

УДК 678

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-5-10

В.А. Сагомонова¹, Ю.В. Сытый¹, В.И. Кислякова¹, С.С. Долгополов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ**

Приведено исследование коэффициента механических потерь демпфирующих материалов ВТП-1В и ВТП-2В – вибропоглощающих покрытий на основе термопластичного полиуретана (ТПУ) и вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, представляющего собой два слоя металла с полимерной прослойкой на основе ТПУ между ними, методом динамического механического анализа (ДМА) в условиях сдвигового нагружения и трехточечного изгиба.

Показано влияние состава на демпфирующие свойства – температуры стеклования исходных полимерных слоев на коэффициент механических потерь. Приведены результаты испытаний вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В на натурных панелях фюзеляжа.

На примере алюмотермоэластопласта проанализированы преимущества и недостатки слоистых вибропоглощающих материалов типа «сэндвич». Показано влияние толщины полимерной прослойки термоэластопласта на коэффициент механических потерь и поверхностную плотность алюмотермоэластопласта.

Ключевые слова: вибрация, вибропоглощение, вибропоглощающие материалы, динамический механический анализ (ДМА), алюмотермоэластопласт, коэффициент механических потерь.

The investigation of mechanical loss factor (tangent delta) of extensional damping materials VTP-1V, VTP-2V, which are vibration-absorbing coatings based on thermoplastic polyurethane (TPU) and vibration damping aluothermoelastoplast consisting of two sheets of metal with a layer of polymer-based TPU between them, by means of dynamic mechanical analysis (DMA) in terms of shear-loaded and three-point bending is provided hereby.

The influence of composition on the damping properties - glass transition temperature of the initial polymer layers on the mechanical loss factor is shown. The results of vibration-absorbing materials VTP-1V and VTP-2V full-scale tests on fuselage panels are given.

Advantages and setbacks of laminated damping materials of the "sandwich" type are analyzed on example of aluothermoelastoplast. The influence of polymer thermoplastic elastomer interlayer thickness on mechanical loss factor and surface density of aluothermoelastoplast is given.

Keywords: vibration, damping, vibration-absorbing materials, dynamic mechanical analysis (DMA), aluothermoelastoplast, mechanical loss factor.

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

Развитие техники неразрывно связано с увеличением вредных шумов и вибраций, ухудшающих акустическую комфортность, а также снижающих надежность работы механизмов.

В авиастроении повышение акустической комфортности в кабине экипажа и пассажирском салоне является одним из факторов, определяющих конкурентоспособность самолетов и вертолетов [1, 2].

Одним из основных источников шума внутри изделий современной авиационной техники является турбулентный пограничный слой, вызывающий колебания поверхности фюзеляжа, передающиеся по элементам конструкции внутрь салона.

Эффективным способом снижения уровня шума и вибрации является применение в конструкциях, испытывающих повышенный уровень виброакустических нагрузок, материалов с высо-

кими демпфирующими свойствами (вибропоглощающих материалов или ВПМ).

Вибропоглощение (демпфирование) – метод снижения вибраций путем усиления в конструкции процессов внутреннего трения, рассеивающих виброэнергию в результате необратимого преобразования ее в теплоту при деформациях, возникающих в материалах, из которых она изготовлена.

Наиболее эффективными вибропоглощающими материалами являются полимерные материалы, обладающие способностью к диссипации внешней акустической энергии, обусловленной особенностями их молекулярного и надмолекулярного строения. Часть энергии внешнего механического поля, затрачиваемой на колебания, полимеры рассеивают в виде тепла вследствие релаксационных явлений, происходящих в них при циклическом нагружении [3–5].

Впервые сообщения о применении вибропоглощающих материалов для снижения шума в салоне самолетов и вертолетах появились в шестидесятых годах прошлого века. Например, на турбовинтовом самолете Конвэр-340 (Convair Corp., США) для снижения вибрации и шума использовался материал, представляющий собой матерчатые полосы, снаружи усиленные фольгой, на которые был нанесен слой клея. До начала 80-х годов данная тенденция сохранялась, причем вибропоглощающие материалы использовались в виде покрытий, наклеиваемых на всю или почти всю площадь панели, колебания которой требовалось уменьшить.

