом панели пола являются одним из основных путей передачи шума и вибрации в салон самолета. Из-за того что они имеют структуру, обладающую высокой жесткостью и небольшой массой, их колебания попадают в резонанс с низкочастотными колебаниями, генерируемыми воздушным шумом. По аналогичной причине колебания обшивки фюзеляжа в результате структурного шума могут вызывать вибрацию панелей интерьера.

Одним из эффективных способов снижения вибрации изделий из ПКМ является нанесение на их поверхность полимерных вибропоглощающих покрытий, что приводит к повышению коэффициента механических потерь конструкции из ПКМ и снижению амплитуды колебаний, особенно в области низких частот [12]. Однако это негативным образом сказывается на массовых характеристиках составной конструкции и связано с дополнительными расходами и операциями по нанесению вибропоглощающих материалов. Кроме того, в большинстве случаев изделия из ПКМ имеют поверхность сложной конфигурации, что затрудняет нанесение на нее вибропоглощающих покрытий.

Альтернативным решением данной проблемы является внедрение вибропоглощающих слоев в структуру ПКМ на стадии формования [13, 14]. Актуальность данного направления подтверждается тем, что исследования, посвященные этой теме, осуществляются ведущими производителями ПКМ: Toray Industries, Cytec, Toho Tenax, Du Pont-Toray Co Ltd, 3M Innovative Properties Company, Teijin, SMAC [15–23].

Целью данной работы является исследование свойств изготовленных экспериментальных образцов композитных звукоизолярующих сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем.

Материалы и методы

Объектом исследования выступали экспериментальные образцы композитной звукоизолярующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем. Возможны три варианта ее состава:

– вариант А – классическая трехслойная конструкция, включающая два слоя обшивки из стеклопластика и расположенный между ними сотовый наполнитель из стеклосотопласта;

– вариант Б – трехслойная конструкция, включающая два слоя обшивки из стеклопластика, один из которых содержит интегрированную вибропоглощающую прослойку, и расположенный между ними сотовый наполнитель из стеклосотопласта;

– вариант В – трехслойная конструкция, включающая два слоя обшивки из стеклопластика, расположенный между ними сотовый наполнитель из стеклосотопласта и вибропоглощающий слой, находящийся между «сердечником» и одной из обшивок.

В качестве материала для изготовления обшивок сэндвич-панели выбрали препрег на основе конструкционной стеклоткани Т-10-14 и эпоксикаучукового связующего. «Сердечник» трехслойной конструкции выполнен из полимерных сот – стеклосотопласта высотой 2 см, а вибропоглощающий слой – из пленки на основе термопластичного полиуретана толщиной 0,4 мм. Для соединения сотового

заполнителя с обшивками в качестве вспомогательного материала использовали пленочный клей марки ВК-51.

Изготовление экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем осуществлялось путем ступенчатого процесса, при помощи прямого контактного горячего прессования и галтелирования при определенных технологических параметрах и включало две стадии: предварительную стадию получения обшивок и последующую – непосредственного формования трехслойной панели.

В исследование свойств экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем входили следующие испытания: определение их поверхностной плотности, звукоизоляции, звукопоглощения, теплопроводности, а также коэффициента механических потерь вибропоглощающего слоя и обшивок.

Поверхностную плотность определяли по ГОСТ 17073–71, исследование звукоизоляции и звукопоглощения проводили по СТО 1-595-19-384–2007 и СТО 595-19-383–2007 соответственно, теплопроводности – по ГОСТ 7076–99, коэффициента механических потерь – методом динамического механического анализа в условиях сдвигового нагружения при температуре от -60 до +80 °С и частоте 100 Гц, в соответствии с СТО 1-595-36-464–2015.

Результаты и обсуждение

В ходе работы изготовили экспериментальные образцы композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем трех вариантов состава. Внешний вид образцов показан на рис. 1.

