

УДК 678.5.067

**А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

**РОЛЬ ХАИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ НАУЧНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКУЮ ТЕХНИКУ:  
ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

В статье проведен краткий анализ результатов исследований, проводимых в ХАИ по проблеме научного обеспечения внедрения композиционных материалов в авиационно-космическую технику и показаны перспективные направления дальнейших НИОКР.

**композиционные материалы, авиационно-космическая техника**

В историческом плане проблема научного обеспечения внедрения композиционных материалов (КМ) в авиационную технику практически начала формироваться уже в первые годы существования Харьковского авиационного института, т.е. задолго до возникновения самого понятия (термина) КМ. Так, в процессе создания первого в СССР и Европе пассажирского самолета с убирающимся шасси ХАИ-1 инженером, а впоследствии профессором, И.Г. Неманом, в 1930 году возглавившем кафедру конструкций самолетов ХАИ, были реализованы его научные разработки в области несущей способности одного из самых широко распространенных прототипов композиционных материалов – фанерных обшивок крыла, фюзеляжа и хвостового оперения. Именно в фанере в определенной степени реализуется один из основных принципов композиционных материалов – возможность управления физико-механическими и прочностными свойствами в заданных направлениях [1].

Исследования И.Г. Немана в этой области уже в послевоенный период (начала 50-х годов) были обобщены им в докторской диссертации, защите которой помешал преждевременный уход из жизни автора (1952 г.).

В области создания авиационной техники с широким использованием фанеры работал в ХАИ с 1933 г. С.И. Кузьмин, построивший с коллекти-

вом энтузиастов в 1934 г. оригинальный планер «Безлонжеронка ХАИ», показавший высокие летные качества [2]. В послевоенный период уже середины 50-х годов доцент к.т.н. С.И. Кузьмин первым в ХАИ начал исследования оболочечных конструкций из стеклопластиков СВАМ.

Однако широкое развитие проблема научного обеспечения внедрения полимерных КМ в авиационных конструкциях в ХАИ получила только в начале 60-х годов, когда эти материалы начали успешно применяться в самолетах ОКБ Генерального конструктора академика НАН Украины О.К. Антонова.

Именно по инициативе О.К. Антонова в 1963 году началось многолетнее плодотворное сотрудничество ОКБ (ныне АНТК «Антонов») и ХАИ, приведшее к созданию впервые в бывшем СССР опытных закрылков и фюзеляжа самолета Ан-2М из КМ (стеклопластиков) [3 – 4], будущее и роль которых в авиастроении он позднее показал в своей работе [5].

Этот комплекс НИОКР положил начало формирования научной школы ХАИ по проблемам создания эффективных конструкций авиакосмической техники из полимерных КМ [6]. В период существования и развития этой научной школы при тесном научно-техническом сотрудничестве с АНТК «Антонов», ЦАГИ, ВИАМ, НИАТ, УкрНИИАТ, УкрНИИТМ, а также с рядом авиастроительных фирм и вузов решалась комплексная проблема создания изделий авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) из КМ, включающая в себя конструкторские, технологические, материаловедческие, эксплуатационные, экономические, экологические проблемы, а также проблему подготовки кадров высшей квалификации (рис. 1) [7].

Конструкторские проблемы в первую очередь связаны с механикой конструкций из КМ и ее разделом – структурной механикой композитов. Эти проблемы решались в ХАИ уже в начале 40-х годов как в рамках постулатов механики однородных анизотропных материалов, так и с учетом гетерогенной структуры КМ.

В рамках первого направления решалась проблема выбора оптимальных конструктивно-силовых схем (КСС) для различных агрегатов летательного аппарата из КМ [9 – 11]. Были сформулированы и теоретически обоснованы два основных подхода к выбору КСС – дифференциальный и интегральный.

Дифференциальный принцип проектирования и реализующая его КСС предполагают целенаправленное выделение конструктивных элементов, каждый из которых воспринимает вполне определенный (или ограниченное число) вид внешних воздействий [8 – 9].



Рис. 1. Проблемы создания АКТ из ПКМ

Синтезирующий принцип проектирования и реализующая его конструктивно-силовая схема предполагают интегральное восприятие агрегатом всех регламентированных видов силовых воздействий [8 – 10]. Многочисленные исследования показали, что эти КСС для одного и того же изделия реализуются при различных абсолютных значениях целевой функции в виде массы.

