

ВИАМ/2013-Тр-11-03



УДК 678.8

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ
ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ
АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

В.А. Сагомонова

Ю.В. Сытый

Ноябрь 2013

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,
№11, 2013 г.

УДК 678.8

В.А. Сагомонова, Ю.В. Сытый

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрены основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения – основные положения теории, предъявляемые к материалам требования, виды материалов и их сравнительная характеристика.

Ключевые слова: *вибрация, вибропоглощение, вибропоглощающие материалы, вибропоглощающие материалы с армирующим слоем.*

V.A. Sagomonova, Yu.V. Sytyi

BASIC CONCEPTS OF CREATION DAMPING MATERIALS FOR AVIATION

This paper deals with basic principles of creating damping materials for aviation use, namely basic theoretic concepts, requirements to the materials, different kinds of materials and their comparative characteristics.

Keywords: *vibration, vibration damping, damping materials, constrained layer damping materials.*

В настоящее время авиационная промышленность остается одним из наиболее высокотехнологичных секторов экономики, потребляющих наукоемкую продукцию, однако без новых материалов невозможно развитие и других отраслей промышленности – электроэнергетики, машиностроения, строительства, медицины, приборостроения и др. Многолетняя отечественная и зарубежная практика показывает, что >80% инновационных разработок в ведущих отраслях промышленности и секторах экономики базируется на внедрении новых материалов и технологий их производства [1].

Развитие техники, связанное с увеличением скоростей и мощностей машин и механизмов, привело к значительному возрастанию вредных шумов и вибраций, ухудшающих акустическую комфортность и понижающих надежность работы механизмов. Особенно актуальна данная проблема для авиационной отрасли.

Применяемые в современной авиационной технике методы борьбы с шумом можно условно разделить на активные и пассивные методы. К активным относятся методы, при которых снижения шума добиваются путем воздействия на механизм шумообразования применением того или иного источника, например, применением малошумных двухконтурных двигателей, уменьшением скорости потока в системе кондиционирования самолета и т. д. Среди пассивных методов прежде всего следует отметить рациональную компоновку шумящих агрегатов (в особенности силовой установки) относительно пассажирского салона. Следует подчеркнуть, что возможности снижения шума в салоне самолета с помощью рассмотренных методов могут быть наиболее полно реализованы в том случае, если они предусмотрены на стадии проектирования. Многие из них становятся неосуществимыми, когда самолет построен [2].

Основными источниками шума в салоне и кабине самолета можно считать следующие:

- пограничный слой (толщина которого в носовой части самолета составляет ~13 мм и возрастает до 30 мм в хвостовой части);
- двигательные установки;
- система кондиционирования воздуха.

Акустики разделяют внешний шум, проникающий внутрь салона самолета, на воздушный и структурный шум. Шум, поступающий внутрь самолета воздушным путем, – это шум, излученный внешними источниками (например, винты, выхлопной шум) и распространяющийся через акустическую среду (воздух), а затем передаваемый через фюзеляж самолета. Шум, источником которого является энергия вибраций от удаленного источника (например, двигателей, винта, крыла), называют шумом, распространяющимся по конструкции, или структурным шумом.

Наиболее остро виброакустические проблемы стоят в низкочастотном диапазоне, где наблюдаются резонансные колебания конструкций.

Одним из эффективных способов снижения уровня шума и вибрации является применение в конструкциях, испытывающих повышенный уровень виброакустических нагрузок, материалов с высокими демпфирующими свойствами (вибропоглощающих материалов – 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.

Для количественной оценки демпфирующих свойств полимерных материалов используют тангенс угла механических потерь ($\operatorname{tg}\delta$), коэффициент механических потерь (КМП – η), компоненты комплексного модуля упругости – динамический модуль упругости E' и динамический модуль механических потерь E'' . Эти характеристики связаны между собой следующими соотношениями [3]:

$$\operatorname{tg}\delta = \eta = E''/E' = \delta/\pi.$$

Наиболее часто способность к поглощению колебаний материала характеризуют с помощью коэффициента механических потерь, также важной характеристикой является диапазон температур, соответствующих максимальному значению этой характеристики ($T_{\operatorname{tg}\delta_{\max}}$).

