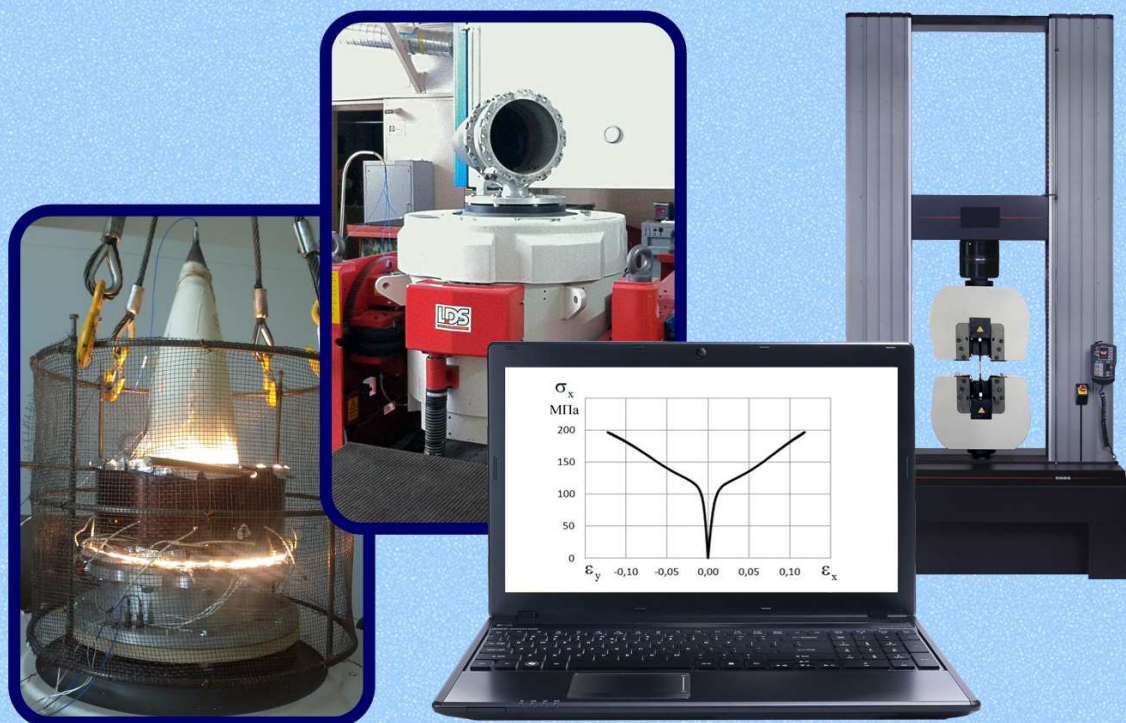


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук

А.М. ДУМАНСКИЙ

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ



Москва
2015

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт Машиноведения им. А. А. Благодирова
Российской академии наук

А. М. ДУМАНСКИЙ

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В
МАШИНОСТРОЕНИИ

Москва
2015

УДК 539.3; 539.4; 678.4

Думанский А.М.

Проблемы материаловедения в машиностроении. 2015. – М. Ижевск: Институт компьютерных исследований – 51 с.

Наряду с представленными основными направлениями фундаментальных научных исследований, проводимых в ИМАШ РАН, в краткой форме описаны результаты исследований, проведенных автором.

Описаны методы определения механических свойств и закономерности деформирования композиционных материалов и полимерных материалов, используемых в ракетно-космической и авиационной технике.

Представлены расчетно-аналитические методы, позволяющие прогнозировать анизотропию нелинейного деформирования и реологии слоистых композиционных материалов.

Представлены результаты методов физического исследования конструкционного углепластика, и сделана попытка оценка влияния наномодифицирования полимерной матрицы на характеристики его жесткости, прочности и трещиностойкости.

Проведены комплексные испытания, и разработаны методы расчета и прогнозирования механического поведения эластомерных клеевых соединений в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Представлено экспериментальное оборудование, используемое для наземной отработки материалов и конструкций ракетно-космической и авиационной техники, и описаны принципы его работы.

Оглавление

Введение	4
1 Задачи ИМАШ РАН в решении проблем материаловедения	6
2 Композиционные материалы	11
Определение механических свойств композиционных материалов	16
Закономерности деформирования композиционных материалов	17
Влияние наномодифицирования полимерной матрицы на механические свойства углепластика	20
Клеевые соединения	25
Предельное состояние КС	28
Ползучесть и длительная прочность КС при повышенных температурах	32
3 Наземная отработка элементов конструкций ракетно-космической техники	38
Испытания элементов конструкций при наземной отработке	38
Испытания клеевых соединений	43
Заключение	47

Введение

Современное развитие промышленности тесно связано с развитием машиностроения, которое в свою очередь зависит от разработки и применения новых конструкционных материалов. Повышение класса и ответственности создаваемых машин и механизмов требует не только совершенствования методов их расчета и проектирования, но и разработки инновационных подходов создания конструкционных материалов, способов их испытаний с учетом многочисленных факторов эксплуатационного, технологического и конструктивного характера. Для достижения необходимых параметров современных машин необходим прогресс материаловедения, который будет способствовать обеспечению надежности, долговечности и ресурса конструкций и сооружений.

В Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН традиционно проводятся фундаментальные и прикладные исследования, связанные с изучением проблем безопасности, ресурса и живучести, включая снижение техногенных и технологических рисков для объектов гражданского и оборонного назначения (аэрокосмической и атомной техники, транспортных и других сложных машиностроительных систем) с учетом критических технологий.

С приходом в 2009 году на пост директора Института академика Р.Ф. Ганиева была укрупнена тематика исследований, сокращено число лабораторий, произошло усиление потенциала в связи с добавлением Научного центра нелинейной волновой механики и технологии. Определены наиболее перспективные научные направления по традиционным и новым крупным проблемам. В частности, в разработке волновых технологий получения новых материалов, композитов и нанокompозитов, волновой обработке сыпучих сред, смешения многофазных сред. Развиваемые волновые технологии являются российским приоритетом, не имеющим аналогов в мировой практике.

Тематика фундаментальных научных исследований, проводимых в ИМАШ РАН, наряду с волновым машиностроением и волновыми технологиями включает методы анализа и синтеза многофункциональных механизмов и машин для перспективных технологий и новых человеко-машинных комплексов, системы многокритериального связного анализа, обеспечения и повышения прочности, ресурса, живучести и безопасности машин, научные основы конструкционного материаловедения, физико-математическое моделирование трибологических процессов и разработку материалов и технологий, динамику и устойчивость конструкций, взаимодействующих с жидкостью и газом.

В работе в краткой форме представлены результаты исследований, проводимых в области конструкционного материаловедения, и разработки методов оценки физико-механических свойств и диагностики конструкций современных летательных аппаратов (ЛА). Непосредственно к конструкционному материаловедению относятся разделы, связанные с разработкой структурно-феноменологических моделей расчета и прогнозирования деформирования композиционных материалов, клеевых соединений (КС), методами физического анализа влияния наномодифицирования полимерной матрицы на механические свойства углепластиков. Описаны принципы работы экспериментального оборудования и методы диагностики состояния ответственных элементов конструкций ЛА, связанные с обеспечением прочности, надежности и качества.

Прогресс современной ракетно-космической техники невозможен без использования композиционных и полимерных материалов, позволяющих достигать весового совершенства конструкций, обеспечивать высокое сопротивление деформированию и разрушению в условиях жестких внешних теплосиловых воздействиях, излучений, воздействия агрессивных сред и др. Отсюда возникает необходимость разработки методов корректной оценки физико-механических свойств и создания материалов для ракетно-космической техники различного назначения.

1. Задачи ИМАШ РАН в решении проблем материаловедения

В настоящее время в соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 3 декабря 2012 г. № 2237-р Об утверждении Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН проводятся фундаментальные и прикладные исследования по ряду направлений [1, 2]:

- разработка волновых машин и аппаратов для реализации прорывных технологий в интересах машиностроения и энергетики, в том числе добывающих и перерабатывающих отраслей промышленности.
- разработка современных технологий получения материалов, в том числе композитов и продуктов (нефтехимии и пищевых) с уникальными свойствами.
- разработка проблем динамики конструкций с жидкостью и газом, в частности, повышение надежности крупных объектов государственного значения (магистральные нефте- и газопроводы, ГЭС, АЭС и т.п.).

Волновые технологии являются прорывными инновациями, в основе которых лежат фундаментальные научные достижения в области нелинейной волновой механики. Они позволяют решать ранее недоступные технологические проблемы и реализовывать качественно новым способом уже известные технологические процессы, существенно повысив их эффективность.

В Отделе виброакустики машин проводятся работы в области исследования виброакустических полей по управлению движением и обеспечения скрытных действий морских подвижных объектов, включая разработку физико-математических моделей процессов возбуждения и распространения колебаний в корабельных механизмах, машинах и конструкциях. Разрабатываются методы расчета вынужденных колебаний и гидроаку-

стического излучения корпуса объекта, моделируемого конечной упругой цилиндрической оболочкой в жидкости [3].

В Отделе теоретической и прикладной акустики выполняются работы по разработке научных основ и метаматериалов для акустического стелса и суперпоглотителя звука, снижению шума обтекания на основе пассивных покрытий, созданию перспективных авиакосмических конструкций с заданными виброакустическими свойствами, моделированию механических источников звука.

В Отделе прочности, живучести и безопасности машин выполняются работы [4, 5] по фундаментальным проблемам прочности, ресурса, надёжности, живучести и безопасности машин и сложных технических систем, изучаются комплексные проблемы машиноведения, повышение безопасности машин, снижение техногенных и технологических рисков для объектов гражданского и оборонного значения, созданию научных основ нормирования безопасности и управления рисками, расчётные и экспериментальные исследования критически важных элементов машин и сложных технических систем, развитию наукоёмких технологий, имеющих важное значение для обороны страны и безопасности государства, включая нанотехнологии, технологии атомной энергетики, создание новых материалов, технологии снижения риска.

В Отделе конструкционного материаловедения проводятся работы по направлениям [6], связанным с исследованием циклических и длительных статических свойств конструкционных материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным, упрочнению поверхностных слоев металлических материалов с целью улучшения их циклических и трибологических свойств, получению и обоснованию расчетных характеристик конструкционных материалов и их сертификации, исследованию технологических свойств в связи с прочностью и износостойкостью конструкционных материалов, разработкой методов упрочнения материалов методами высокоэнергетических воздействий.