Ряд интересных результатов получен на основе предложенной в [12] структурной стержневой модели гетерогенного ортотропного тела. Полученные на основе модели зависимости модулей упругости, коэффициентов Пуассона и линейного расширения, а также временного сопротивления от угла армирования удовлетворительно сходятся с экспериментальными данными. Стержневая модель приводит к физически обоснованным новым критериям прочности композиционных материалов и соответствующим им предельным поверхностям. Тем самым теоретически было предсказано упрочняющее действие на КМ дополнительных осевых усилий, нормальных к основным, ранее экспериментально обнаруженное другими авторами.

В этот период решались задачи перманентного разрушения композиционных материалов под воздействием частиц в воздушном потоке, обоснования технологических способов защиты элементов авиаконструкций из КМ от эрозионного разрушения в среде эксплуатации, а также разрушения хрупких анизотропных материалов при однократном и многократном нагружении.

Значительное место в решении проблемы создания надежных конструкций летательных аппаратов (ЛА) из полимерных КМ занимают задачи обеспечения прочности стыков и соединений. Внимание к этим задачам прослеживается в течение всего периода существования научной школы ХАИ: уже в начале 70-х годов были разработаны методики проектирования и расчета на прочность типовых клеевых соединений элементов конструкций из КМ двусторонними и односторонними накладками, в том числе с их переменными параметрами на нелинейно-упругих и упруго-пластичных клеях [13]. Класс исследуемых соединений перманентно расширялся, пополнялся дискретными соединениями с элементами продольных и поперечных связей. Обобщение и развитие задач стыков и соедине-

ний к началу 90-х годов привело к оформлению нового научного направления в общей проблеме создания эффективных конструкций ЛА из композиционных материалов, связанного с разработкой принципов и методов синтеза параметров металлокомпозитных гетерогенных структур (МКГС) авиаконструкций [14].

В рамках этого направления были получены следующие результаты:

- сформулированы, теоретически и экспериментально обоснованы принципы конструирования МКГС и разработана методология проектирования агрегатов самолета с их учетом, предложены количественные критерии оценки полноты их реализации;

- обоснованы подходы к построению методик проектирования МКГС с учетом усталостной долговечности и необходимого экспериментального обеспечения;

- исследованы взаимозависимости общих геометрических характеристик агрегатов из КМ типа крыла и конструктивно-технологических параметров МКГС в составе стыковых узлов, позволившие сделать вывод о необходимости решения задач проектирования нерегулярных зон и стыков на более ранних этапах, чем для металлических конструкций. Показано, что предложенные КТР позволяют значительно уменьшить относительную толщину профиля и длину нерегулярной зоны, а также повысить уровень предельных значений удельной нагрузки на крыло.

Существенные результаты получены научной школой ХАИ и в области научного обеспечения технологии производства конструкций ЛА из КМ.

Разработана новая технология получения композиционных материалов с термопластичной матрицей, основанная на рассмотрении полимерного волокна как состояния матричного компонента, в котором он совмещается с армирующими волокнами. Такой подход позволил на базе имеющихся крупнотоннажных нитей получить новые конструкционные материалы с более высокими и стабильными прочностными характеристиками и сделал возможным ранее технически неосуществимое изготовление из них определенной номенклатуры изделий. При этом улучшились условия труда и снизились отходы.

В результате моделирования основных этапов технологического процесса получения композитов найдены значения параметров, при которых

он реализуется с минимальными затратами времени и энергии, а также оптимальные режимы охлаждения, продолжительность выдерживания при наибольшей температуре формования, закономерности воздействия вакуумирования и формующего давления.

Разработано научное обеспечение реализации рациональных процессов формования панельных авиаконструкций из КМ с регламентированным уровнем технологических напряжений.

На основе допущений, следующих из специфики технологического процесса формования, и общих уравнений механики деформированного твердого тела получены аналитические выражения для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) в панельных конструкциях из КМ в процессе изготовления. Полученные зависимости позволяют провести расчет НДС изделия, проверить его прочность в процессе формования и определить остаточные напряжения для различных заданных технологических методов и режимов формования, а также применяемых полуфабрикатов КМ.