В настоящее время об актуальности данной проблемы свидетельствует большое количество представленной на рынке продукции и охранных документов, принадлежащих таким фирмам, как Boeing, Airbus, McDonnell Douglas Corporation, The Aerospace Corporation, Bayer, DuPont, Cytec Technology Corp., Snecma, Antiphon Inc., MontBlanc Technologies Groupe.

Уровень вибропоглощения полимерных ВПМ характеризуется коэффициентом механических потерь (или тангенсом угла механических потерь – $\text{tg}\delta$), также важными параметрами являются диапазон температур, соответствующих максимальному значению этой характеристики ($T_{\text{tg}\delta_{\text{max}}}$), комплексный динамический модуль упругости и его компоненты. Известно, что коэффициент механических потерь полимеров, определяющий эффективность гашения вибраций, не является константой и в значительной степени зависит от температуры и частоты колебаний. Максимальные потери механической энергии ($\text{tg}\delta_{\text{max}}$) в полимерах проявляются в области перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое, т. е. в области размораживания сегментальной подвижности, положение которой на шкале температур определяется температурой стеклования. При частотах >1 Гц наибольшее вибропоглощение, как правило, наблюдается выше температуры стеклования [6–8].

Для исследования вязкоупругих свойств материалов, в том числе демпфирующих свойств вибропоглощающих материалов на основе полимеров, применяются различные методы: резонансные – например, так называемый метод Оберста, имеющий много общего с ASTM E756-05, или нерезонансные – с использованием обратного крутильного маятника, а также метод динамического механического анализа (ДМА).

Однако чрезвычайно важным моментом является рациональное размещение разработанных ВПМ на вибрирующих поверхностях изделий авиационной техники, что позволит избежать дополнительных массовых затрат и максимально эффективно использовать демпфирующие материалы [9]. В этом аспекте очевидна актуальность проведения исследований вибропоглощающих

материалов на натуральных панелях фюзеляжа самолетов, позволяющих оценить эффективность их работы в условиях, моделирующих реальные.

Целью данной работы является изучение демпфирующих свойств вибропоглощающих материалов, разработанных в ВИАМ, методом ДМА – для дальнейшего выбора условий исследования, наиболее приближенных к условиям работы вибропоглощающего материала на поверхности элементов конструкции самолета, подверженных воздействию вибрации.

Материалы и методы

В настоящее время при исследованиях значительное внимание уделяется разработке вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов ввиду их высокой эластичности, в том числе при отрицательных температурах (до -60°C), и возможности (в отличие от резин) перерабатывать их литьем под давлением и экструзией как обычные термопласты.

Объектами исследования данной работы являются образцы разработанных в ВИАМ листовых вибропоглощающих материалов марок ВТП-1В, ВТП-2В и слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта.

Вибропоглощающий листовый материал ВТП-1В получают методом экструзии расплава композиции на основе термопластичного полиуретана со специальными добавками. Вибропоглощающий материал ВТП-1В рекомендуется для применения в качестве покрытий, эластичных имитаторов силовых элементов фюзеляжа и вибродемпфирующих прокладок, работающих в диапазоне температур от -60 до $+80^\circ\text{C}$ [9].

Слоистый вибропоглощающий листовый материал ВТП-2В состоит из слоя материала ВТП-1В, адгезионного слоя на основе модифицированного поливинилацетата ВПС-2,5 и армирующего слоя из алюминиевой фольги, усиленной стеклосеткой. Вибропоглощающий материал ВТП-2В предназначен для работы в интервале температур от -60 до $+80^\circ\text{C}$ и рекомендуется для применения в качестве покрытий панелей фюзеляжа в местах повышенной виброакустической нагрузки [10].

Вибропоглощающие материалы ВТП-1В и ВТП-2В приклеиваются к вибрирующим поверхностям клеем холодного отверждения ПУ-2 и ВК-27 [11–13].

Вибропоглощающий алюмотермоэластопласт представляет собой конструкцию типа «сэндвич», состоящую из двух наружных листов алюминиевого сплава и внутреннего слоя термоэластопласта и предназначенную для изготовления демпфирующих шайб и прокладок для крепления панелей интерьера и бортовой электронной аппаратуры с целью снижения вибрации и шума в салоне и кабине пассажирских самолетов.