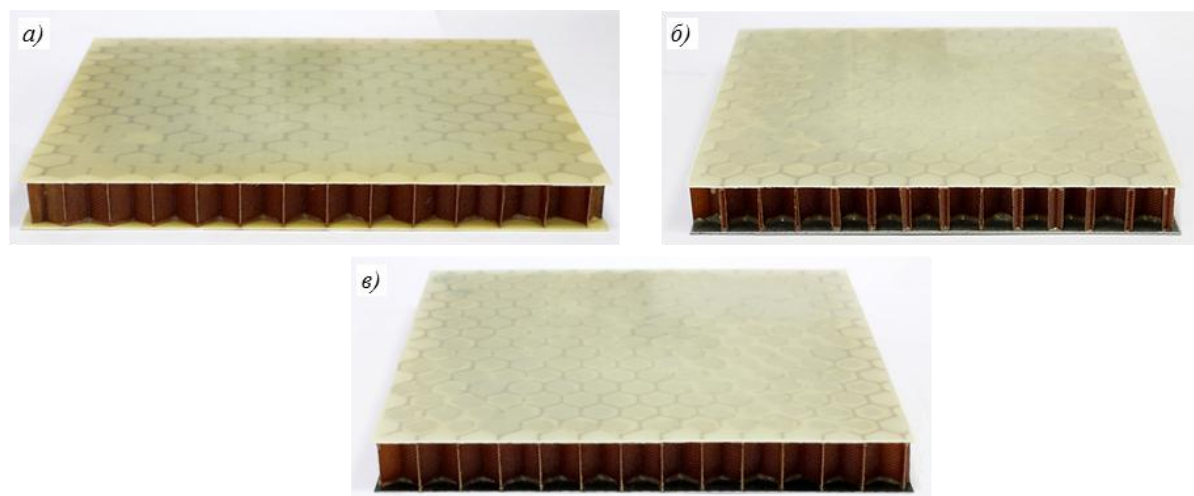


Рис. 1. Экспериментальные образцы композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели: *a* – образец, не содержащий вибропоглощающего слоя; *б* – образец с вибропоглощающим слоем, интегрированным во внутреннюю структуру одной из обшивок; *в* – образец с вибропоглощающим слоем, расположенным между «сердечником» и одной из обшивок

Для определения влияния наличия интегрированного вибропоглощающего слоя на характеристики экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели исследованы следующие их свойства: поверхностная плотность (масса 1 м^2), звукоизоляция, звукопоглощение, теплопроводность и коэффициент механических потерь вибропоглощающего слоя и обшивок.

Поверхностная плотность (масса 1 м ²) экспериментальных образцов, г/м ² :	
Вариант А: обшивка + стеклосотопласт + обшивка	3750
Вариант Б: обшивка + стеклосотопласт + обшивка с внутренним вибропоглощающим слоем	4400
Вариант В: обшивка + стеклосотопласт + вибропоглощающий слой + обшивка	4140

Как видно из представленных данных, наибольшими значениями массы 1 м² обладают экспериментальные образцы сэндвич-панели, имеющие одну из обшивок с интегрированным вибропоглощающим слоем (вариант состава Б). Это объясняется использованием дополнительного монослоя препрега в составе упомянутой обшивки для предотвращения снижения ее прочностных свойств из-за наличия вибропоглощающей прослойки.

Следует также отметить, что внедрение вибропоглощающего слоя привело к увеличению массы экспериментальных образцов вариантов состава Б и В в среднем на 17 и 10% соответственно относительно классической сэндвич-панели варианта А.

Исследование величины звукоизоляции экспериментальных образцов сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем в диапазоне частот 500–1600 Гц, графически представленное на рис. 2, показало, что звукоизоляция начинает возрастать в области средних частот (200–400 Гц) и в дальнейшем увеличивается при повышении частоты испытаний, причем эта зависимость сохраняется независимо от ориентации образцов к источнику звука. При этом следует отметить, что частотная зависимость звукоизоляции экспериментального образца классической трехслойной сэндвич-панели, не содержащей интегрированного вибропоглощающего слоя, находится на уровне ~55–56 дБ во всем исследованном диапазоне частот.