На базе линейной теории наследственности разработаны методики расчета НДС в элементе конструкции из КМ с учетом реологических свойств его компонентов, а также оптимизации по экономическим показателям технологических процессов, исключающих появление дефектов на заключительной стадии термообработки.

Установлены закономерности синтеза основных параметров оптимизированных температурно-временных режимов формования изделий из КМ, предложен алгоритм построения оптимизированных режимов, а также аналитическая зависимость давления формования от регламентированных и паспортных данных полуфабрикатов.

С использованием соотношений термоупругости получены зависимости для расчета НДС в панельных конструкциях типа слоистых пластин и весьма пологих оболочек, а также длинномерных профилей из КМ, возникающего вследствие температурных воздействий технологического происхождения с учетом деформации усадки и реологических характеристик композиционных материалов.

Значительные результаты получены в научном обеспечении основных технологических процессов производства клееных элементов конструкций

из органопластов для пассажирских и транспортных самолетов (в серийных самолетах Ан-28 и Ан-72 внедрено 122 наименования агрегатов с преимущественным применением органопластов ВВП-3 и органита – 7Т). Разработана технология неразрушающего контроля качества элементов авиаконструкций из КМ в процессе их производства и эксплуатации методом внутреннего трения.

Впервые разработаны эффективные методы раскрытия при выкладке армирующих полуфабрикатов и определены рациональные энергетические параметры формообразования композитных деталей авиаконструкций криволинейной формы.

Предложена новая система классификации оснастки для деталей из ПКМ, отличающаяся включением признаков изготавливаемой детали. Определены критерии оценки оснастки и способ сворачивания частных критериев в единый обобщенный критерий качества. На основе статистического материала и расчетных данных проанализированы диапазоны изменения единичных критериев качества и определены аналитические выражения для каждого критерия, получены зависимости для определения затрат при изготовлении оснастки, а также установлены ограничения для транспортировки оснастки и ее жесткости, предотвращающие остаточные деформации оснастки в процессе ее транспортировки.

На основе предложенной системы классификации оснастки разработана информационно-поисковая база данных «Оснастка для деталей из ПКМ для самолетов Ан-70, Ан-140.

В плане решения экологических проблем [15]:

– разработаны концепция безопасной технологии основных этапов производства ЛА из ПКМ и новый подход к оценке безопасности технологических процессов их производства;

– на основе концепции приоритета безопасности производственной жизнедеятельности (БПЖД) и математических моделей отклика биологической системы на вредные факторы синтезированы критерии безопасности технологических процессов производства ЛА из ПКМ;

– разработаны новые методы и реализующие их методики исследования составляющих технологических процессов производства ЛА из ПКМ, критичных по БПЖД;

- исследованы специфические особенности процессов сборки агрегатов ЛА из ПКМ;
- выявлены и исследованы ключевые аспекты безопасности испытаний в экстремальных условиях, эксплуатации и утилизации изделий АРКТ из ПКМ;
- результаты этих исследований внедрены на предприятиях и в организациях, занимающихся созданием АРКТ из КМ.

В конце 90-х годов прошлого столетия были развернуты широкие исследования, направленные на внедрение КМ в ракетно-космических ЛА. Были разработаны основы технологии и создания ресурсосберегающего технологического комплекса изготовления агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов [16]. Новые теоретические и практические результаты получены в технологиях приготовления препрегов, намотки эрозионностойкого покрытия, вакуум-автоклавного формования деталей из КМ горячего отверждения, изготовления силовой оболочки и клеесборки.

Разработаны научные основы технологии производства сотовых заполнителей (СЗ) и сотовых конструкций (СК) для АРКТ и конверсионного назначения, включающие в себя [17]:

- новую концепцию изготовления СЗ и СК;
- новый концептуальный подход и реализующую его классификацию СЗ и СК, адекватную Государственному классификатору продукции и услуг Украины ДК-016-97, но ориентированную на компьютерные технологии поиска оптимальных КТР СЗ и СК;
- математические модели и методы механических испытаний СЗ для создания Государственного стандарта Украины;
- систему научно-технического обеспечения создания новых классов СЗ из алюминиевых сплавов, полимерной бумаги, ПКМ на основе стекло- и углепластиков, технических бумаг и пленки ПЭТФ;
- научные основы создания прецизионных суперлегких СК космического назначения – панелей солнечных батарей;
- концепцию квалиметрии и управления качеством СЗ и СК, основанную на новом подходе к определению показателей качества СЗ на базе конечноэлементных моделей, позволившем впервые получить аналитиче-



ские зависимости этого показателя от геометрических параметров СЗ, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом.