Исследование демпфирующих свойств образцов вибропоглощающих материалов ВТП-1В и

ВТП-2В проводили на динамическом механическом анализаторе DMA/SDTA861 фирмы Mettler Toledo (в статической воздушной среде) в условиях сдвигового нагружения и трехточечного изгиба в диапазоне температур от -60 до $+80^{\circ}\text{C}$ (скорость нагрева $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) и при частоте 300 Гц.

Образцы, исследовавшиеся в условиях сдвигового нагружения, представляли собой диски диаметром 11 мм. Два одинаковых образца симметрично фиксировались между двумя внешними неподвижными частями и центральным подвижным элементом, создающим переменную нагрузку.

Для исследования в условиях трехточечного изгиба использовали образцы размером 10×80 мм, представлявшие собой вибропоглощающие материалы, наклеенные на металлическую подложку из алюминиевого сплава толщиной 1 мм (при исследовании алюмотермоэластопласта использовался непосредственно сам материал). Образец располагался на двух призматических опорах, переменная нагрузка прикладывалась к его середине посредством подвижной призматической опоры.

Акустические испытания вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В (в виде покрытий с поверхностной плотностью $1,7$ кг/м²) проводились на натурной панели фюзеляжа пассажирского самолета Ил-96 в камере АИ-3 в диапазоне частот от 100 до 6300 Гц при 20°C^* .

Результаты

Результаты исследования демпфирующих свойств образцов вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В в условиях сдвигового нагружения показаны на рис. 1, в условиях трехточечного изгиба – на рис. 2.

Приведенные графические зависимости коэффициента механических потерь от температуры для каждого вибропоглощающего материала в различных условиях испытания согласуются между собой по характеру кривых: для ВТП-1В наблюдается один пик ($\text{tg}\delta_{\text{max}}$), лежащий в области отрицательных температур, для ВТП-2В – два пика (в области отрицательных и положительных температур).

Как упоминалось выше, максимальные механические потери в полимерах наблюдаются выше их температуры стеклования, в зоне наиболее сильно развитых релаксационных процессов. Температура стеклования в свою очередь зависит от химического состава полимерного звена – гибкости цепи, стерических эффектов, полярности, наличия пластификаторов и кристаллической фазы, боковых цепей, плотности связей и сополимеризации [7, 14, 15].

В связи с этим очевидно, что возникновение пика в области положительных температур связано с введением в состав вибропоглощающего материала ВТП-2В слоя на основе модифицированного поливинилацетата, который является одним из широко применяемых для демпфирования полимерных материалов. Более подробно эффект возникновения пика при температуре выше 0°C рассмотрен в работе [10].

По результатам исследования также видно, что в условиях сдвигового нагружения при 20°C вибропоглощающий материал ВТП-2В превосходит материал ВТП-1В по величине коэффициента механических потерь почти в 2 раза, в то время как в условиях трехточечного изгиба при данной температуре указанные вибропоглощающие материалы имеют близкие значения $\text{tg}\delta \approx 0,12$.

Исследования, проведенные в акустической камере ЦАГИ, показали, что применение вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В в виде покрытий позволяет повысить звукоизоляцию панели фюзеляжа на $2-9$ дБ в диапазоне частот от 100 до 6300 Гц при комнатной температуре. Результаты испытаний приведены на рис. 3. При этом видно, что при частоте 300 Гц покрытия из вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В имеют одинаковую эффективность звукоизоляции. Следовательно, испытание в условиях трехточечного изгиба наиболее приближено к реальным условиям работы панелей фюзеляжа самолетов.

Существует мнение, что наилучшим решением задачи снижения вибраций и шума металлических покрытий было бы выполнение вибрирующих частей конструкций из вибропоглощающих сплавов без каких-либо дополнительных вибропоглощающих материалов [16]. Однако большинство металлов и сплавов имеют относительно низкие ($\text{tg}\delta \leq 0,01$) или труднопредсказуемые нелинейные вибропоглощающие свойства (сплавы, имеющие специально разработанную кристаллическую структуру) [17].

Одним из решений поставленной задачи является принцип создания «сэндвич-системы», заключающийся во введении вибропоглощающего материала толщиной ~ 1 мм между слоями металла и реализованный при разработке алюмотермоэластопласта [18–23].