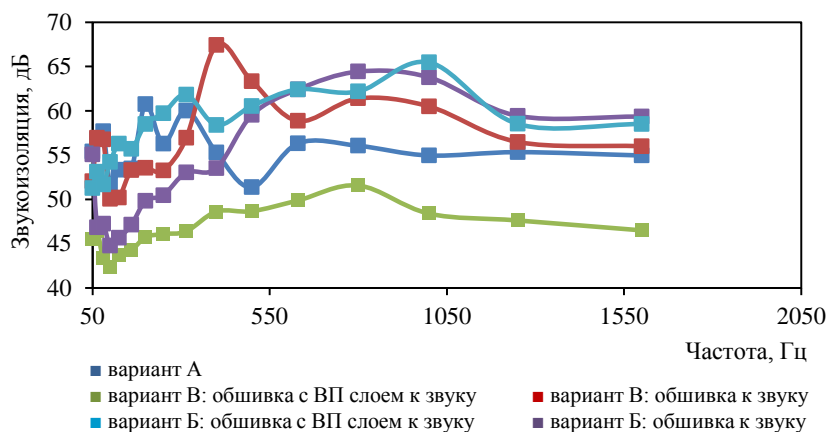


Рис. 2. Звукоизоляция экспериментальных образцов композитной звукотеплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим (ВП) слоем в диапазоне частот от 50 до 1600 Гц

За исключением небольшого участка в области низких частот, наибольшие значения звукоизоляции имеют экспериментальные образцы сэндвич-панели с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, расположенной этой стороной к источнику звука. Наименьшей звукоизоляцией обладают образцы варианта состава В, обращенные к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем, и образцы сэндвич-панели, не содержащей

вибропоглощающего слоя. Промежуточное положение занимают образцы сэндвич-панели с вибропоглощающим слоем, расположенным между стеклосотопластом и одной из обшивок, обращенные к источнику звука противоположной от вибропоглощающей прослойки стороной.

Таким образом, можно предположить, что вибропоглощающий слой, не интегрированный в структуру обшивки, незначительно снижает звукоизоляцию сэндвич-панели, что необходимо учитывать при ориентировании ее относительно источника звука.

Как видно из представленных на рис. 3 данных, при повышении частоты испытаний звукоизоляция всех исследованных экспериментальных образцов композитных звукотеплоизолирующих сэндвич-панелей обладает более высокими показателями по сравнению с областями низких и средних частот. При этом все частотные зависимости также имеют аналогичный характер – минимум в области частот ~1600 Гц и пик в области частот 2000–3000 Гц. Как и в предыдущем случае, минимальные значения звукоизоляции соответствуют образцам сэндвич-панели варианта состава В, обращенным к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем, а максимальные – образцам с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, практически независимо от расположения относительно источника звука.

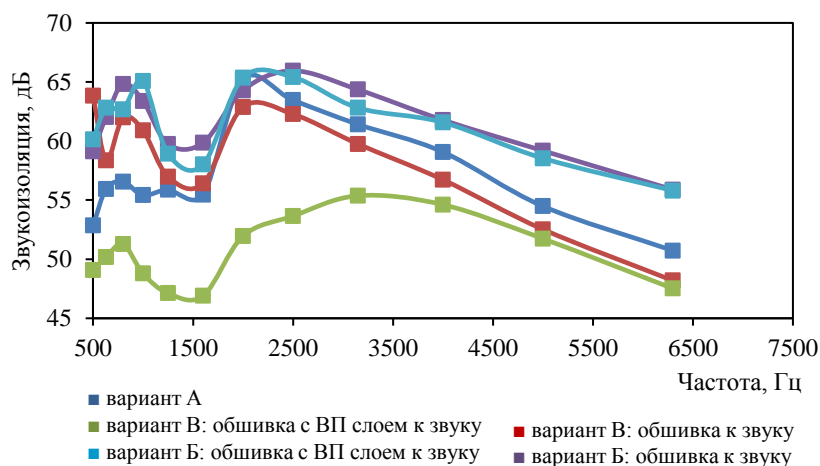


Рис. 3. Звукоизоляция экспериментальных образцов композитной звукотеплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим (ВП) слоем в диапазоне частот от 500 до 6300 Гц

Существенное отличие представленных данных от результатов исследования в области низких и средних частот заключается в том, что образцы сэндвич-панели, не содержащие вибропоглощающего слоя, по величине звукоизоляции выше частоты 1600 Гц превосходят образцы с вибропоглощающим слоем, расположенным между стеклосотопластом и обшивкой, независимо от ориентации последних относительно источника звука.