Основные направления в работе отдела трения, износа, смазки, трибологии направлены на повышение ресурса, безопасности и коэффициента полезного действия объектов

гражданского и военного назначения, а также для космических, транспортных, энергетических, атомных, авиационных, газо-нефтедобывающих систем, создание новых износостойких материалов, покрытий, смазочных материалов, в т.ч. на основе наносистем.

ИМАШ РАН работает по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в соответствии с перечнем критических технологий Российской Федерации по плану научно-исследовательской работы Института согласно пунктам программы ФНИ ГАН, утвержденным по подразделениям. По ряду перспективных направлений получены важные научно-технические результаты, в частности, по разработке волновых технологий получения новых материалов с уникальными свойствами, в том числе, композитов и нанокompозитов, повышению надежности и безопасности современной авиационно-космической техники, энергетики, разработке технологий в топливно-энергетическом комплексе, позволяющих многократно ускорять процессы бурения, повышать нефтеотдачу и газоконденсатоотдачу пластов.

Применение волновых технологий позволяет на принципиально новом уровне решать технологические задачи в машиностроении, материаловедении, медицине, строительстве, нефтегазовой промышленности и др.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН обладает научно-техническим потенциалом, позволяющим проводить фундаментальные исследования на мировом уровне, и для реализации плана научно-исследовательских работ необходимо активизировать вопросы, связанные с внедрением результатов работ в промышленность, планированием инновационных проектов, коммерциализацией научных разработок, привлечения студентов к НИОКР. Привлечение способных студентов возможно в процессе преподавательской деятельности в университетах, создавая мотивацию к научно-практической деятельности, проводимой совместно с ведущими НИИ и КБ для реализации крупных научных программ в нашей стране и за рубежом. Побуждать молодежь к активному участию в международных, всероссийских конференциях и форумах, семинарах,

которые проводятся в рамках Института и его подразделений, к публикации результатов исследований в отраслевых изданиях, высокорейтинговых журналах и сборниках трудов. Оказывать содействие в доступе к электронным средствам научной информации. Способствовать возрождению и развитию экспериментальных исследований, как в рамках, так и вне Института, способных заинтересовывать возможного потребителя. Расширять возможности использования и приобретения вычислительной техники и программного обеспечения для осуществления широкомасштабных инноваций в различных отраслях промышленности.

Необходима разработка целенаправленной программы действий, позволяющей устранить существующие недостатки и ускорить внедрение комплекса мероприятий в рамках Института и в соответствии с планами программы фундаментальных научных исследований РАН.

Если рассматривать проблемы машиностроения в целом, то можно прийти к заключению, что страны, достигшие в последние десятилетия наиболее впечатляющих успехов, отличаются, с одной стороны, высокоразвитая система образования, стремление к повышению ее уровня, с другой стороны, уровень поддержки научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) и инноваций. В области НИОКР содержание инновационной политики определяется финансовой поддержкой государством фундаментальной науки и прикладных исследований; созданием инновационных структур, обеспечивающих связь науки с производством и коммерциализацию научных разработок; реализацией программ НИОКР с участием предприятий и научных организаций; созданием наиболее благоприятных условий деятельности инновационно-активных предприятий.

Национальным научным советом США в докладе, посвященном оценке конкурентоспособности страны в глобальной экономике, были сделаны следующие выводы и рекомендации [7]:

1. увеличение финансирования фундаментальных исследований;

2. направление усилий на поощрение интеллектуального взаимодействия между промышленностью и академическими кругами;
3. поощрение сотрудников научно-исследовательского сектора промышленных предприятий к участию в публикационной деятельности в качестве экспертов и как авторов в высокорейтинговых журналах.

Указанные выводы и рекомендации, по нашему мнению, являются справедливыми применительно к отечественному машиностроению.

2. Композиционные материалы

Композиционные материалы косвенно входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, в частности, в направления индустрии наносистем, перспективных видов вооружения и специальной техники, транспортных и космических систем, энергоэффективности, энергосбережения и ядерной энергетике.

Для расчета элементов тонкостенных конструкций для уточнения экспериментально наблюдаемых эффектов широко используются различные варианты теории слоистых пластин. В большинстве работ основой для проектирования являются свойства однонаправленного слоя, которые могут быть определены по результатам испытаний однонаправленных или косоугольно армированных слоистых образцов. Для адекватного описания механического поведения слоя в пакете упругие свойства слоя могут определяться по результатам испытаний многослойных разнонаправленно армированных материалов [9, 10, 11]. Определение характеристик однонаправленного слоя по характеристикам многослойных структур с использованием методов идентификации (решений обратных задач) известно достаточно давно – примерно с 1975-1980 гг. Однако алгоритмы решения задач идентификации очень разнообразны, и варианты этих алгоритмов при решении конкретных практически значимых задач отнюдь не исчерпаны [12, 13]. Поэтому, необходима разработка новых подходов к идентификации характеристик прочности слоя для определения характеристик слоя со связующим без нанодобавок и с нанодобавками. Оценка влияния нанодобавок, как фактора, вызывающего различные изменения ограниченного количества характеристик слоя, требует тщательного анализа экспериментальных данных.

Первым и одним из важных этапов при проектировании является оценка упругих характеристик слоя. Их определение выполняется минимизацией невязки экспериментальных данных и расчетных значений, вычисленных с помощью соотношений

теории анизотропной упругости. При определении характеристик упругости количество экспериментально определенных величин, как правило, превышает количество вычисляемых величин. Такая задача может быть корректно решена с помощью методов линейной алгебры с оценкой устойчивости полученных решений к случайным возмущениям матрицы и/или столбцов свободных членов. Следует отметить, что различие погрешностей величин, измеряемых в процессе эксперимента, может приводить к необходимости корректировки характеристик упругости с помощью взвешенного метода наименьших квадратов. Повышенные значения внешних нагрузок и их протяженность во времени приводят к необходимости разработки методов оценки нелинейных и временных свойств слоистых композитов. Поскольку свойства слоистого композита определяются нелинейными и временными свойствами слоя, анализ соответствующих свойств слоя также проводится с учетом результатов испытаний образцов однонаправленных или разнонаправленных слоистых композитных материалов [14, 15]. Анализ экспериментальных данных, полученных на углепластиках, показывает, что физическая нелинейность и реологические свойства слоя и пакета в значительной степени определяются соответствующими свойствами при сдвиге в плоскости слоя. В связи с этим возникает возможность обобщения соотношений упругости слоя и построения определяющих соотношений для слоистого материала, позволяющих учитывать закономерности нелинейного и реологического поведения слоистых углепластиков. Предлагаемые подходы могут быть обобщены на случай проявления нелинейных и реологических свойств в направлении перпендикулярно армированию. При допущении подобия кривых деформирования определяющие соотношения получаются в рамках предложенных подходов.

В связи с широким внедрением композиционных и эластомерных материалов в конструкции несущих элементов летательных аппаратов проводятся интенсивные научно-исследовательские работы по изучению физико-механических свойств, построению математических моделей оценки напряженно-деформированного состояния, связанного с микрострук-

турой материала и развитием дефектов. Другое направление, заметно активизировавшееся в последнее время, концентрирует внимание на изучении влияния переменных во времени нагрузок на сопротивление деформированию и разрушению. Сюда относятся динамические нагрузки, ползучесть, релаксация, циклические нагрузки, а также различные методы оценки накопления повреждений в процессе длительно действующих нагрузок, включая сопротивление усталости. Тематика этих исследований включает в себя обобщение теорий анизотропной пластичности, накопления повреждений, как условие уменьшения площади эффективного сечения материала в процессе нагружения, разработку моделей нелинейного поведения, структурно-факторный анализ, численные методы, в том числе решение трехмерных задач, создание моделей микромеханики композитов и др. В последнее время акцент делается на изучение влияния ударных нагрузок, деформирования и разрушения при сжатии, реологических свойств [16, 17, 18, 19]. Большой интерес представляет анализ физико-механических свойств материалов с помощью динамического механического анализа (ДМА), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), термомеханического анализа (ТМА), термогравиметрического анализа (ТГА) и др. Ряд работ посвящен связи свойств, получаемых с помощью вышеописанных средств анализа, с данными, получаемыми в результате механических испытаний. Важность такого рода сравнений заключается в возможности оценки сопротивления трещинообразованию и дефектам, развивающимся в процессе силовых и других эксплуатационных воздействий. Представляется важной возможность технологического регулирования механических свойств с помощью выбора и регулирования свойств полимерной матрицы. Путем применения мономеров и олигомеров с разветвленными функциональными группами удастся обеспечить развитую сшивку эпоксидных связующих при отверждении. Однако отрицательным следствием густой сшивки является хрупкость матрицы, приводящая к расслаиванию композита и его разрушению вследствие разрыва армирующих углеродных наполнителей. В связи с этим активно проводятся экспериментальные иссле-

дования для поиска технических решений, направленных на повышение уровня пластической деформации эпоксидной матрицы, увеличение адгезионной прочности на границе раздела «волокно-матрица», удельной энергии, вязкости разрушения ПКМ. Эффективным методом, позволяющим решать такие задачи, является введение в эпоксидную матрицу наномодификаторов, таких как графены, фуллерены, причем ключевыми проблемами являются физико-химические принципы и закономерности процессов синтеза наномодифицированных структур и их взаимодействия в сложных гетерогенных системах. Введение наночастиц в полимерные связующие - наиболее сложный этап технологии наномодифицирования ПКМ [8]. Углеродные наночастицы, обладая высокой удельной поверхностью и поверхностной энергией, чрезвычайно склонны к агрегированию, при котором они теряют большую часть своей активности. В этой ситуации дезинтеграция наноматериала, равномерное объемное распределение наночастиц, мобилизация их активного взаимодействия с объектом наномодифицирования (матрица и граница раздела с волокном) являются наиболее проблемными этапами нанотехнологии. Если ранее работы по исследованию свойств полимерных нанокомпозитов были в основном направлены на изучение механизма упрочнения полимеров углеродными нанотрубками, то в последние годы большое количество публикаций посвящено решению конкретных технологических задач, направленных на создание полимерных композиционных материалов с заданными физико-механическими характеристиками применительно к ответственным высоконагруженным элементам конструкций.