К недостаткам подобных слоистых вибропоглощающих материалов исследователи и разработчики ВПМ относят увеличение массы вибрирующей конструкции вследствие наличия второго армирующего металлического слоя и в некоторых случаях неспособность точно повторять форму сложных по конфигурации вибрирующих поверхностей, а следовательно, отсутствие плотного прилегания к ним для обеспечения необходимого эффекта демпфирования [24, 25].

Демпфирующие свойства опытных образцов вибропоглощающего алюмотермоэластопласта

*Испытания проведены А.А. Ткачевым (ФГУП «ЦАГИ»).

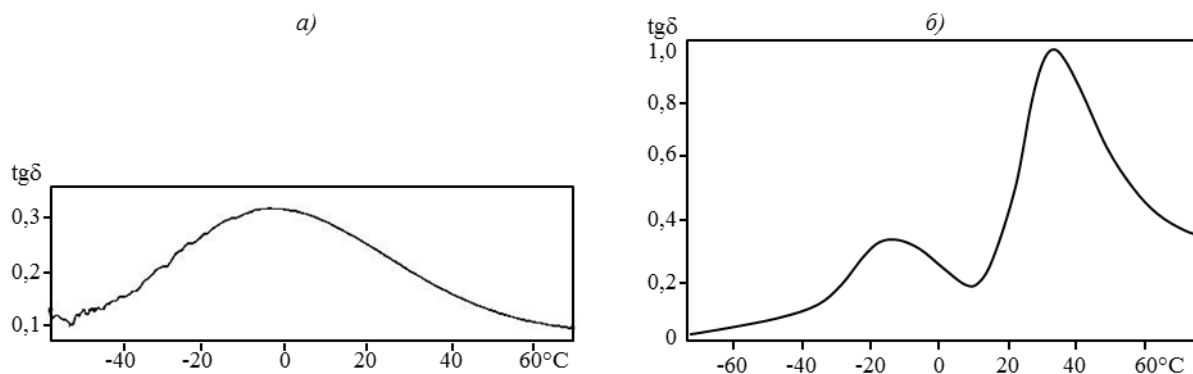


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента механических потерь образцов вибропоглощающих материалов ВТП-1В (а) и ВТП-2В (б) в условиях сдвигового нагружения

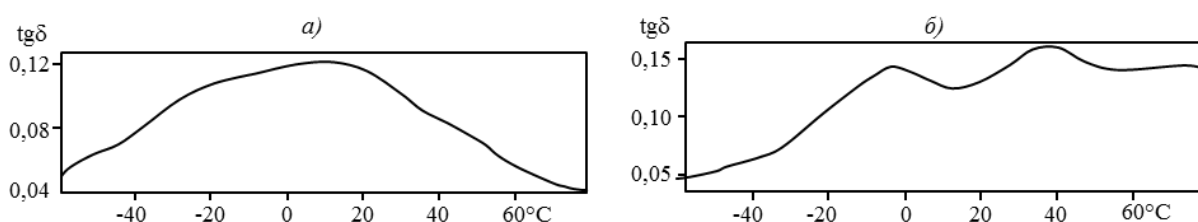


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента механических потерь образцов вибропоглощающих материалов ВТП-1В (а) и ВТП-2В (б) в условиях трехточечного изгиба

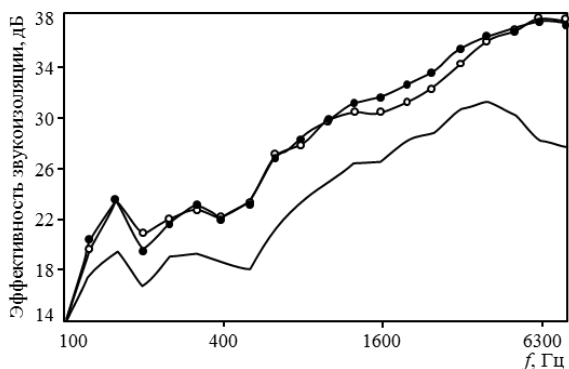


Рис. 3. Результаты акустических испытаний натурной панели фюзеляжа самолета Ил-96 с облицовкой из вибропоглощающих материалов ВТП-1В (○) и ВТП-2В (●) и без облицовки (—)