Однако вышеупомянутые образцы варианта состава В, обращенные к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем, в области низких и средних частот имеют наибольшие значения коэффициента звукопоглощения (рис. 4). Незначительно уступают им образцы сэндвич-панели с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, также обращенные при испытании к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем. Наименьшие значения указанной характеристики имеют образцы вариантов состава Б и В, расположенные к источнику

звука стороной, не содержащей вибропоглощающего слоя. Промежуточное положение занимают образцы сэндвич-панели варианта состава А, не содержащие вибропоглощающий слой.

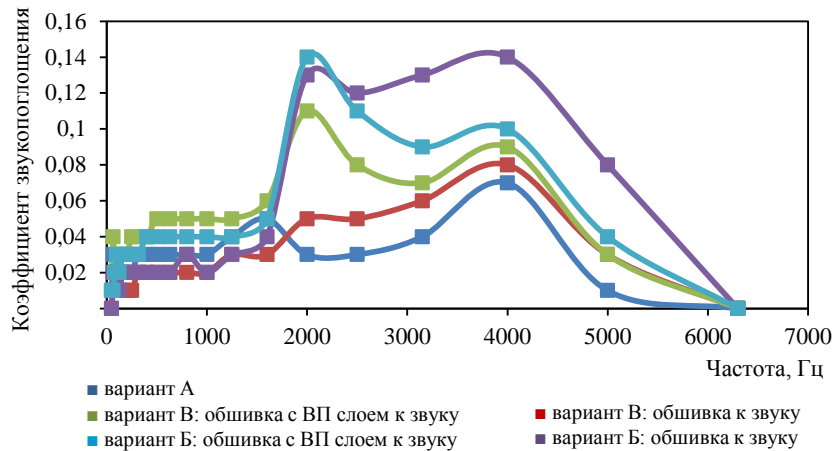


Рис. 4. Коэффициент звукопоглощения экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим (ВП) слоем

В области частот более 1600 Гц зависимость приобретает иной характер – аналогично результатам исследования звукоизоляции максимальные значения коэффициента звукопоглощения имеют образцы с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, расположенные к источнику звука противоположной стороной. Уступают им образцы варианта состава В, причем также большие значения имеют образцы, расположенные к источнику звука стороной без вибропоглощающего слоя. Минимальные значения коэффициента звукопоглощения имеют экспериментальные образцы сэндвич-панели традиционного состава, которые не содержат вибропоглощающего слоя. При высоких частотах у всех исследованных экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем наблюдаются два максимума звукопоглощения – при частотах 2000 и 4000 Гц и на участке его снижения – в области 2000–3000 Гц.

Следует отметить, что в целом все экспериментальные образцы композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели различных вариантов состава имеют довольно низкие значения коэффициента звукопоглощения (0,01–0,14) и, соответственно, не могут быть рекомендованы для работы в качестве звукопоглощающих материалов.

Из представленных в табл. 1 данных следует, что с увеличением температуры испытаний теплопроводность всех исследованных экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели возрастает. При этом данный показатель практически не зависит от состава и структуры образцов (наличие вибропоглощающего слоя и его расположение). Вероятно, это происходит вследствие того, что вибропоглощающая прослойка внедряется во внутреннюю структуру и имеет слишком малую толщину, чтобы оказывать влияние на теплопроводность всей сэндвич-конструкции.

Следует также отметить, что по величине теплопроводности экспериментальные образцы композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели уступают материалам теплоизоляционного назначения, как правило имеющим $\lambda=0,030-0,050$ Вт/(м·К) в указанном диапазоне температур.