Исследования в области клеевых соединений (КС) в авиационной и ракетно-космической технике не так обширны и в большинстве представляют собой описание и проведение эксперимента, а также получение соответствующих корреляционных зависимостей между характеристиками.

Зачастую эластомерный материал, подвергающийся большим деформациям, рассматривают как обычный упругий материал с элементами пластического течения. В ряде работ для описания процессов деформирования и деградации исполь-

зуются соотношения механики сплошных сред, что представляется ближе к реальной ситуации. Поскольку эластомерные КС применяются для соединения элементов конструкций, изготовленных из разнородных материалов, например, «металл-керамика» или «металл-композит», изучаются специфические свойства эластомерных адгезивов (их высокоэластическое состояние в процессе эксплуатации и малые значения модуля упругости), позволяющие снижать механическое напряжение в КС, возникающее при нагреве из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов. Кроме того, проводится анализ демпфирования вибрационных и ударных воздействий, возникающих в полете ЛА.

Клеевые соединения на основе эластомерных материалов в настоящее время используются во многих узлах конструкций, машин и агрегатов в различных отраслях машиностроения, нефтегазовой промышленности, судостроении, гражданской и военной авиации, медицине, приборостроении и др. В авиационной и ракетно-космической технике эластомерные КС применяются для соединения элементов конструкций, изготовленных из разнородных материалов, например, «металл-керамика» или «металл-композит». Эластомерный клеевой слой демпфирует вибрационные и ударные воздействия, возникающие в полете ЛА, и снижает вибродинамические нагрузки на элементы конструкции.

КС позволяет обеспечить ряд преимуществ по сравнению с традиционными механическими способами соединений (сварными, заклепочными, болтовыми, резьбовыми, соединениями пайкой или вальцеванием), некоторыми из которых являются снижение массы конструкции; возможность соединения элементов, состоящих из разнородных материалов и эксплуатирующихся в условиях нагрева; снижение трудоемкости и производственных затрат; предотвращение коррозии в местах контакта; создание более равномерного распределения напряжений в зоне КС, что дает возможность повысить выносливость конструкции в целом и полнее использовать прочностной ресурс склеиваемых материалов.

Определение возможностей и целесообразности применения теплостойкого клея-герметика для фиксации оболочки обтекателя ракет с переходными соединительными элементами шпангоута является сложной комплексной экспериментально-теоретической задачей.

Определение механических свойств композиционных материалов

Для описания реальных объектов создаются модели, позволяющие приближенно прогнозировать их поведение. Параметры модели определяются на основании опытных данных, получаемых при различных воздействиях на объект. Задача идентификации объекта сводится к определению программы испытаний, необходимой для корректной формулировки модели и определения ее параметров. При проектировании элементов конструкций из волокнистых композитов на первом этапе возникает задача корректного определения механических характеристик монослоя, составляющего материал. В зависимости от измеряемых величин задача определения упругих характеристик слоя по результатам испытаний однонаправленных или образцов с разной укладкой слоев приводится к системе или системам линейных уравнений, требующих анализа погрешности их решений, основанных на минимизации невязки расчетных и экспериментальных данных.

Оценка нелинейности деформационных свойств и реологии в ряде случаев сводятся к задаче чувствительности системы линейных уравнений к возмущениям. При идентификации важную роль играют оценки погрешности решений, вызванные ошибками измерения опытных данных и количеством проведенных экспериментов.

На рис. 2.1 приведено сопоставление опытных и расчетных данных по характеристикам упругости слоя, определяемым по результатам испытаний косоугольно армированных образцов.

Идентификация параметров соотношений нелинейного деформирования и реологических свойств представляет собой

комплексную проблему и не является однозначной и зависит от выбора аппроксимирующих функций или ядер наследственности в определяющих соотношениях. Развитие такого рода подходов подразумевает наличие достаточного количества экспериментальных данных.

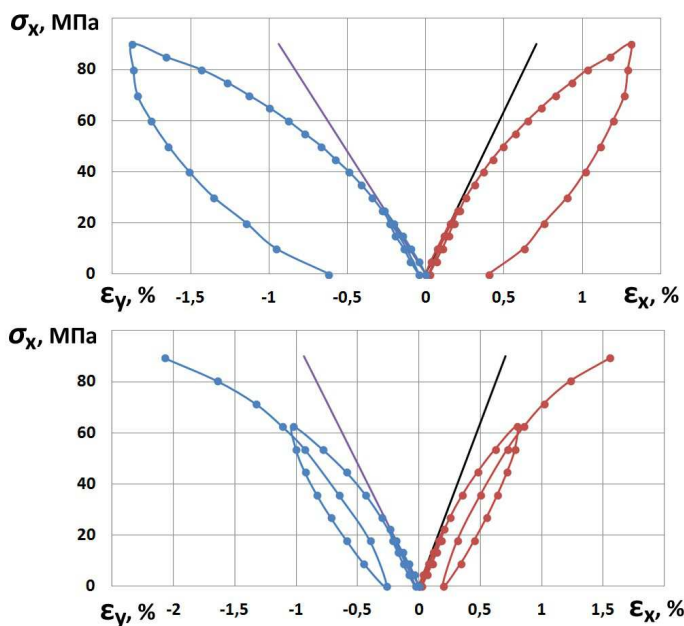


Рис. 2.1. Кривые деформирования образцов из углепластика с укладкой ± 40 . Прямые показывают соответствие характеристик упругости экспериментальным данным.

Закономерности деформирования композиционных материалов

Ниже представлена схема построения определяющих соотношений, основанная на обобщении соотношений классической теории слоистых пластин, позволяющих учитывать физическую нелинейность и реологические свойства композиционного материала. Предложенная схема апробирована на образцах

из углепластика в предположении, что нелинейные и реологические свойства слоя определяются соответствующими свойствами при сдвиге в плоскости слоя.

Нелинейное деформирование монослоя при сдвиге описывается с помощью аналитической аппроксимации кривых деформирования при сдвиге, а временные свойства с использованием операторов наследственной теории упругости. Определяющие соотношения для слоя и пакета в общем случае могут быть представлены в матричном виде:

$$(P + Qf)\bar{x} = \bar{y}, \quad (2.1)$$

где P – матрица, характеризующая упругие свойства пластины, может выполнять роль матрицы жесткости или матрицы податливости, Q – соответственно матрица, позволяющая учитывать влияние физической нелинейности материала или временных свойств, f – функция, описывающая нелинейные свойства или наследственный резольвентный оператор $R^*(\mu)$ для учета временных свойств материала.

Для получения определяющих соотношений, удобных для практического использования, разработана процедура обращения выражения (2.1), основанная на матричных преобразованиях, а для описания реологии – еще и на соотношениях алгебры резольвентных операторов.

Аналитические выражения для матриц жесткости и податливости приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} G_{xy} &= G_{xy}^0 V \text{diag}(1 - \lambda_i f) V^{-1} \\ S_{xy} &= V \text{diag} \left(\frac{1}{1 - \lambda_i f} \right) V^{-1} S_{xy}^0, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где G_{xy}^0 , S_{xy}^0 – глобальные матрицы жесткости и податливости упругой пластины, аналитическая функция f аппроксимирует кривые деформирования при сдвиге в плоскости слоя, $P^{-1}Q = V \text{diag}(\lambda_i) V^{-1}$.

Аналогичные выражения для наследственно упругой пластины примут следующий вид:

$$G_{xy}^* = G_{xy}^0 Q \text{diag}(1 - \lambda_i R^*(\mu)) Q^{-1} \quad (2.3)$$

$$S_{xy}^* = Q \text{diag}(1 + \lambda_i R^*(\mu - \lambda_i)) Q^{-1} S_{xy}^0$$

Использование такого подхода позволяет отдельно проводить исследование факторов структуры и технологии изготовления материала.

Предложенные методы построения определяющих соотношений могут быть использованы при отработке и прогнозировании механических свойств материала, при анализе аналитических решений краевых задач теории упругости, наследственной механики твердых тел, а также при численном решении краевых задач механики конструкций из композиционных материалов. На рис. 2.2 представлены опытные данные по ползучести углепластика и расчетная кривая, полученная по описанной выше схеме.

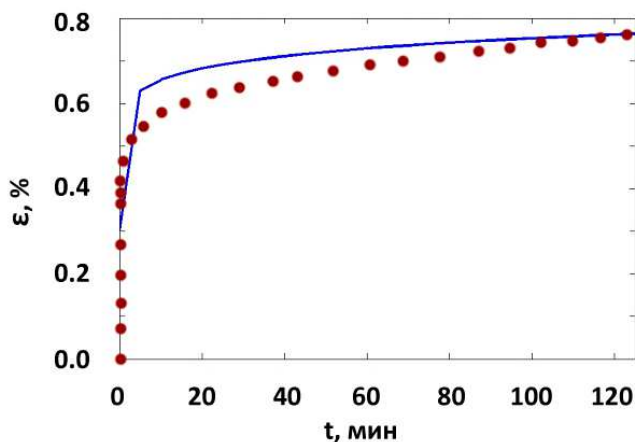


Рис. 2.2. Кривая ползучести углепластика ± 40 при растяжении.

Использование представлений (2.3) позволяет проводить оценку анизотропии реологических свойств пакета, получать в явном виде выражения материальных функций анизотропии ползучести, релаксации, комплексных модулей упругости, податливости и др., а также описывать деформирование при переменных во времени нагрузках.

Влияние наномодифицирования полимерной матрицы на механические свойства углепластика

Активное внедрение в различные области техники полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных армирующих наполнителей и полимерной матрицы вызывает необходимость расширения температурной области эксплуатации. Особенный интерес вызывают ПКМ, способные длительно и стабильно работать не только в обычных условиях, но и при температурах 250–300°С. При этом в первую очередь речь идет о повышении теплостойкости именно полимерной матрицы, так как теплостойкость армирующих наполнителей, особенно углеродных, во много раз превышает теплостойкость традиционных полимерных матриц.