Результаты этих исследований внедрены на АНТК «Антонов»; ГКБ «Южное»; ФГУП «ГНПЦ им. М.В. Хруничева» (РФ); ГРКК «Энергия» им С.П. Королева (РФ); заводе «Композит» (Узбекистан), на других предприятиях.

В течение последних лет проведен анализ возникновения и взаимодействия погрешностей, появляющихся при производстве СЗ и трехслойной панели в целом, а также их влияние на несущую способность. Разработан алгоритм нахождения профиля технологических несовершенств сотового заполнителя. Предложена схема оценки допустимости технологических допусков, позволившая разработать методику проектировочного расчета трехслойной панели, учитывающую технологические несовершенства, возникающие при ее производстве. Предложена методика оптимизации допусков на изготовление СЗ трехслойной панели с обеспечением заданной несущей способности конструкции. Проведено экспериментальное исследование профиля технологических несовершенств СЗ на основе статистического анализа. Для замера параметров ячеек заполнителя разработан метод электронного копирования, основанный на свойстве относительной оптической прозрачности несущих слоев при встречном равномерном освещении панели световым потоком, перпендикулярным плоскости панели. Данный метод позволяет получать увеличенные изображения участков панели в виде фотографического снимка или электронного изображения. Разработана методика и алгоритм проектирования панелей крыла с учетом профиля технологических несовершенств сотового заполнителя.

Исследования экономических проблем создания изделий АРКТ из КМ проводились в аспекте разработки нового подхода к организации технологии производства, эффективной по критерию технологической себестоимости. Были получены теоретические и практические результаты, включающие в себя анализ состояния экономики производства конструкций ЛА из ПКМ, а также общую оценку комплекса составляющих технологической себестоимости. В этом плане разработаны новые методики, позволяющие производить комплексную оценку физико-химических воздейст-

вий на параметры полимерной матрицы и влияния последних на характеристики подготовительных процессов производства конструкций из ПКМ, предложен новый принцип организации производства, позволяющий снизить затраты на заработную плату путем внедрения новой системы расчетов, базирующейся на получении дробных квалификационных разрядов проводимых работ, а также согласовании параллельных и последовательных переходов операций по времени и численно-квалификационному составу бригады. Сформулирован новый подход к определению стоимостных параметров процесса формования изделий из ПКМ, основанный на комплексной оценке экспериментальных данных и их согласовании с теорией и позволяющий отследить динамику процесса отверждения.

На протяжении всех лет в рамках научной школы ХАИ по проблеме создания высокоэффективных конструкций АРКТ из композиционных материалов опубликовано более 500 статей, получено свыше 180 авторских свидетельств и патентов, защищено 10 докторских диссертаций (в том числе Генеральным конструктором АНТК «Антонов» П.В. Балабуевым, его Первым заместителем Д.С. Кивой, Генеральным директором В.Н. Королем, Главным конструктором Ступинского опытно-конструкторского бюро машиностроения Ю.Л. Сухоросовым и др.) и более 70 кандидатских диссертаций. В активе школы Государственная премия Украины в области науки и техники за 1995 год (в авторском коллективе с учеными УкрНИИАТ, института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины и НИИАТ России).

Научная школа ХАИ явилась основой для открытия в университете специальности «Проектирование и производство конструкций из композиционных материалов». Научно-методическое обеспечение этой специальности составляют 6 учебников и свыше 50 учебных пособий, охватывающих все курсы специальности и пользующихся спросом при переподготовке авиационных специалистов Украины и зарубежья.

Таким образом, исходя из анализа результатов, полученных в ХАИ к настоящему времени, следует констатировать, что по-прежнему остается актуальным дальнейшее решение комплексной проблемы развития научных основ проектирования и производства композитных конструкций АРКТ на базе совершенствования математических моделей строительной

и технологической механики с целью повышения ресурса и надежности авиационных композитных конструкций за счет снижения технологических напряжений и деформаций, повышения точности аэродинамических обводов, качества полуфабрикатов и сборки конструкций панелей, обеспечивающих нормированный уровень дефектов физико-механических и электростатических свойств.