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 ($\operatorname{tg}\delta_{\max}$) 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 (T_c). При частотах >1 Гц наибольшее вибропоглощение, как правило, наблюдается выше температуры стеклования [4].

Целью любого изобретения, касающегося демпфирующего материала, является создание экологичного и технологичного ВПМ, обладающего высокими вибропоглощающими свойствами в широком (и, как правило, заданном) диапазоне температур, имеющего высокую адгезию к вибрирующей поверхности и низкую поверхностную плотность, стойкого к воздействию агрессивных сред и высоких температур (в особенности для материалов, снижающих вибрацию от двигателей), отвечающего требованиям пожарной безопасности, а также сохраняющего свои свойства в течение длительного времени (пример такого изобретения – см. в работе [5]). Очевидно, что вышеперечислен-

ные требования значительно сужают круг возможных исходных полимерных материалов для создания ВПМ авиационного назначения.

Впервые сообщения о применении вибропоглощающих материалов для снижения шума в салоне самолетов и вертолетах появились в 60-х годах прошлого века (1958–1960 гг.). 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. Подобным образом, например, ВПМ были использованы на самолетах франко-итальянского концерна АТR и американской фирмы McDonnell Douglas – АТR-72, MD-80 и DC-9: вибропоглощающее покрытие было нанесено практически на всю поверхность обшивки, панелей интерьера, пола передней и задней перегородок.

Очевидно, что первым важным шагом является рациональное размещение вибропоглощающего материала на вибрирующих поверхностях самолета, так как в противном случае ВПМ с высокими демпфирующими свойствами может оказаться неэффективным в использовании. Например, для снижения структурного шума и вибрации, передающихся через обшивку и стрингеры, требуются ВПМ, отличающиеся от таковых для шпангоутов [6].

Также необходимо учитывать, что применение вибропоглощающих материалов всегда связано с дополнительными весовыми затратами, что крайне нежелательно для конструкции самолетов. В последнее время наметилась тенденция наносить ВПМ не на всю вибрирующую поверхность, а только на определенные ее участки [7].

С весовыми затратами также непосредственно связана толщина листовых ВПМ. Влияние толщины слоев вибропоглощающего покрытия на величину коэффициента механических потерь показано в табл. 1.

Как видно из таблицы, с увеличением толщины ВПМ значение $\text{tg}\delta$ возрастает, но увеличение толщины вибропоглощающего покрытия ведет к повышению веса виброизоляции на борту самолета, поэтому следует подбирать ВПМ оптимальной толщины. В случае использования армированного ВПМ необходимо учитывать соотношение толщин вибропоглощающего и армирующего слоев [8, 9].

Зависимость $\text{tg}\delta$ от толщины слоев ВПМ

Толщина термопластичного полиуретана, мм	Значение $\text{tg}\delta$ при 20°C и частоте 300 Гц
1,0	0,09
1,5	0,11
2,0	0,12

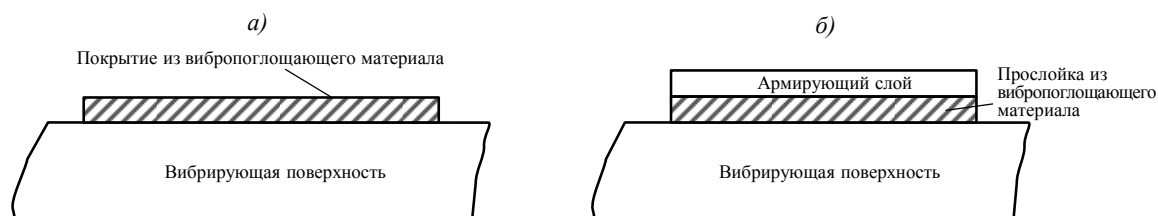


Рисунок 1. Схема использования ВПМ в виде покрытий (а)
и в сочетании с армирующим слоем (б)

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), включающие армирующий слой (constraining layer) [10]. Схематически эти два варианта размещения ВПМ представлены на рис. 1.