Термостойкие термореактивные связующие для высококачественных ПКМ создаются на основе фенолформальдегидных, полифункциональных эпоксидных и полиимидных смол. Полифункциональность эпоксидных олигомеров обеспечивает большую плотность сшивки и термоустойчивость в отвержденном состоянии, однако она придает материалу повышенную хрупкость и ограниченную до 0,3 – 0,5% деформативность.

Для определения оптимальных режимов формования проводятся исследования методами ДСК, ДМА. Кинетические кривые, полученные методом ДСК, показывают, что у связующего с фуллеренами тепловой эффект реакции $Q_{\text{св}}$ несколько выше, чем у исходного. Зависимость скорости тепловыделения от температуры при ДСК пленки БМИ, исходной и с добавкой фуллерена, приведена на рис. 2.3(а). Зависимость скорости тепловыделения от температуры при ДСК препрега БМИЗ/3692, исходного и с добавкой фуллерена, представлена на рис. 2.3(б). При деформации полимерных композиционных материалов важно исследовать релаксационный процесс перехода связующего из стеклообразного состояния в высокоэластическое, так называемый α -переход.

Для исследования особенностей α -перехода ПКМ используют физические термические методы, среди которых широкое распространение получили методы динамического механического анализа (ДМА). Методами ДМА определяют компоненты комплексных модулей Юнга E^* или сдвига G^* при периодических изгибных или крутильных колебаниях стержней из ПКМ.

Для изучения закономерностей α -перехода чаще всего применяют температурные зависимости тангенса угла механических потерь. Этот показатель очень чувствителен к нагреву, влагонасыщению, механическим нагрузкам, другим воздействиям на материалы. Изменение температурного положения, интенсивности и формы пика можно интерпретировать как следствие структурных и физико-механических превращений в полимерах и ПКМ.

Известно, что тепловой эффект реакции отверждения связующего в препреге пропорционален его объемному содержанию. Экспериментальные данные показали, что в случае отверждения препрегов, модифицированных фуллеренами, отношение $Q_{пр}/Q_{св}$ превышает аналогичное отношение для немодифицированных препрегов при практически равном содержании связующего в препрегах, что свидетельствует об образовании большего количества связей в ходе реакции отверждения.

Для получения термостойких, технологичных и относительно дешевых связующих используют БМИ – соединения, получаемые реакцией диамина и малеинового ангидрида с последующей химической или термической имидизацией олигоамидокислоты.

При нагревании выше температуры плавления БМИ полимеризуются по свободнорадикальному механизму из-за высокой реакционной способности двойных связей. Исследование кинетики полимеризации БМИ показало, что в процессе структурирования могут образовываться сшивки линейного, лестничного или циклического строения. В дополнении к полимеризации бисмалеимиды могут также участвовать в ряде химических реакций – реакции Дильса-Альдера в присутствии подходящих диенов, реакции с двойными связями аллильного типа, во взаи-

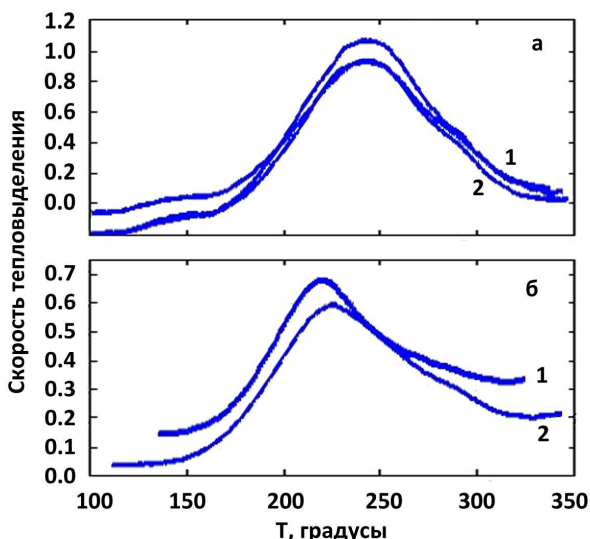


Рис. 2.3. Влияние фуллеренов (кривые 1) на зависимость скорости тепловыделения от температуры связующего БМИ-3/3692 (а – пленка связующего, б – препрег). Кривые 2 – соответствующие кривые для немодифицированных материалов.

модействии с первичными и вторичными аминами, с цианатами, изоцианатами, азометинами и эпоксидами. Способность бисмалеимидов к такому множеству реакций привела к разработке большого ряда промышленных олигомеров и связующих. После отверждения при температуре 200 – 300°C БМИ образуют хрупкие сшитые системы, способные к эксплуатации вплоть до 230°C.

Свойства отвержденных БМИ, особенно температура стеклования, деформационная теплостойкость, трещиностойкость, существенно зависят от химического состава олигомера и соотношения БМИ: отвердителя, условий отверждения и особенно условий термообработки, которую проводят при температуре 200 – 250°C вплоть до 315°C в течение 2-40 ч, обычно под давлением.

Для исследования зависимости модуля и тангенса угла механических потерь углепластика от температуры применялся

динамический механический анализ (ДМА) с использованием динамического трехточечного изгиба в диапазоне частот 1-10 Гц.

Проводилась оценка влияния наномодификации на предел прочности углепластика при сжатии образцов с укладкой $(\pm 45)_5$. Образцы для испытаний были вырезаны под следующими углами: 0; 15; 30; 45; 90. Результаты испытаний на прочность при сжатии армированного углепластика БМИ-3/3692 представлены на рис. 2.4.

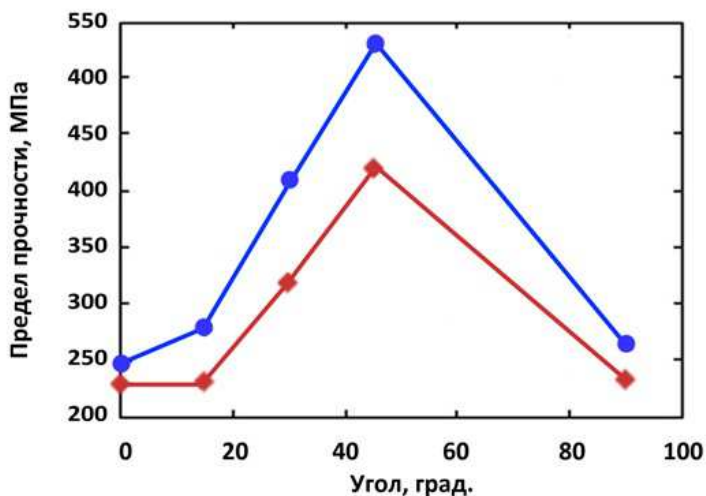


Рис. 2.4. Анизотропия предела прочности при сжатии (сплошная линия связующее наномодифицированное 3% фуллеренов).

Значительное увеличение прочности при сжатии (до 20%) достигнуто для модифицированных образцов углепластика, вырезанных под углами 30 и 45 градусов.

Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов наноструктурированием методами волнового смешивания эпоксидной смолы с нанокремнекислотными добавками и результаты экспериментального исследования волнового смешивания для повышения прочности композиционных материалов рассмотрены в [8].

На рис. 2.5 и 2.6 представлены зависимости модуля и тангенса механических потерь модифицированного фуллеренами и немодифицированного (контрольный) углепластика от температуры. Из рисунков видно, что в модифицированном углепластике в диапазоне температур до 300°C наблюдается увеличение пика модуля потерь, что приводит к снижению вероятности образования хрупкой трещины в матрице, таким образом, повышаются предел прочности и вязкость разрушения.

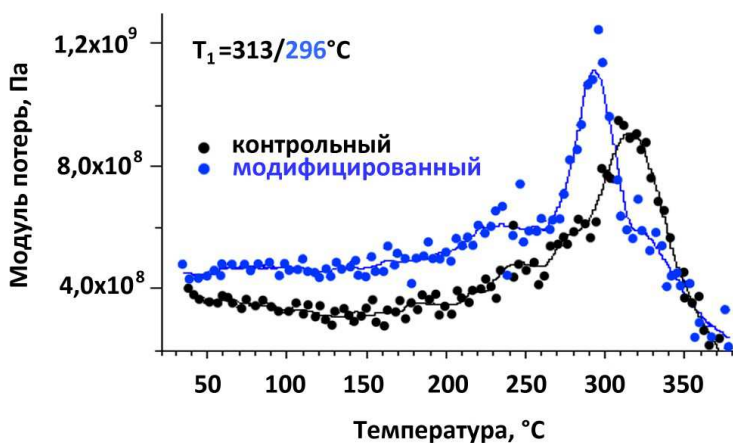


Рис. 2.5. Зависимость модуля потерь углепластика БМИ-3/3692 от температуры.

Исследования микроструктуры модифицированных и контрольных образцов углепластиков проводились с использованием электронного сканирующего микроскопа EVO 40 XVP. В результате исследований показано – наномодифицирование изменяет морфологию полимерной матрицы (рис 2.7, 2.8), что согласуется с известными данными. Это предположение хорошо подтверждается данными серии экспериментов по определению пределов прочности углепластиков при растяжении, сжатии и изгибе, а также модулей упругости при растяжении (Таблица 2.1).

Проведенные эксперименты показали, что достичь эффекта увеличения прочностных показателей углепластика при нано-

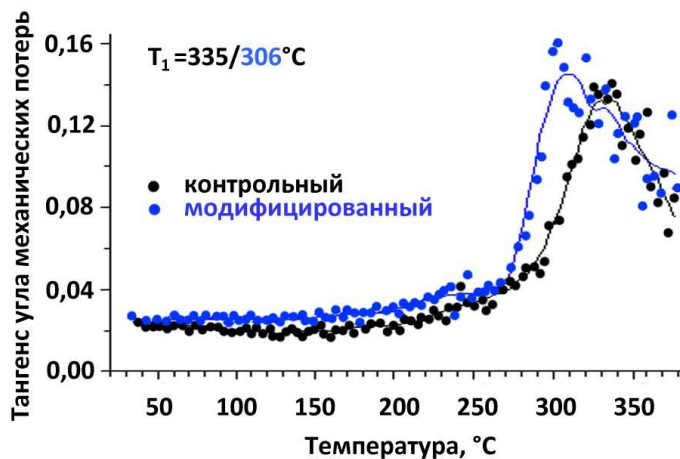


Рис. 2.6. Зависимость тангенса угла механических потерь ($\text{tg } \delta$) углепластика БМИ-3/3692 от температуры.