Эта цель, по-видимому, может быть достигнута в ближайшие годы продолжением исследований в трех основных направлениях.

В плане первого направления:

– разработки теоретических аспектов строительной механики стержней разной конфигурации с неоднородным поперечным сечением рекомендаций относительно снижения напряжений и деформаций;

– разработки теории прогнозирования напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации сборных конструкций из элементов, имеющих технологические поводки;

– на основе анализа напряженно-деформированного состояния обоснования нормативов допустимых отклонений параметров технологических процессов изготовления панелей из слоистых КМ;

– синтеза и обоснования технологических процессов, гарантирующих нормируемый уровень дефектов и поводов;

– разработки методик оптимизации формы поперечного сечения силовых элементов подкрепленных панелей и структуры КМ;

– создания инженерного математического обеспечения прогнозирования поводов конструкций из композиционных материалов при формовании и в эксплуатации.

По второму направлению:

– разработки уточненной классификации технологических несовершенств и дефектов СЗ и СК АРКТ;

– выбора и обоснования эффективных по условиям функционального назначения СК подходов к нормированию допусков на изготовление СЗ и СК АРКТ;

– разработки методов оптимизации допусков на технологические несовершенства и дефекты СЗ из металлических и неметаллических материалов, а также на изготовление и ремонт СК АРКТ.

По третьему направлению:

- проведение исследований физических причин возникновения статических зарядов на полимерных диэлектрических материалах;
- разработки физико-математической модели взаимодействия зарядов на этапах пропитки связующими полимерных материалов;
- проведения физико-математического моделирования процессов взаимодействия свободных и поляризуемых зарядов на изделиях из полимерных материалов на этапе пропитки связующими;
- оптимизации процесса высокотемпературной сушки изделий из полимерных материалов после их пропитки жидким связующим;
- разработки комплексных предложений относительно технических средств повышения равномерности пропитки связующим и уменьшения брака при изготовлении панелей СК из полимерных материалов нейтрализацией зарядов на диэлектрике в условиях производства.

Состояние первого направления в решении этой комплексной проблемы состоит в следующем. Как показано выше, изготовление деталей и агрегатов из композиционных материалов происходит из исходных компонентов в большинстве случаев за одну технологическую операцию, то есть свойства материала и конструкции формируются одновременно и могут отличаться не только от одной конструкции к другой, но и в самой конструкции. В связи с этим проектирование конструкции повышенной надежности и ресурса возможно лишь на основе четких математических зависимостей между параметрами технологического процесса и вызванного им напряженно-деформированного состояния. Для этого необходимо создание технологической механики как нового раздела механики, который позволяет моделировать и проводить количественный анализ влияния технологической предыстории на работоспособность конструкции с КМ, а также решать обратные задачи.

В предыдущих работах научной школы ХАИ разработаны модели технологического деформирования конструкций из КМ и механизмов возникновения дефектов его макроструктуры, их влияния на несущую способность. Были также начаты исследования по определению равновесных размеров расслоений при разных видах нагружения и оптимизации технологических параметров. Но эти исследования находятся еще на начальном

этапе и они не рассматриваются в комплексе с оптимизацией геометрии конструкции и структуры армирования, исходя из необходимых конструкторских решений. Практически не исследованы задачи деформирования стержней из КМ вследствие значительных краевых эффектов (неуравновешенные внутренние моменты на изгиб и кручение), а также конструкций, состоящих из стержней и обшивки.