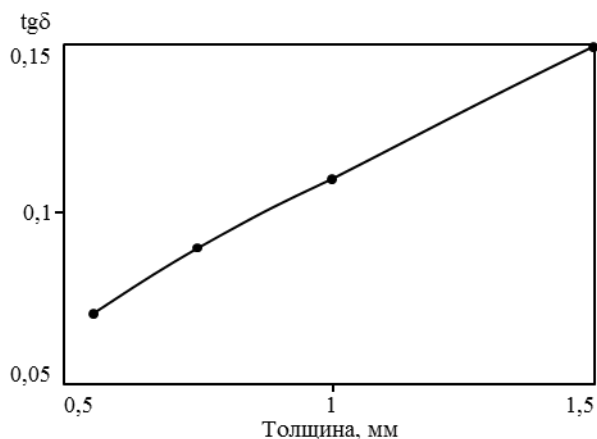


Рис. 4. Зависимость коэффициента механических потерь слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта от толщины внутреннего слоя термоэластопласта

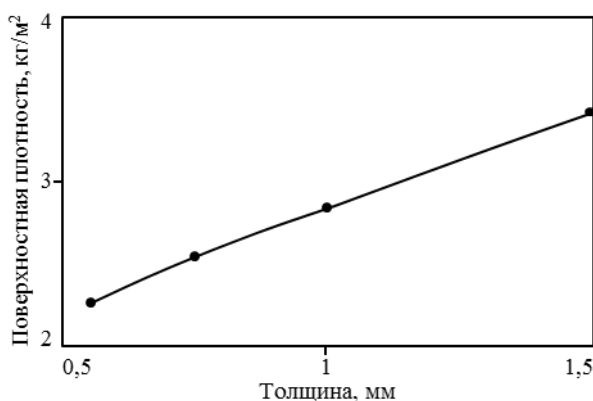


Рис. 5. Зависимость поверхностной плотности (масса 1 м²) слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта от толщины внутреннего слоя термоэластопласта

Демпфирующие свойства опытных образцов вибропоглощающего алюмотермоэластопласта

Частота нагружения, Гц	Коэффициент механических потерь при температуре, °С		
	-60	+20	+80
100	0,04	0,15	0,05
200	0,03	0,16	0,06
300	0,02	0,17	0,07

исследованы методом ДМА в условиях трехточечного изгиба при температурах -60, +20 и +80°С и частотах 100, 200 и 300 Гц. Полученные результаты приведены в таблице, из данных которой следует, что вибропоглощающий алюмотермоэластопласт при частоте 300 Гц и 20°С по величине коэффициента механических потерь превосходит вибропоглощающие материалы ВТП-1В и ВТП-2В.

Подобный эффект может быть объяснен тем, что в вибропоглощающих покрытиях ВТП-1В и ВТП-2В и вибропоглощающем алюмотермоэластопласте реализуются различные механизмы деформации.

В зависимости от вида деформации, которой подвергаются вибропоглощающие полимерные материалы, они подразделяются на две категории: покрытия (extensional damping или free layer damping) и армированные ВПМ (constrained layer damping).

Демпфирование по первому типу осуществляется путем нанесения покрытия из ВПМ (например, ВТП-1В или ВТП-2В) на вибрирующую поверхность, при этом в вибропоглощающем материале реализуются деформации «растяжения–сжатия».

Вибропоглощающие материалы типа «сэндвич» содержат армирующие слои, модуль упругости которых превосходит модуль упругости полимерной прослойки. Механизм диссипации энергии в данном случае значительно отличается от предыдущего – наличие армирующего слоя вызывает относительно большие сдвиговые деформации в вязкоупругом полимерном слое [8, 26–29].

Зависимость коэффициента механических потерь слоистого вибропоглощающего алюмотермо-

эластопласта при 20°С и частоте 100 Гц от толщины внутреннего вибропоглощающего слоя термоэластопласта показана на рис. 4. Видно, что $\text{tg} \delta$ возрастает с увеличением толщины полимерной прослойки, т. е. для достижения необходимого уровня вибропоглощения требуется увеличение толщины вибропоглощающего слоя, что приводит к увеличению массы конструкции (рис. 5). Однако существуют исследования, по результатам которых одним из способов снижения привеса по массе, вызываемого использованием ВПМ, является не сплошное, а частичное нанесение демпфирующего материала на поверхность конструкции, испытывающей вибрационные нагрузки [30]. В таком случае применение вибропоглощающего покрытия не приведет к увеличению массы конструкции.