модифицировании полимерной матрицы можно простым механическим перемешиванием с определенной скоростью.

Модифицирование приводит к повышению вязкости разрушения матрицы. Образующие трещины не распространяются прямолинейно, а проходят волнообразно.

Клеевые соединения

Применение клеевых соединений (КС) на основе жестких и эластомерных полимеров позволяет обеспечить ряд преимуществ по сравнению с традиционными механическими способами соединений (сварными, заклепочными, болтовыми, резьбовыми, соединениями пайкой или вальцеванием), некоторыми из которых являются: снижение массы конструкции; возможность соединения элементов, изготовленных из разнородных материалов и эксплуатирующихся в условиях нагрева; снижение трудоемкости и производственных затрат; предотвращение коррозии в местах контакта; создание более равномерного распределения напряжений в зоне КС и позволяет демпфировать ударные нагрузки. Описанные преимущества позволяют повысить вынос-

Таблица 2.1. Физико-механические характеристики углепластика

Наименование показателя	Углепластик (контрольные образцы)	Углепластик (наномодифицированные образцы)	Показатель увеличения предела прочности
Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}^0$, МПа	510	668	1.31
Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}^{90}$, МПа	508	615	1.21
Предел прочности при растяжении $\sigma_{раст}^0$, МПа	689	751	1.10
Предел прочности при растяжении $\sigma_{раст}^{90}$, МПа	590	640	1.10
Предел прочности при межслоевом сдвиге τ_{xz} , МПа	53.7	67.4	1.26

ливость конструкции в целом и полнее использовать прочностной ресурс склеиваемых материалов.

Область применения КС настолько обширна, что затрагивает практически все отрасли современной промышленности. В строительстве КС используются для соединения железобетонных элементов в сборном мостостроении и при устройстве дорожных покрытий, при ремонте и усилении строительных конструкций, подвергаемых действию перерезывающих, изгибающих и динамических нагрузок, а также для крепления облицовочных и изоляционных материалов.

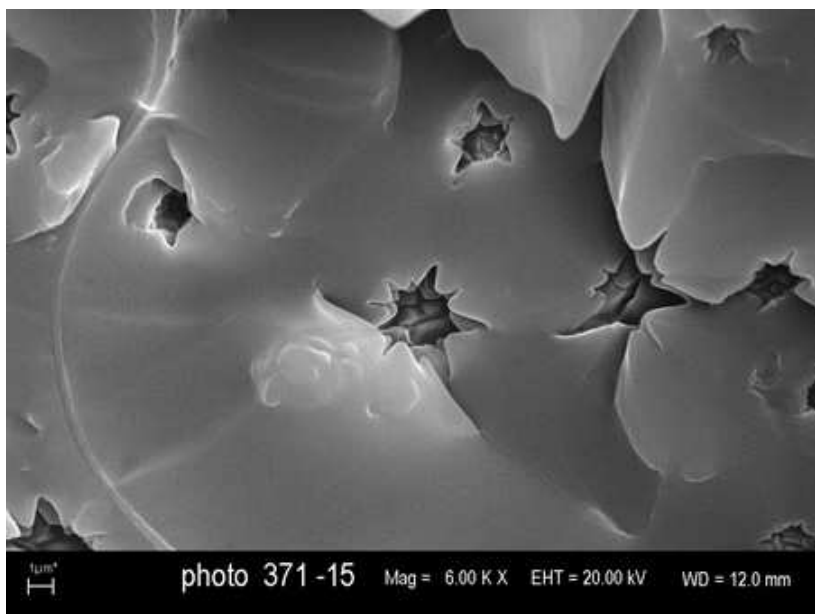


Рис. 2.7. Микроструктура связующего в контрольном образце; увеличение 60000; показано зарождение трещины

В авиационной промышленности КС с большим успехом используются для уменьшения массы ЛА и снижения концентрации напряжений вокруг заклепочных соединений, приводящих к образованию усталостных трещин, что позволяет увеличивать подъемную массу и срок службы ЛА. В конструкции современных военно-транспортных, крупно-грузовых, а также среднемагистральных пассажирских самолетов велика доля КС.

В авиационной и ракетно-космической технике эластомерные КС применяются для соединения элементов конструкций, изготовленных из разнородных материалов, например, «металл-керамика» или «металл-композит». Специфические свойства эластомерных адгезивов (их высокоэластическое состояние в процессе эксплуатации и малые значения модуля упругости) позволяют снижать механическое напряжение в клеевом соединении, возникающее при нагреве из-за различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов. Кроме того, эластомерный клеевой

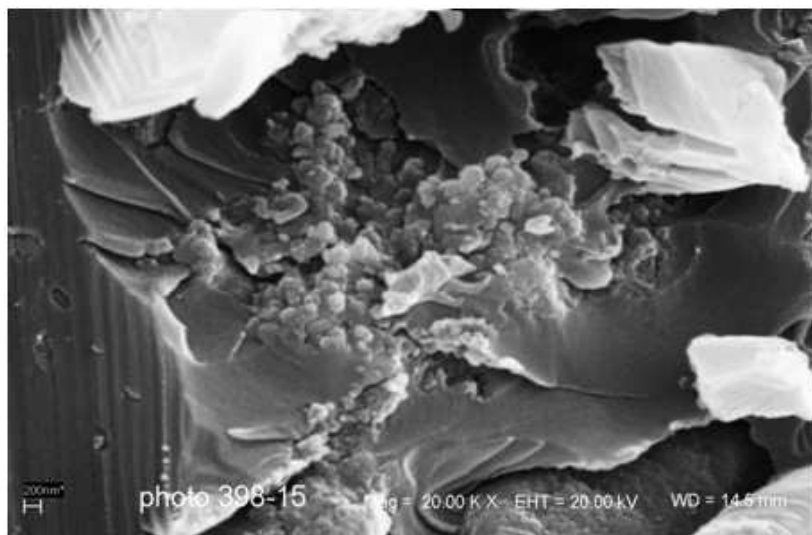


Рис. 2.8. Микроструктура связующего в наномодифицированном образце; увеличение 20000.

слой демпфирует вибрационные и ударные воздействия, возникающие при эксплуатации ЛА, и снижает вибродинамические нагрузки на элементы конструкции.

Такие производители авиалайнеров как Boeing, Lockheed, Airbus, «Ильюшин», «Туполев» и «Яковлев» и др. в своих конструкциях успешно применяют КС, площадь которых может достигать нескольких тысяч квадратных метров в одном изделии.

Предельное состояние КС

В общем случае прочность клеевого соединения определяется как прочностью самого клея, так и прочностью адгезии клея к субстрату.

Как правило, используемые в технике клеевые соединения в процессе эксплуатации подвергаются сдвиговым нагрузкам [20] (рис. 2.9).

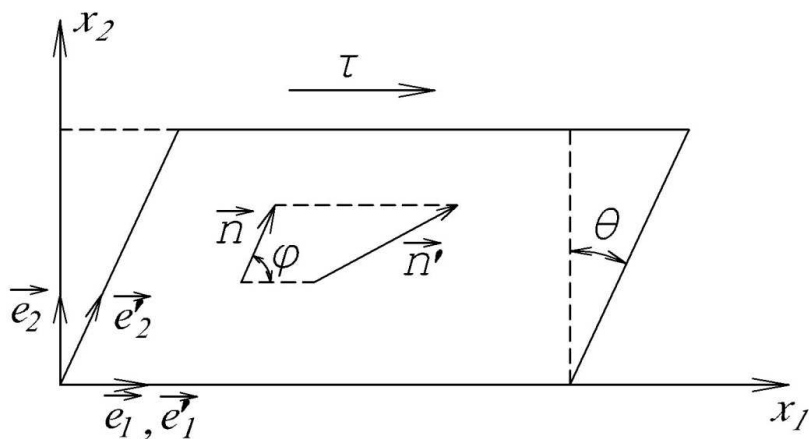


Рис. 2.9. Схема деформирования КС при сдвиге.

Проводится анализ перемещений в плоскости КС и определяется максимальное значение кратности растяжения и направление, в котором это удлинение происходит. Максимальное значение кратности растяжения оказывается равным [20]

$$\lambda_{max}^2 = 1 + \frac{k^2}{2} + \sqrt{k^2 + \frac{k^4}{4}}, \quad (2.4)$$

где величина сдвига $k = \operatorname{tg} \theta$.

Угол, при котором имеет место максимальное удлинение отрезка, поворачивается против часовой стрелки начиная от 45° и определяется следующим выражением

$$\varphi_*(k) = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{k}{2} + \frac{\pi}{4} \quad (2.5)$$

Предполагается, что разрушение при сдвиге наступит, когда величина кратности удлинения достигнет предельного значения λ_{max} , определяемого из испытаний на одноосное растяжение.

$$k_{max} = \lambda_{max} - \frac{1}{\lambda_{max}}$$

Распространение трещин происходит в направлении, перпендикулярном направлению максимального удлинения.

Предполагается, что клеевой слой может моделироваться неогуковым телом или телом Муни-Ривлина. Соответствие расчетных и опытных данных приведено на рис. 2.10.

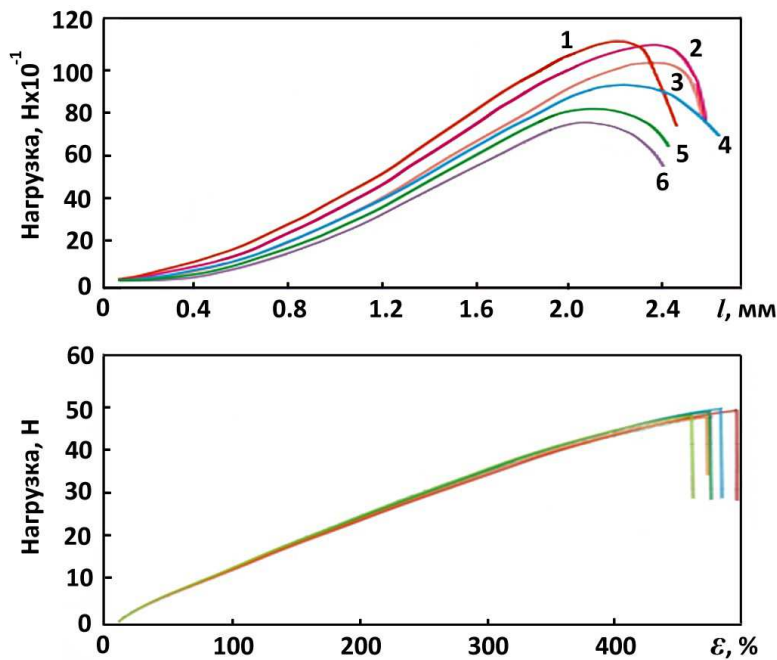


Рис. 2.10. Зависимости нагрузка-перемещение образцов герметика на сдвиг и нагрузка-деформация на разрыв.