До сих пор технологические поводки и коробления рассматривались как результат неоднородного объемного состава компонентов КМ, неравномерности полимеризации по объему детали, наличия неминуемых дефектов его структуры и отклонений параметров технологического процесса. Но, как показали поисковые исследования, самой важной причиной возникновения существенных деформаций и напряжений являются краевые эффекты, которые возникают из-за неуравновешенности температурных нормальных и сдвиговых усилий в слоях КМ и приводят к появлению распределенных на краях изгибающих моментов и бимоментов. С таких позиций задачи технологической механики еще не рассматривались. Проведенные эксперименты на сложных профилях из разных материалов подтвердили гипотезу о том, что краевые эффекты являются причиной изгиба и закручивания стержней с неоднородным поперечным сечением при изменении температуры. Это является основой для разработки отдельного раздела строительной механики неоднородных стержней, а также подкрепленных панелей самолетов. На первом этапе планируется разработка методов и методик прогнозирования поведения конструкций из КМ после их извлечения из технологической оснастки (для формулировки требований к технологическому контролю качества), а на втором – определение монтажных технологических деформаций, возникающих вследствие установки деформированной панели на силовой каркас крыла, фюзеляжа.

Наиболее типичными дефектами, возникающими в процессе производства изделий из ПКМ, являются расслоение, отклонение углов армирования структуры и коробление. Моделирование влияния этих дефектов на несущую способность конструкций из композиционных материалов касается разных аспектов проблемы. Во-первых, необходимо исследовать влияние размеров, конфигурации и размещения дефектов по толщине и поверхности конструкции на ее несущую способность. Во-вторых, – коли-

чественно оценить условия, при которых границы дефекта становятся неустойчивыми. Решение такой задачи возможно, если реальную физическую модель рассматривать как сплошное квазиоднородное тело переменной жесткости, имеющее разрывы первого рода на контурах дефектов. Полученные выражения позволят разработать также нормативную документацию для контроля качества.

Обеспечение условий предотвращения образованию дефектов макроструктуры КМ предусматривает управление технологическими параметрами процесса переработки: давлением, температурным полем, теплофизическими свойствами и т.д. Моделирование химико-физических процессов и механических явлений, которые отвечают технологическим процессам создания деталей из КМ, позволит определить рациональные технологические параметры для получения конструкций с заданными ресурсом и надежностью. При решении таких задач раньше использовались допущения о независимости кинетики структурных превращений матрицы и теплоупругих характеристик композиционных материалов. В действительности эти процессы должны рассматриваться совместно с учетом релаксационных процессов.

После завершения технологического процесса изготовления конструкции из ПКМ остается поле технологических напряжений, которое может влиять на ее качество и несущую способность. Определение допустимого уровня остаточных напряжений с учетом факторов, действующих при эксплуатации, позволит объективно и обоснованно выдвигать требования к технологии изготовления с учетом экономических факторов.

Состояние второго направления комплексной программы состоит в научном обеспечении повышения качества трехслойных композитных конструкций с СЗ в процессе их проектирования и изготовления.

Расширение области применения полимерных композиционных материалов в АРКТ и других отраслях техники в ряде случаев стало возможным исключительно благодаря их использованию в системе сотовых конструкций (СК), что позволяет исключить конструктивные ограничения толщины несущих обшивок и тем самым реализовать резерв снижения массы в СК. Производство СЗ превратилось в самостоятельную отрасль, которая обслуживает потребителей разных отраслей продукцией на осно-

ве металлической фольги, полимерных бумаг и КМ, что обеспечивает СК ряд специфических свойств, необходимых для реализации таких функциональных характеристик как радиопрозрачность, тепло- и звукоизоляция, вибропоглощение, высокие удельные прочность и жесткость.

Известно, что все конструкционные материалы уже сами по себе имеют технологическую наследственность, что выражается в зависимости их физико-механических и других свойств от технологии производства. Эта зависимость регламентируется соответствующими допусками в отраслевых и государственных стандартах, что гарантирует уровень свойств материала независимо от партии или завода-производителя того или другого конструкционного материала, поставляемого в соответствующем виде. Но для СЗ аналогичные регламентации допусков в стандартах для определения их физико-механических свойств отсутствуют.

Однако ярко выраженная технологическая наследственность СЗ и СК, источниками (факторами) которой являются технологические несовершенства или дефекты, возникающие на разных стадиях создания СЗ, а в дальнейшем – и СК приводит к интегральным изменениям прогнозируемых свойств СЗ и отклонений в несущей способности СК, которые в ряде случаев выходят за рамки допустимых (регламентированных).

Для СЗ, которые изготавливаются из полимерных бумаг и КМ, неминуемыми являются технологические отклонения физико-механических характеристик этих материалов, которые возникают в процессе их производства и связаны с разориентацией армирующих волокон в гранях СЗ, отклонениях в процентном содержании связующего, неравномерности свойств по высоте СЗ и многими другими, и являются следствием несовершенства самих процессов разных стадий изготовления, в частности электростатических явлений.