Таблица 1

**Теплопроводность λ экспериментальных образцов
композитной звукотеплоизолирующей сэндвич-панели
с интегрированным вибропоглощающим слоем в диапазоне температур**

Состав экспериментальных образцов	Теплопроводность, Вт/(м·К), при средней температуре образца, °С				
	-20	0	+20	+40	+70
Вариант А: обшивка + стеклосотопласт + + обшивка	0,076	0,087	0,098	0,112	0,131
Вариант Б: обшивка + стеклосотопласт + + обшивка с внутренним вибропоглоща- ющим слоем	0,075	0,086	0,097	0,110	0,130
Вариант В: обшивка + стеклосотопласт + + вибропоглощающий слой + обшивка	0,077	0,087	0,099	0,112	0,133

Из результатов исследования демпфирующих свойств, приведенных в табл. 2, следует, что максимальных значений коэффициент механических потерь вибропоглощающего слоя достигает в диапазоне температур от -20 до +20 °С, что соответствует области стеклования термопластичного полиуретана, из которого он выполнен. Кроме того, установлено, что обшивка сэндвич-панели имеет невысокие значения данного показателя, которые практически не зависят от температуры испытаний.

Таблица 2

**Коэффициент механических потерь $tg\delta$ вибропоглощающего слоя и обшивок
экспериментальных образцов композитных звукотеплоизолирующих сэндвич-панелей
с интегрированным вибропоглощающим слоем в диапазоне температур
при частоте 100 Гц**

Вид образцов	Коэффициент механических потерь при температуре, °С							
	-60	-40	-20	0	+20	+40	+60	+80
Вибропоглощающий слой	0,110	0,190	0,290	0,330	0,240	0,170	0,130	0,110
Обшивка	0,046	0,060	0,062	0,071	0,072	0,067	0,070	0,062
Обшивка с внутрен- ним вибропоглощаю- щим слоем	0,046	0,058	0,161	0,230	0,230	0,211	0,209	0,220
Обшивка с вибро- поглощающим слоем	0,059	0,080	0,230	0,260	0,221	0,200	0,200	0,240

Благодаря внедрению вибропоглощающего слоя в структуру обшивки ее демпфирующие свойства возрастают практически во всем исследованном диапазоне температур, при этом максимум вибропоглощения также соответствует диапазону температуры стеклования термопластичного полиуретана, несколько смещенному в область положительных температур.

Нанесение вибропоглощающего слоя на обшивку приводит и к возрастанию коэффициента механических потерь, причем полученные значения превосходят показатели обшивки с интегрированным вибропоглощающим слоем. При этом максимальных значений данный коэффициент также достигает в области температуры стеклования материала-основы вибропоглощающего слоя.

В итоге можно заключить, что вибродемпфирующие свойства элементов сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем определяются составом внедряемой вибропоглощающей прослойки.

Проанализировав результаты исследования рассматриваемого комплекса свойств экспериментальных образцов композитных звуко теплоизолирующих сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем в сравнении с сэндвич-панелями традиционного состава, можно сделать вывод о том, что внедрение вибропоглощающей прослойки в структуру трехслойной панели оказывает положительное влияние на ее звукоизоляцию и демпфирующие свойства ее элементов, однако приводит к возрастанию массы конструкции.

Таким образом, решение о целесообразности применения сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем для изготовления панелей пола или интерьера летательных аппаратов должно приниматься конструкторами в зависимости от того, какое из свойств является приоритетным.

Заключения

Проведены комплексные исследования и анализ влияния состава и структуры (наличие и расположение вибропоглощающего слоя) экспериментальных образцов композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели на ее характеристики.