Разрушение при разрыве происходит по плоскости сечения образца в одной плоскости, а разрушение при сдвиге имеет регулярный характер и движется по плоскостям, перпендикулярным направлению максимальных кратностей растяжения и происходит по схеме, подобной разрушению пучка волокон, что объясняет наличие участка разгрузки на кривой нагрузка-перемещение.

Предполагается, что деформирование КС при растяжении может быть описано неогуковым телом или телом Муни-Ривлина. Соответствие расчетных и опытных данных приведено на рис. 2.11.

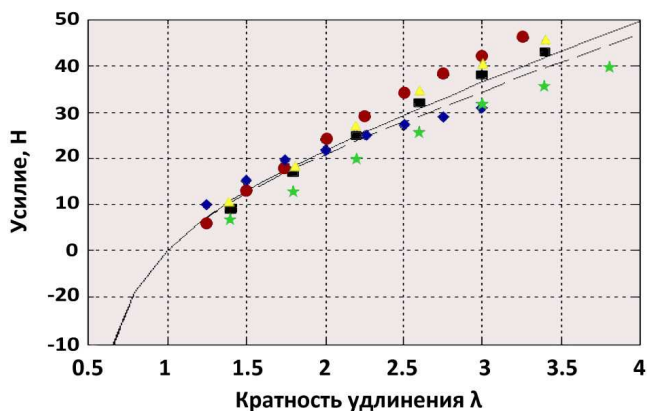


Рис. 2.11. Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Сплошная линия – тело Муни-Ривлина, штриховая – неогуково тело.

Компоненты тензора напряжений для несжимаемого тела в матричной форме определяются с помощью следующего выражения

$$T = -pI + 2\frac{\partial W}{\partial I_1}B - 2\frac{\partial W}{\partial I_2}B^{-1}, \quad (2.6)$$

где W – энергия деформации, B – левый тензор Коши-Грина.

Сдвиговые напряжения в герметике цилиндрической оболочки определяются соотношением

$$\tau_{kc} = \frac{PR}{2L_{kc}}, \quad (2.7)$$

где P – давление на днище оболочки, R – радиус оболочки, L_{kc} – длина клеевого слоя.

Предельные значения сдвиговых напряжений для неогукова тела и тела Муни-Ривлина определяются соотношениями

$$\begin{aligned}\tau_{12}^* &= \mu k_* = \mu \left(\lambda_* - \frac{1}{\lambda_*} \right) \\ \tau_{12}^* &= (\mu_1 + \mu_2) k_* = (\mu_1 + \mu_2) \left(\lambda_* - \frac{1}{\lambda_*} \right)\end{aligned}\quad (2.8)$$

Оценочные значения для предельных значений кратности растяжения и напряжений при растяжении $\lambda_* \geq 4$, предельное значение напряжений $\tau_{12}^* \approx 3.5 - 3.8$ МПа.

Приемлемый для практического использования результат был получен для образцов, изготовленных из материалов, идентичных материалам реальных конструкций ЛА.

Ползучесть и длительная прочность КС при повышенных температурах

В процессе эксплуатации склеенные конструкции ЛА подвергаются длительным силовым нагрузкам в условиях прогрева узла клеевого соединения до критических для адгезива температур. В конструкциях ЛА широко применяются клеевые соединения деталей из композиционных, керамических и металлических материалов. При этом в качестве адгезива, используются высокоэластические полимерные клеи-герметики типа Висксинт, получаемые на основе низкомолекулярных каучуков.

Наиболее ценной особенностью герметиков типа Висксинт является стабильность рабочих характеристик при длительной эксплуатации в условиях резких перепадов температур, повышенных вибраций, УФ- и радиационного облучения, высоких теплосиловых нагружений в конструкции ЛА. Учитывая, что возникающие в клеевом соединении нагрузки носят, как правило, сдвиговой характер в широком диапазоне температур, то для каждого типа герметика определяются зависимости прочности клеевого соединения при сдвиге в широком диапазоне температур, характерных для условий эксплуатации конструкции. Причем максимальное значение температуры не ограничивается паспортными значениями прочности герметика, т.к. в

определенных случаях конструкция ЛА должна сохранять хотя бы непродолжительное время несущую способность при более высоких температурах. На практике прочность при сдвиге КС, как правило, определяется с использованием разрывных машин, обеспечивающих возрастающее по мере сдвига нагружение до разрушения клеевого соединения. Однако, в условиях эксплуатации конструкции подвергаются длительному статическому нагружению, при котором с ростом температуры в большей степени начинают проявляться временные свойства герметика, которые обуславливают зависимость прочности герметика не только от величин теплосилового нагружения, но и от времени его воздействия.

На основании результатов экспериментального исследования эластомерных адгезивов в условиях, приближенных к эксплуатационным, установлено, что при продолжительном теплосиловом воздействии на конструкцию ЛА клеевое соединение конструкции фактически работает в условиях сдвиговой ползучести. Для исследования длительной прочности и ползучести эластомерных адгезивов разработана и создана экспериментальная установка, позволяющая проводить натурные испытания клеевых соединений на основе эластомерных клеев-герметиков на стандартных образцах. Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.12.

Образец представляет собой клеевое соединение металлической пластины из сплава инвар и беспористой стеклокерамики. В качестве адгезива использовался эластомерный герметик Викасинт У-2-28, схема образца приведена на рис. 2.13.

С помощью созданной экспериментальной установки проведены испытания образцов на долговечность при различных уровнях сдвиговой нагрузки и температурах 300, 310, 320 и 330 °С. Проведенные исследования показывают, что наиболее интенсивная потеря прочностных свойств герметика происходит при температурах эксплуатации свыше 280 – 300°С, поэтому данные о его долговечности в температурном диапазоне 300 – 330°С имеют практический интерес.

На созданной экспериментальной установке проведено исследование механических свойств клеевых соединений на осно-

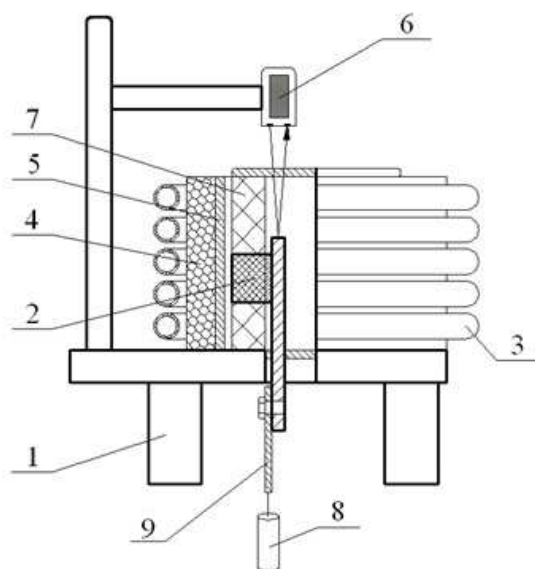


Рис. 2.12. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – опора, 2 – испытываемый образец КС, 3 – индуктор, 4 – теплозащита индуктора, 5 – промежуточный нагревательный элемент, 6 – триангуляционные лазерные датчики перемещения, 7 – керамический теплоизолятор (имитатор оболочки), 8 – груз, 9 – пластина.

ве высокоэластического кремнийорганического клея-герметика Вискит У-2-28НТ, используемого при производстве конструкций ЛА. Получены экспериментальные зависимости длительной прочности и ползучести клея-герметика при разных уровнях нагрузки и температуры (рис. 2.14, 2.15).

На рис. 2.16 приведены изображения некоторых образцов после проведения испытаний, из которых видно, что разрушение образцов носит когезионный характер. Последнее также свидетельствует о выполнении типовых требований к качеству подготовки склеиваемых поверхностей при сборке образцов.

Для расчета долговечности КС выбиралась степенная зависимость с вариацией зависимости коэффициентов соотношения от времени. Учет влияния температуры в данном интервале осуществляется с помощью температурно-временной суперпо-

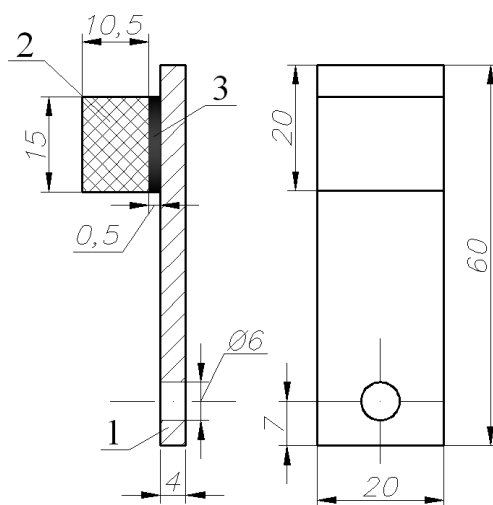


Рис. 2.13. Схема образца КС (1 - металлическая пластина, 2 - керамическая призма, 3 - клеевой шов)

зиции. Единая кривая долговечности КС после смещения приведена на рис. 2.17.

На рис. 2.18 приведено сравнение экспериментальных и расчетных данных.

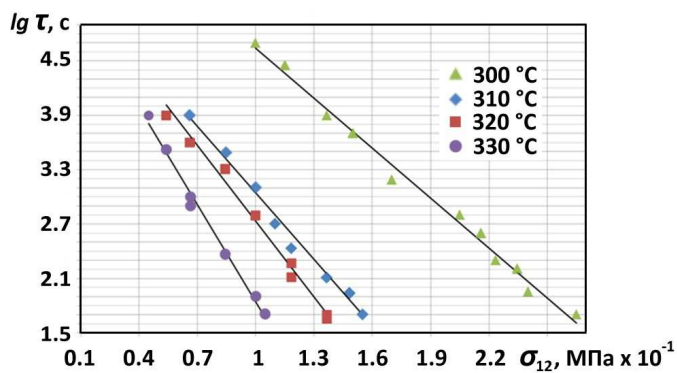


Рис. 2.14. Кривые долговечности герметика.