Демпфирование по первому типу осуществляется нанесением покрытия из ВПМ на вибрирующую поверхность, при этом в вибропоглощающем материале реализуются деформации растяжения–сжатия.

Армированные ВПМ включают армирующий слой (или два внешних слоя с прослойкой из полимерного материала), нанесенный на вязкоупругий полимерный слой, расположенный на вибрирующем субстрате. Очевидно, что армирующие слои имеют значение модуля упругости, превосходящее значение модуля 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.

Принципиальная разница в механизмах деформации в ВПМ покрытиях и армированных вибропоглощающих материалах показана на рис. 2.

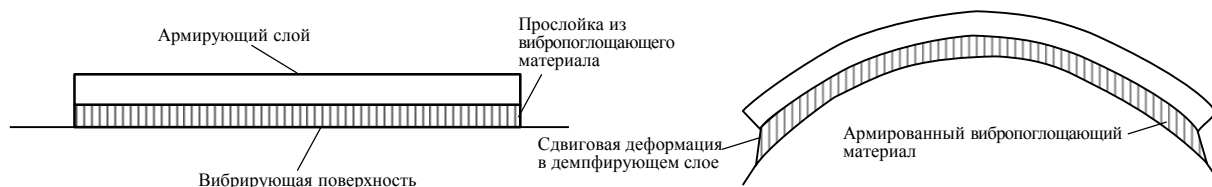


Рисунок 2. Схема деформирования вибропоглощающего покрытия и армированного вибропоглощающего материала на вибрирующей поверхности [11]

Сравнение эффективности использования вибропоглощающих покрытий и армированных вибропоглощающих материалов приведено в табл. 2.

В настоящее время наиболее широко в авиации и других отраслях используются армированные вибропоглощающие материалы, в частности, состоящие из двух наружных жестких листов с полимерной прослойкой между ними, а различия в вариантах их исполнения относятся лишь к составу вибропоглощающей композиции, из которой выполнен вязкоупругий слой [12–17].

Таблица 2

**Сравнение способов использования ВПМ
в виде покрытий и в сочетании с армирующим слоем [9]**

Вид ВПМ	Преимущества	Недостатки	Каким параметром определяется
Вибропоглощающее покрытие	Простота использования, невысокая стоимость	Уровень вибропоглощения ниже, чем в случае с использованием армирующего слоя	E''
Армированный ВПМ	Высокий уровень вибропоглощения	Дополнительные весовые затраты из-за использования армирующего слоя	$tg\delta$

Как уже упоминалось выше, максимальные механические потери в полимерах наблюдаются выше их температуры стеклования в зоне наиболее сильно развитых релаксационных явлений. 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, поэтому существуют разнообразные подходы к созданию материалов, характеризующихся высоким вибропоглощением в широком диапазоне температур, на основе полимеров и полимерных материалов: сополимеризация, создание взаимопроникающих сеток (ВПС) и полу-ВПС, введение наполнителей и других добавок и структурирование.

Сополимеризация является одним из основных способов модифицирования, способствующих появлению в материале разнообразных кинетических фрагментов с различным временем релаксации, что ведет к расширению температурного интервала эффективного вибропоглощения. Однако необходимо учитывать, что с расширением температурного интервала вибропоглощения происходит снижение максимальной величины КМП [18].

Проблема создания ВПМ с широким температурным (частотным) диапазоном демпфирования решается путем получения полимерных систем со сложной микрофазовой структурой и исследования их вязкоупругих свойств. К таким системам относятся смеси полимеров со структурой полувзаимопроникающих и взаимопроникающих сеток (полу-ВПС и ВПС) [19].

Наряду с такими методами, как разработка специальных сополимеров и создание ВПС и полу-ВПС, перспективным способом является формирование композиционных материалов, состоящих из полимерной матрицы и наполнителя.