Этот тип технологических несовершенств связан с назначением допусков на отклонение параметров сборки СК. К таким задачам в первую очередь следует отнести:

- качество склеивания СЗ с несущими обшивками СК;
- выбор допустимых уровней давления и температурно-временного режима процесса склеивания СК;
- ремонт СК.

Качество склеивания СК характеризуется его надежностью, которая обеспечивается геометрическими параметрами клеевого соединения (толщиной клеевой пленки и размерами клеевых катетов) и его непрерывностью. Требуется уточнения задача учета высоты сотовых заполнителей в его физико-механических характеристиках. Существенное влияние высоты СЗ на его модули сдвига установлено экспериментально, предложен метод определения упругих характеристик сотовых заполнителей (модулей сдвига) на основе конечногоэлементной модели, но эта задача нуждается в последующем уточнении.

Достаточно неопределенными до настоящего времени остаются и сами понятия физико-механических характеристик СЗ, в частности модулей упругости при трансверсальном сжатии и сдвиге, которые связаны с механизмом нагружения СЗ соответствующими усилиями. При экспериментальном определении модуля упругости при трансверсальном сжатии обычно находят секущий модуль. Так как установить уровень нагрузки, который отвечает упругому поведению СЗ достаточно сложно из-за интегрального влияния искривления граней ячеек сот в разных образцах, то определяемая характеристика может выходить из зоны упругой деформации. Такая неопределенность приводит к большому разбросу определяемой характеристики, который является следствием не только наличия интегральных технологических погрешностей сотовых заполнителей, но и погрешностей испытаний.

На физическую картину деформирования накладываются многие технологические погрешности изготовления сотовых заполнителей, поля допусков на которые должны быть обоснованы для основных типов сотовых заполнителей, используемых в промышленности. В связи с этим рациональным является подход, реализующий установление полей допусков на технологические отклонения геометрических и физических параметров сотовых заполнителей, ориентированный непосредственно на его физические характеристики безотносительно к объекту, в котором этот заполнитель будет использован.

В аспекте третьего направления комплексной проблемы в настоящее время наука не может предвидеть появление статического электрического заряда в том или другом технологическом процессе. В производстве появ-



ление статического электричества играет роль катализатора побочных процессов, противодействующих течению основного технологического процесса.

Развитие авиационно-космических технологий, в которых используются КМ, относящиеся к классу диэлектриков, наталкивается, в первую очередь, на появление большого статического заряда, который негативно влияет на ход технологического процесса особенно при контактах заряженных диэлектриков с жидкостями, пропитывающими полимерную бумагу и изделия типа сотовых заполнителей. В физической и технической литературе явления, лежащие в основе статической электризации, не только не рассматриваются совместно, но и не приводятся в какой-либо взаимной связи. Статическая электризация как раздел науки проходит пока еще стадию описания отдельных явлений и не имеет достаточного крепкого физического и математического фундамента. Практически большинство материалов, применяемых в технологических процессах, является хорошими диэлектриками с высоким удельным сопротивлением, превышающим  $10^5$  Ом м. поэтому они склонны к электризации при контакте как с металлами, так и с диэлектриками.

Появление за последние несколько десятилетий новых синтетических волокон, тканей, полимерной бумаги и пленок с более высокими диэлектрическими свойствами и удельным сопротивлением делает проблему борьбы со статическими электрическими зарядами чрезвычайно важной.

В ходе реализации технологического процесса изготовления панелей сотовых заполнителей из полимерной бумаги был отмечен эффект неравномерного нанесения связующего на полимерную бумагу. Визуально это проявляется в появлении некоторой области на поверхности сотоблока, имеющей меньшую толщину пропитки связующим и другой цвет с постепенным переходом к более темному оттенку на всей оставшейся панели сотоблока.

Таким образом, детальное исследование процессов электризации полимерной бумаги и ее взаимодействия со связующим на этапах пропитки в ваннах и высокотемпературной сушки сотоблоков в печах, которое проводится в ХАИ, является одним из условий обеспечения конкурентоспо-

способности украинской промышленности в изготовлении сотоблоков из негорючей полимерной бумаги.