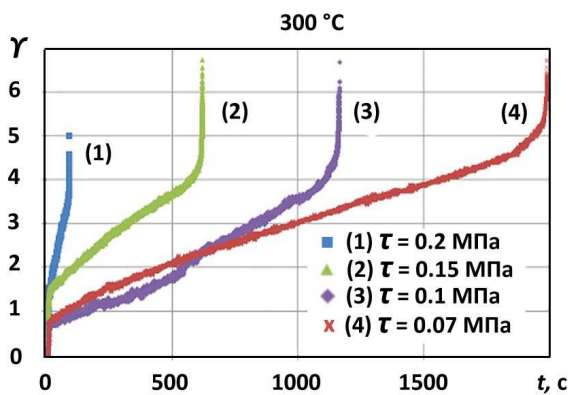


Рис. 2.15. Кривые ползучести Виксинт У-2-28НТ при $\tau = 300^\circ C$.



Рис. 2.16. Внешний вид образцов КС после испытаний

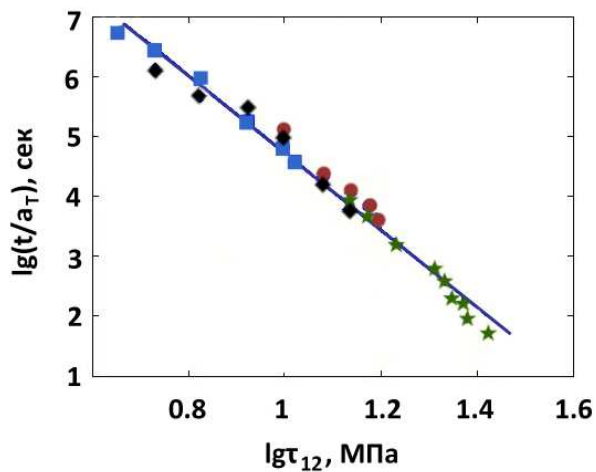


Рис. 2.17. Единая кривая долговечности КС «металл-герметик-керамика»

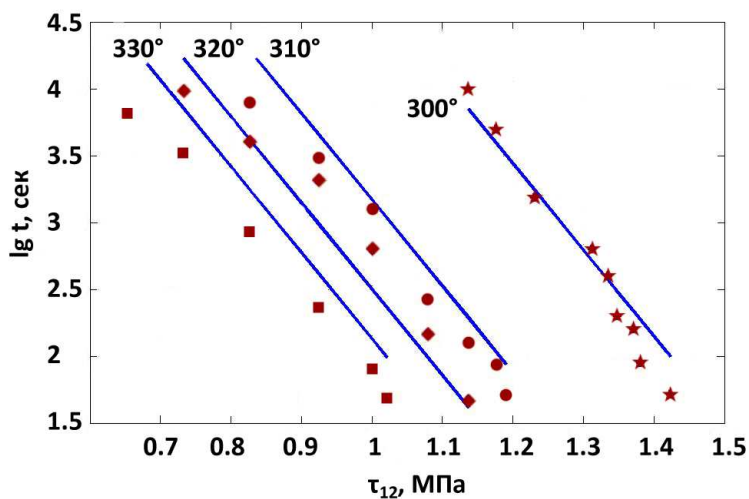


Рис. 2.18. Расчетные кривые долговечности и сравнение с экспериментальными данными.

3. Наземная отработка элементов конструкций ракетно-космической техники

Наземная отработка является непременным условием успешного проведения ОКР по разработке конструкций ЛА. Работы по наземной отработке конструкций ракетно-космической и авиационной техники проводятся на предприятиях ракетно-космической промышленности России в ЦАГИ, «Компании «Сухой», ОАО «РКК «Энергия», «ОНПП «Технология», ОАО «ЦНИИСМ» и др. Наземная отработка опытного образца проводится в несколько этапов, включающих в себя оценочные и исследовательские испытания. Завершающий этап наземной отработки включает в себя проведение предварительных испытаний опытного образца на соответствие требованиям технического задания, а также испытания по подтверждению заданных технического ресурса и срока хранения (испытания на ускоренное старение).

Научно-методическое обеспечение испытаний дает возможность определять показатели качества разрабатываемых изделий для своевременного внесения изменений в конструкцию или технологический процесс для достижения заданного уровня надежности. Исходя из этого, организация наземной отработки строится в виде процесса с эффективными обратными связями, позволяющими определять необходимость доработки конструкции или корректировки техпроцесса изготовления изделия.

Испытания элементов конструкций при наземной отработке

Испытания занимают важнейшее место в системе наземной отработки конструкций летательных аппаратов (ЛА) авиационной и ракетно-космической техники.

Целью испытаний при наземной отработке конструкций ЛА является проверка и экспериментальное подтверждение способ-

ности конструкции сохранять заявленные технические параметры в пределах норм, указанных в документации, в процессе и после внешнего воздействия, соответствующего эксплуатационному. Основной задачей при проведении испытаний в наземных условиях является максимальное приближение осуществляемых на конструкцию воздействий к воздействиям, испытываемым конструкциями в процессе эксплуатации ЛА. Решение данной задачи возможно только при постоянной разработке новых методов и совершенствовании существующих технических средств испытаний конструкций ЛА, что позволяет повышать достоверность и информативность получаемых при испытаниях результатов.

В процессе наземной отработки конструкции ЛА проходят весь цикл наземных испытаний, соответствующих эксплуатационным, которые охватывают целый спектр внешних воздействий (статические, вибродинамические, климатические, тепло-силовые, термовакуумные и другие), а также контроль сохранения заданных технических параметров и характеристик конструкции в процессе и после указанных видов воздействия.

Для воспроизведения вибродинамических эксплуатационных воздействий в наземных условиях обычно используют стандартные вибрационные стенды и установки, однако, в процессе эксплуатации конструкция ЛА испытывает более сложные термовибрационные воздействия.

Для изучения устойчивости конструкций ЛА к термовибрационным воздействиям используется стенд с климатической накатной камерой и дополнительным нагревательным устройством для испытаний конструкций ЛА на комплексное воздействие вибрации, тепла и холода (рис. 3.1).

Стенд обеспечивает воздействие на объект испытаний массой до 300 кг синусоидальной, широкополосной случайной вибрации и виброудара с параметрами ускорения до 50g в полосе частот 5-2000 Гц при температуре $-70 - 180^{\circ}\text{C}$ (с дополнительным нагревателем до 500°C) и влажности до 5-98% (при температуре $0 - 98^{\circ}\text{C}$).

Стенд также позволяет проводить в наземных условиях исследования зависимости амплитудно-частотных характеристик



Рис. 3.1. Стенд для испытаний конструкций ЛА на комплексное воздействие вибраций тепла и холода в составе вибростенда и накатной климатической камеры. 1 – вибродинамическая система, 2 – накатная климатическая камера, 3 – нагревательное устройство, 4 – испытуемая конструкция ЛА; 5 – акселерометр, 6 – термопары

(АЧХ) конструкций ЛА от параметров комплексного термо-вибрационного воздействия, а также по результатам исследований строить динамически-подобные модели конструкций. На рис. 3.2 приведены АЧХ двух реальных конструкций головных конструкций ЛА.

В условиях постоянно растущей скорости и высоты полета современных и перспективных ЛА их эксплуатация зачастую происходит при пониженном и вакуумметрическом давлении верхних слоев атмосферы и космического пространства. В данных эксплуатационных условиях особое значение имеет способность конструкции ЛА сохранять герметичность в условиях термовакуумных воздействий. Для подтверждения в наземных

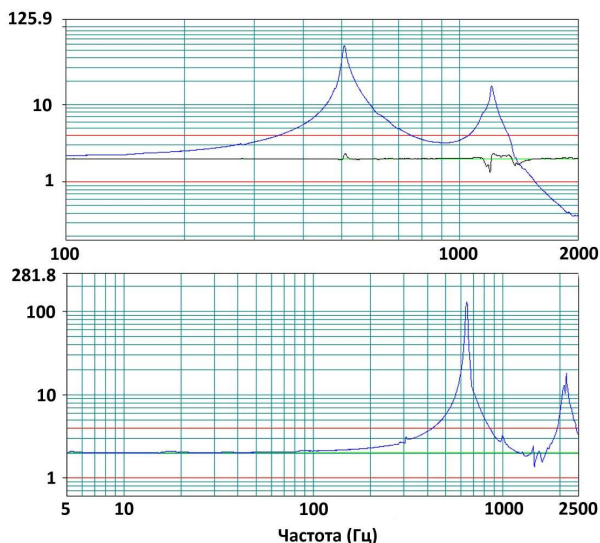


Рис. 3.2. Амплитудно-частотные характеристики конструкций ЛА.

условиях стойкости и герметичности конструкций ЛА создан специальный стенд термовакuumных испытаний (рис. 3.3), позволяющий обеспечивать тепловое воздействие на конструкцию ЛА до температуры 1600°C с темпом нагрева до $300\text{C}/\text{c}$ в условиях вакуума не менее 5 мм рт. ст. (и без нагрева не менее $1 \cdot 10^{-4}\text{ мм рт.ст.}$).

Основу стенда составляет вакуумная камера объемом 0.8м^3 и специальный индукционный или гибкий тканый нагреватель (рис. 3.4).

Использование нового индукционного способа теплового нагружения конструкций летательных аппаратов позволяет повысить точность воспроизведения программ испытаний путем повышения равномерности температурного поля, а также позволяет упростить процесс преобразования электрической энергии в тепловую при проведении комплексных термовакuumных и термовибрационных испытаний.