Установлено, что:

– экспериментальные образцы сэндвич-панели, одна из обшивок которой содержит интегрированный вибропоглощающий слой, имеют большее значение поверхностной плотности по сравнению с сэндвич-панелями, в которых вибропоглощающий слой расположен между «сердечником» из стеклосотопласта и обшивкой, вследствие необходимости использования дополнительного монослоя препрега на стадии формования (4400 и 4140 г/м² соответственно);

– экспериментальные образцы композитных звуко теплоизолирующих сэндвич-панелей имеют высокие показатели звукоизоляции в диапазоне частот от 50 до 6300 Гц, соответствующие показателям материалов аналогичного назначения, однако практически не обладают звукопоглощающими свойствами независимо от состава и структуры;

– наличие внутреннего вибропоглощающего слоя в структуре обшивки композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели приводит к возрастанию ее звукоизоляции, а расположение его между «сердечником» из стеклосотопласта и обшивкой – к снижению указанного показателя, в сравнении с сэндвич-панелью традиционного состава, не содержащей вибропоглощающей прослойки;

– наличие внутреннего вибропоглощающего слоя в структуре композитной звуко теплоизолирующей сэндвич-панели приводит к возрастанию ее коэффициента звукопоглощения в диапазоне частот от 1600 до 6300 Гц в сравнении с сэндвич-панелью традиционного состава, не содержащей вибропоглощающей прослойки;

– теплопроводность экспериментальных образцов композитных звуко теплоизолирующих сэндвич-панелей в интервале температур от -20 до +70 °С составляет $\lambda=0,075-0,133$ Вт/(м·К) и практически не зависит от их состава и структуры;

– коэффициент механических потерь обшивки с интегрированным или нанесенным на нее вибропоглощающим слоем возрастает в сравнении с аналогичными показателями исходной обшивки, при этом положение максимума звукопоглощения указанных составных конструкций на температурной шкале определяется составом внедряемой вибропоглощающей прослойки.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
3. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // Эксперт. 2015. №15 (941). С. 49–53.
4. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
5. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
6. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
7. Молод М.В., Решетникова Е.В., Захаров В.А. Конструктивно-технологические особенности изготовления панелей интерьера пассажирского самолета // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. №11-2. С. 48–50.
8. Минаков В.Т., Постнов В.И., Швец Н.И., Застрогина О.Б., Петухов В.И., Макрушин К.В. Особенности изготовления трехслойных сотовых панелей с полимерным наполнителем горячего отверждения // Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 6–9.
9. Кавун Н.С., Абрамов П.А., Юдин А.А., Барботько С.Л. Исследование свойств трехслойных панелей на модифицированном связующем ФПР-520Г // Авиационные материалы и технологии. 2009. №3. С. 19–23.
10. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. №4 (2). С. 198–212.
11. Тестоедов Н.А., Наговицин В.Н., Пермяков М.Ю. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2016. Т. 17. №1. С. 200–211.
12. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Долгополов С.С. Исследование демпфирующих свойств вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S3. С. 5–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-5-10.
13. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. №3. С. 2–9.
14. Полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем: пат. 2687938 Рос. Федерация; заявл. 07.11.18; опубл. 16.05.19.
15. Fiber-reinforced composite material and molding thereof: pat. 2016210027A JP; filed 30.04.15; publ. 15.12.16.
16. Sandwich panel: pat. 2006002869A JP; filed 18.06.04; publ. 05.01.06.
17. Kishi H., Kuwata M., Matsuda S., Asami T., Murakami A. Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites // Composites Science and Technology. 2004. Vol. 64. No. 16. P. 2517–2523.
18. Vibration-damping fiber-reinforced composite material: pat. 2009078422A JP; filed 26.09.07; publ. 16.04.09.
19. Fotsing E.R., Sola M., Ross A., Ruiz E. Dynamic characterization of viscoelastic materials used in composite structures // Journal of Composite Materials. 2013. Vol. 48. No. 30. P. 3815–3825.
20. Soundproofing trim panel for helicopter type rotorcraft, has core that is melamine self-extinguishing foam in which inserts are arranged, and skins provided with carbon cloth layers respectively: pat. 2939406B1 FR; filed 05.12.08; publ. 12.07.13.
21. Structural composite material with improved acoustic and vibrational damping properties: pat. 20100170746A1 US; filed 06.01.10; publ. 08.07.10.
22. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: pat. 20120164907 US; filed 09.12.11; publ. 28.06.12.
23. Composite article including viscoelastic layer with barrier layer: pat. 2010151186 US; filed 15.12.09; publ. 17.06.10.