Существует возможность разработки технологического процесса изготовления сотоблоков, который позволяет нейтрализовать статические заряды на технологической линии на наиболее важных участках взаимодействия сотоблока с жидким связующим и при термической обработке сотоблоков. Эта рабочая гипотеза получила предварительное подтверждение на этапе экспериментальных исследований.

### Литература

1. Композиционные материалы: Справочник. – Под ред. Д.М. Карпиноса. – К.: Наук. думка, 1985. – 592 с.
2. Савин В.С. Авиация в Украине. Очерки истории. – Х.: Основа, 1995. – 264 с.
3. Гайдачук В.Е. Конструкция закрылка Ан-2М из стеклопластика секционного типа // XXIII НТК ХАИ: Тез. докл. – Х.: ХАИ, 1966. – С. 12.
4. Фюзеляж самолета Ан-2М из стеклопластиков / А.Ф.Пильник, Л.А. Колесников, Я.С. Карпов, В.Е. Гайдачук // Самолетостроение и техника воздушного флота. – Х.: ХГУ, 1971. – Вып. 26. – С. 63 – 66.
5. Антонов О.К. Композиційні матеріали для авіабудування // Вісник АН УРСР. – К.: АН УРСР, 1975. – № 12. – С. 68 – 71.
6. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С. Научная школа ХАИ по проблемам создания эффективных конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов // Технологические системы. – 1999. – № 2. – С. 81 – 83.
7. Бычков С.А., Гайдачук В.Е. Основные проблемы создания изделий авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов (Аналитический обзор) // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. научн. трудов Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х.: ГАКУ «ХАИ». – 1998. – Вып. 13. – С. 6 – 17.
8. Гайдачук В.Е. О принципах и проблемах проектирования авиаконструкций из композиционных материалов // Самолетостроение и техника воздушного флота. – Х.: ХГУ, 1975. – Вып. 36. – С. 31 – 39.
9. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С. Дифференциальный метод проектирования рациональных корпусных авиаконструкций из композиционных мате-

риалов // Самолетостроение. Техника воздушного флота. – Х.: ХАИ, 1978. – Вып. 43. – С. 81 – 92.

10. Гайдачук В.Е. О проблемах и принципах проектирования летательных аппаратов из композиционных материалов // VIII чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей Ф.А. Цандера. – Харьков: ХАИ, 1983.

11. Гайдачук В.Е. Актуальные проблемы научного обеспечения композитных конструкций аэрокосмической техники // Материалы XXI международной конференции и выставки «Композиционные материалы в промышленности (Славполикком) 21-25 мая 2001 г.

12. Карпов Я.С. Разработка структурной модели гетерогенного ортотропного тела и синтез силовых схем авиаконструкций из композиционных материалов: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.07.02. – Х.: ХАИ, 1979. – 171 с.

13. Гайдачук В.Е., Карпов Я.С. Пути совершенствования и повышения эффективности соединений деталей летательных аппаратов из композиционных материалов // Проектирование элементов конструкций летательных аппаратов: Сб. научн. трудов Харьк. авиац. ин-та. – Х.: ХАИ, 1988. – С. 48 – 55.

14. Карпов Я.С. Научные основы решения проблемы соединения высоконагруженных деталей летательных аппаратов из композиционных материалов // Технологические системы. – 2000. – № 1 (3). – С. 36 – 40.

15. Гайдачук О.В. Загальні принципи підвищення безпеки технологічних процесів виробництва конструкцій літальних апаратів // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : Сб. научн. тр. Нац. аэрокосмич. ун-та м. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2003. – Вып. 35 (4). – С. 7 – 29.

16. Основы технологии изготовления силовых оболочек соплового блока РДТТ / В.А. Цопа, В.Е. Гайдачук, В.Н. Льяной, С.Н. Складар // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : Темат. сб. научн. тр. Харьк. авиац. ин-та. – 1998. – Вып. 11. – С. 113 – 122.

17. Сливинский В.И. Конструктивно-технологические решения по созданию рациональных сотовых конструкций различного назначения // Машиностроение Украины. – Днепропетровск: ДГУ. – 1993. – С. 51 – 58.

*Поступила в редакцию 28.03.2005*