Кроме того, индукционный способ теплового нагружения позволяет осуществлять выборочный локальный нагрев отдель-



Рис. 3.3. Стенд для термовакуумных испытаний конструкций ЛА на комплексное воздействие вакуума и тепла в составе вакуумной камеры, силовых генераторов при использовании индукционных нагревателей и РНТТ при использовании гибких углеродных (тканых) нагревателей. 1 – вакуумная камера, 2 – гермотоководы, 3 – гелиевый течеискатель, 4 – система управления нагревом, 5 – система управления и регистрации параметров испытаний

ных металлических или металлизированных элементов и узлов конструкций ЛА. На рис. 3.5 представлен внешний вид установки для нагрева узла клеемеханического байонетного соединения металлических шпангоутов конструкций ЛА.

Для исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных конструкций ЛА, изготовленных из композиционных материалов, разработан и создан стенд на основе рентгеновского томографа (рис. 3.6) с использованием системы вакуумирования (до давления 1 мм рт.ст.) и системы создания избыточного давления (до 0,8 МПа). Рентгеновский томограф обеспечивает контроль изменения диаметра (дру-

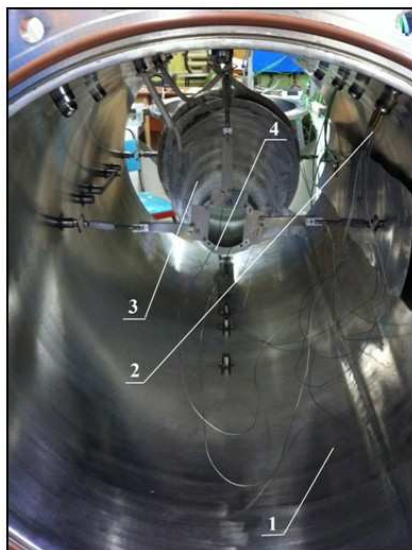


Рис. 3.4. Стенд для термовакуумных испытаний конструкций ЛА (вид изнутри). 1 – вакуумная камера, 2 – термопарный гермоввод, 3 – индукционный нагреватель, 4 – промежуточный нагревательный элемент

гих размерностей) и толщины стенки с точностью ± 15 мкм, образования дефектов с размерами более 10 мкм при создании заданного перепада давления на стенке конструкции в выбранных сечениях.

Испытания клеевых соединений

Непрерывное увеличение дальностей полета разрабатываемых и создающихся ЛА приводит к росту длительностей теплосилового воздействия на узлы и элементы конструкции ЛА, что зачастую определяет их работоспособность. Особое значение увеличение длительностей воздействия имеет для конструкционных элементов на основе материалов, обладающих реономными (зависящими от времени) свойствами. К таким материалам, прежде всего, относятся высокоэластичные полимерные



Рис. 3.5. Экспериментальная установка для исследований узла клеемеханического байонетного соединения шпангоута ЛА. 1 – опора, 2— конденсаторная батарея, 3 – индукционный нагреватель, 4 – узел клеемеханического байонетного соединения, 5 – автономная система охлаждения индуктора, 6 – термопары

(эластомерные) материалы, использующиеся в качестве адгезивов для соединения элементов конструкций ЛА, изготовленных из разнородных материалов (металл – керамика, металл – композит и т.д.).

Для исследований процессов ползучести, а также длительной прочности и долговечности клеевых соединений систем из разнородных материалов на основе эластомерных адгезивов разработана и создана экспериментальная установка (рис. 3.7).

Внешний вид стандартных образцов клеевого соединения системы «металл-керамика» на основе эластомерного клея-герметика типа Висксинт до и после проведения испытаний на длительную прочность на созданной экспериментальной установке приведены на рис. 3.8, соответственно.



Рис. 3.6. Стенд исследований напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций ЛА из композиционных материалов.



Рис. 3.7. Экспериментальная установка для исследований процессов ползучести, длительной прочности и долговечности клеевых соединений системы «металл-керамика». 1 – испытуемый образец, 2 – индукционный нагреватель, 3 – измерительный прибор, 4 – лазерный датчик перемещения



Рис. 3.8. Стандартные образцы клеевого соединения системы «металл-керамика» на основе эластомерного клея-герметика типа Виксинт до испытаний (слева) и после проведения испытаний (справа)

Заключение

Приведены некоторые результаты автора в области механики композиционных и полимерных материалов, показывающие преимущества их использования в конструкциях летательных аппаратов.

Перспективность использования композиционных материалов заключается в возможности достижения весового совершенства конструкций, повышенных характеристик сопротивления теплосиловым воздействиям, коррозии, агрессивным средам, а также жесткости, трещиностойкости и долговечности.

Возможности технологического и структурного регулирования физико-механических свойств, в том числе с применением нанотехнологий, при расчете и проектировании конструкций летательных аппаратов вызывают необходимость разработки новых подходов в механике композиционных материалов и конструкций, включая использование результатов физических методов исследования механических свойств.

Пристальное внимание необходимо обратить на экспериментальные исследования и методы корректного определения механических свойств композиционных материалов в связи с паспортизацией, стандартизацией и сертификацией испытаний материалов и элементов конструкций.

Для оценки физико-механических характеристик неметаллических материалов, таких как углепластики, стеклопластики, керамика и полимеры, и обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик конструкций из них, требуется разработка структурно-феноменологических моделей расчета и прогнозирования их механических свойств и совершенствования численных методов оценки напряженно деформированного состояния.

Подчеркивается необходимость проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований для установления связи между результатами лабораторных испытаний

и данных, полученных в результате наземной отработки конструкций.

Для решения проблем материаловедения в машиностроении и ускорения внедрения неметаллических и, в частности, композиционных материалов в производство широкой номенклатуры высокотехнологичных и конкурентоспособных товаров и изделий различного назначения необходимо применение фундаментальных научных знаний в инновационных прикладных исследованиях.

Результаты работы автора находят практическое применение при разработке материалов и конструкций ракетно-космической и авиационной техники.

Литература

1. Ганиев Р.Ф. Проблемы механики машин и технологий, перспективы развития института машиноведения им. А.А. Благонравова // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 3. – 2010. – С. 3-20.
2. Ганиев Р.Ф. О современном состоянии и перспективах развития ИМАШ РАН. Проблемы механики машин и прорывных технологий // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 3. – 2014. – С. 11-36.
3. Косарев О.И. Важнейшие научные направления и достижения науки о машинах - машиноведения // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 3. – 2014. – С. 5-10.
4. Матвиенко Ю.Г. Моделирование и критерии разрушения в современных проблемах прочности, живучести и безопасности машин // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 3. – 2014. – С. 80-89.
5. Махутов Н.А. Проблемы прочности, ресурса и безопасности машинных систем // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 3. – 2014. – С. 50-68.
6. Романов А.Н. Роль структурного состояния в формировании деформационных, прочностных, трибологических и технологических свойств конструкционных материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 3. – 2014. – С. 69-79.
7. Research and development: essential foundation for U.S. competitiveness in a global economy. A Companion to Science and Engineering Indicators – 2008. National Science Board. – 2008.
8. Ганиев Р.Ф., С.Р. Ганиев, Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии и инновационном машиностроении. – Под ред. акад. Р.Ф. Ганиева. М.: 2014. 106 с.

9. Думанский А.М., Таирова Л.П., Горлач И. Алимов М.А., Расчетно-экспериментальное исследование нелинейных свойств углепластика // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 5. – 2011. – С. 91-97.
10. Думанский А.М., Алимов М.А., Таирова Л.П., Горлач И. Структурно-феноменологическая идентификация неупругих свойств слоистых углепластиков // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 6. С. 10-16.
11. Алимов М.А., Думанский А.М., Радченко А.А. Анализ нелинейности деформирования при одноосном растяжении косоугольно-армированного углепластика // Проблемы машиностроения и надежности машин.- № 2. – 2012. – С. 39-44.
12. Смердов А.А., Думанский А.М., Таирова Л.П. Комплексные экспериментальные исследования деформативных и прочностных свойств композитов для отсеков и обтекателей ракет-носителей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2012. – с. 124-136.
13. Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А. Анализ нелинейного поведения композитных материалов при одноосном растяжении // Информатизация и связь. 2013. – № 1. С. 69-72.
14. Dumansky A.M., Tairova L.P. Analysis of nonlinear mechanical behaviour of carbon fibre reinforced polymer laminates // Proceedings of the Third International Conference on Advanced composite materials and technologies for aerospace applications (ACMTAA, May 13-16, 2013, Wrexham, North Wales, United Kingdom. PP. 66-69.
15. Думанский А.М., Русланцев А.Н., Таирова Л.П. Модель нелинейного деформирования углепластиков // Конструкции из композиционных материалов № 4. 2013. с. 6-12.
16. Dumansky A.M., Tairova L.P. The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of cross ply carbon

reinforced plastic // World Congress on Engineering 2007, V.II.
- London, UK 2-4 July, 2007. – PP. 1346-1351.

17. Dumansky A.M., Tairova L.P. Construction of hereditary constitutive equations of composite laminates // Proceedings of the Second International Conference on Heterogeneous Material Mechanics "Advances in Heterogeneous Material Mechanics June 3-8, Huanshan, China. –DEStech Publications, Inc. 2008. PP. 934-937.
18. Dumansky A.M., Tairova L.P. A Method for the Construction of Hereditary Constitutive Equations for Laminates Bases on Hereditary Constitutive Equation for a Layer // In: Current Themes in Engineering Science. Editor: Prof. Alexander M. Korsunsky. AIP conference proceedings 1045. 2008. PP. 71-80.
19. Dumansky A.M., Tairova L.P. Time-dependent behavior of carbon fibre reinforced laminates // Proceedings of the Second International Conference on Advanced composite materials and technologies for aerospace applications, June 11-13, 2012, Wrexham, North Wales, United Kingdom. – PP. 75-79.
20. Dumanskii A.M, Nepovinnykh V. I., Rusin M. Yu., and Terehin A. V. Estimating the Limit State of Sealants in Aircraft Structures // Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2014, Vol. 7, No 3, pp. 201-207.



ДУМАНСКИЙ АЛЕКСАНДР МИТРОФАНОВИЧ

доктор физико-математических наук, заместитель директора Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, зам. зав. отделом конструкционного материаловедения, профессор кафедры ракетно-космических композитных конструкций МГТУ им. Н.Э. Баумана, является специалистом в области механики композиционных материалов, наследственных сред и разрушения применительно к элементам конструкций ракетно-космической и авиационной техники.