Обсуждение и заключения

Исследование демпфирующих свойств вибропоглощающих материалов авиационного назначения методом динамического механического анализа в условиях трехточечного изгиба является наиболее приближенным к реальным условиям их эксплуатации.

Армированные вибропоглощающие материалы типа «сэндвич» по демпфирующим свойствам превосходят вибропоглощающие покрытия.

Увеличение толщины полимерной прослойки вибропоглощающего материала типа «сэндвич» приводит к возрастанию коэффициента механических потерь и массы конструкции.

Вопрос применения материалов типа «сэндвич» или вибропоглощающих покрытий является спорным и остается на усмотрение конструкторов в каждом конкретном случае.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 16–18.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
4. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
5. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы //Вестник РАН. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
6. Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Сагомонова В.А., Антюфеева Н.В. Перспективный вибропоглощающий материал ВТП-3В //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 47–49.

7. Аскадский А.А., Лучкина Л.В., Никифорова Г.Г. Вибропоглощающие градиентные полимерные материалы //Пластические массы. 2007. №4. С. 30–33.
8. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes //Journal of Sound and Vibration. 2003. №262. P. 457–474.
9. Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Ткачев А.А., Абакумова Н.М., Румянцева Т.В. Вибропоглощающий термоэластопласт ВТП-1В /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Термопластичные материалы». М.: ВИАМ. 2004. С. 30–31.
10. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Новые вибропоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 51–54.
11. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 328–335.
12. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Тюменева Т.Ю. Свойства клеев и клеящих материалов для изделий авиационной техники //Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №1. С. 14–24.
13. Савенкова А.В., Чурсова Л.В., Елисеев О.А., Глазов П.А. Герметики авиационного назначения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 40–43.
14. Gandhi F., Austruy J. Constrained-layer damping with gradient polymers for effectiveness over broad temperature ranges //The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal. 2007. V. 45. №8. P. 1885–1893.
15. Wang H.Q., Jiang Z.G., Huang L. Development of Damping Materials //Chinese Polymer Bulletin. 2006 (электронная версия).
16. Морозова Н.Н., Никонина О.М. Конструкционные вибропоглощающие материалы и их применение /В сб. материалы к краткосрочному семинару «Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение». Л. 1974. С. 25–29.
17. Jones D.I.G. Shock and Vibration Handbook. 5-th edition. NY: McGraw-Hill. 2011 (электронная версия).
18. Method of forming noise-damping material with ultrathin viscoelastic layer: pat. 6202462 US; publ. 2001.
19. Lu P., Liu X. Analysis of damping characteristics for sandwich beams with a polyurea viscoelastic layer //Advanced Materials Research. 2012. V. 374–377. P. 764–769.
20. Energy absorbing thermoplastic elastomer: pat. 8051947 US; publ. 2011.
21. Constrained layer damper, and related methods: pat. 8377553 US; publ. 2013.
22. Acoustic damping compositions: pat. 8028800 US; publ. 2011.
23. Method for manufacturing compartment made of steel/thermoplastic damping material composite structural plates: pat. 102825859 CN; publ. 2012.
24. Sheet molding compound damper component and methods for making and using the same: pat. 7172800 US; publ. 2007.
25. Oosting N.J., Hennessy J., Hanner D.T. Application of a Constrained Layer Damping Treatment to a Cast Aluminum V6 Engine Front Cover /In: Society of automotive engineers. NY. 2005. P. 2286.
26. Rongong J.A., Goruppa A.A., Buravalla V.R. Plasma deposition of constrained layer damping coatings //Journal of Mechanical Engineering Science. Part C. 2004. V. 218. P. 669–679.
27. Sperling L.H. Sound and Vibration Damping with Polymers: Basic Viscoelastic Definitions and Concepts /In: American Chemical Society Symposium Series. Washington. 1990. P. 5–23.
28. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. и др. Термоармирующие покрытия для тепловозопоглощающих материалов //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 04 (viam-works.ru).
29. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 56–59.
30. Damped structural panel and method of making the same: pat. 6266427 US; publ. 2001.