Наполнители в полимерных материалах, как правило, изменяют их прочность, повышают жесткость или упругость. Для наполненных полимерных систем характерно наличие дополнительных релаксационных переходов, связанных с подвижностью частиц наполнителя в среде полимера. Часто наполнитель увеличивает относительные потери, особенно если находится в высокоэластичном состоянии [20].

Наиболее эффективными для получения ВПМ являются наполнители чешуйчатой или пластинчатой морфологии, например, слюда или графит. По степени убывания эффективности влияния на демпфирующие свойства наполнители различной формы можно расположить следующим образом: слюда, графит → каолин, тальк, асбест, алюминиевая пудра → железный порошок, сажа.

Эти данные подтверждаются результатами исследования коэффициента механических потерь вибропоглощающего материала ВТП-1В [21]: $\text{tg}\delta$ материала с введенным в него графитом составляет 0,09 при 20°C и частоте 100 Гц, а с сажей в виде наполнителя: 0,07.

Однако следует заметить, что и в области синтеза вибропоглощающих композиций наблюдается тенденция разработки составов на основе полимеров сложных и простых эфиров акрила и метакрила, а также термоэластопластов (в частности термопластичных полиуретанов) [22] и взаимопроникающих сеток.

Таким образом, один из эффективных способов снижения уровня вибрации и шума – применение вибропоглощающих материалов на основе полимеров и полимерных ма-

териалов. Наиболее эффективными вибропоглощающими материалами являются армированные ВПМ, состоящие из армирующих жестких и полимерных вибропоглощающих слоев. Существуют разнообразные подходы к созданию полимерных вибропоглощающих материалов, характеризующихся высоким вибропоглощением в широком диапазоне температур: сополимеризация, создание взаимопроникающих сеток и полу-ВПС, введение наполнителей и других добавок и структурирование. Важным этапом с точки зрения обеспечения эффективности использования демпфирующих свойств вибропоглощающего материала и снижения весовых затрат является рациональное размещение ВПМ на борту самолета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Кудисова Л.Я., Кузнецов В.Б., Каурова Н.Ф. Проблемы структурного шума и звукоизоляции тонкостенных конструкций. М.: ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. 1991. 174 с.
3. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Фомин Н.Е. Вибропоглощающие композиционные материалы. Саранск: Изд-во Мордовского университета. 2001. 95 с.
4. Аскадский А.А., Лучкина Л.В., Никифорова Г.Г. Вибропоглощающие градиентные полимерные материалы //Пластические массы. 2007. №4. С. 30–33.
5. 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.
6. 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.
7. Damped structural panel and method of making the same: pat. 6266427 US; опубл. 2001.
8. Vibration damped sandwich systems having interlayers of vinyl acetate-ethylene copolymers: pat. 3640836 US; опубл. 1972.
9. Method of forming noise-damping material with ultra-thin viscoelastic layer: pat. 6202462 US; опубл. 2001.
10. Sperling L.H. Sound and Vibration Damping with Polymers: Basic Viscoelastic Definitions and Concepts /In: American Chemical Society Symposium Series. 1990. P. 5–23.

11. Rongong J.A., Goruppa AA., Buravalla V.R. Plasma deposition of constrained layer damping coatings //Journal of Mechanical Engineering Science. 2004. V. 218. Part C. P. 669–679.
12. 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. New York. 2005. P. 2286.
13. Method for manufacturing compartment made of steel/thermoplastic damping material composite structural plates: pat. 102825859 CN; опубли. 2012.
14. Constrained layer damper, and related methods: pat/ 8377553 US; опубли. 2013.
15. Acoustic damping compositions: pat. 8028800 US; опубли. 2011.
16. Structural composite material with improved acoustic and vibration damping properties: pat. 2010/170746 A1 US; опубли. 2010.
17. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: pat. 2012/164907 A1 US; опубли. 2012.
18. Energy absorbing thermoplastic elastomer: pat. 8051947 US; опубли. 2011.
19. Li Hui, Zhang Yong-Bing, Ma Yu-Pu. Recent Advance in Vibration Damping Property of Polyurethane Interpenetrating Polymer Networks //Development and Application of Materials. 2008 (электронная версия).
20. Molding material having vibration damping property and molded article: pat. 2013/0012641 A1 US; опубли. 2013.
21. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Новые вибропоглощающие материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 51–54.
22. Петрова Г.Н., Перфилова Д.Н., Грязнов В.И., Бейдер Э.Я. Термопластичные эластомеры для замены резин //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 302–308.

Reference list

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.

2. Kudisova L.Ya., Kuznetsov V.B., Kaurova N.F. Problemy strukturnogo shuma i zvukozolyatsii tonkostennykh konstruktsiy [Aspects of structural noise and noise insulation of thin-walled structures]. M.: TsAGI im. prof. N.E. Zhukovskogo. 1991. 174 s.
3. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Fomin N.E. Vibropogloschayuschie kompozitsionnye materialy [Vibration-absorbing composite materials. Saransk]. Saransk: Izd-vo Mordovskogo universiteta. 2001. 95 s.
4. Askadskiy A.A., Luchkina L.V., Nikiforova G.G. Vibropogloschayuschie gradientnyye polimernye materialy [Vibroabsorbing gradient polymer materials] //Plasticheskie massy. 2007. №4. S. 30–33.
5. Sytyj Yu.V., Kislyakova V.I., Sagomonova V.A., Antyufeeva N.V. Perspektivnyj vibropogloschayuschiy material VTP-3V [VTP-3V advanced vibration-absorbing material] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 47–49.
6. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes //Journal of Sound and Vibration. 2003. №262. R. 457–474.
7. Damped structural panel and method of making the same: rat. 6266427 US; opubl. 2001.
8. Vibration damped sandwich systems having interlayers of vinyl acetate-ethylene copolymers: rat. 3640836 US; opubl. 1972.
9. Method of forming noise-damping material with ultra-thin viscoelastic layer: rat. 6202462 US; opubl. 2001.
10. Sperling L.H. Sound and Vibration Damping with Polymers: Basic Viscoelastic Definitions and Concepts /In: American Chemical Society Symposium Series. 1990. R. 5–23.
11. Rongong J.A., Goruppa A.A., Buravalla V.R. Plasma deposition of constrained layer damping coatings //Journal of Mechanical Engineering Science. 2004. V. 218. Part C. P. 669–679.
12. 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. New York. 2005. P. 2286.
13. Method for manufacturing compartment made of steel/thermoplastic damping material composite structural plates: pat. 102825859 CN; opubl. 2012.
14. Constrained layer damper, and related methods: pat/ 8377553 US; opubl. 2013.
15. Acoustic damping compositions: pat. 8028800 US; opubl. 2011.
16. Structural composite material with improved acoustic and vibration damping properties: pat. 2010/170746 A1 US; opubl. 2010.

17. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: pat. 2012/164907 A1 US; opubl. 2012.
18. Energy absorbing thermoplastic elastomer: pat. 8051947 US; opubl. 2011.
19. Li Hui, Zhang Yong-Bing, Ma Yu-Pu. Recent Advance in Vibration Damping Property of Polyurethane Interpenetrating Polymer Networks //Development and Application of Materials. 2008 (elektronnaya versiya).
20. Molding material having vibration damping property and molded article: pat. 2013/0012641 A1 US; opubl. 2013.
21. Sytyj Yu.V., Sagomonova V.A., Kislyakova V.I., Bol'shakov V.A. Novye vibropogloschayuschie materialy [Novel Vibration-absorbing Materials] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 51–54.
22. Petrova G.N., Perfilova D.N., Gryaznov V.I., Beyder E.Ya. Termoplastichnye elastomery dlya zameny rezin [Thermoplastic elastomers for the substitution of rubbers] //Aviatsionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 302–308.