

УДК 629.7.002

В.Г. БОНДАРЬ, С.А. БЫЧКОВ, В.Н. КОРОЛЬ*Авиационный научно-технический комплекс им. О.К. Антонова, Украина***РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ АВИАКОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА АНТК «АНТОНОВ»**

Приведены результаты реализации основных принципов и правил проектирования технологических процессов изготовления изделий из полимерных композиционных материалов при создании самолетов на АНТК «Антонов».

технологический процесс, авиаконструкция, проектирование, надежность, композиционные материалы, полимеры

В настоящее время стало очевидным, что единственным существенным способом снижения массы АТ является перманентное расширение объема ПКМ во все более ответственных (функциональных) агрегатах [1-3].

Применение ПКМ в самолетах «АН» началось в 60-е годы, а уже в 1970 году постановлением правительства АНТК «Антонов» был определен ведущей организацией отрасли по НИОКР и внедрению ПКМ в пассажирских и транспортных самолетах.

С тех пор на АНТК «Антонов» выполнен комплекс работ созданию и внедрению конструкций из ПКМ в самолеты Ан-2, Ан-2М, Ан-26, Ан-28, Ан-32, Ан-72, Ан-74, Ан-71, Ан-124, Ан-225, Ан-70, Ан-140 с постоянным ростом объема КМ от 1...2% в самолетах Ан-26 до 20% в самолете Ан-70 (от массы планера). Эти объемы находились на уровне мировых достижений, а в самолетах сверхбольшой грузоподъемности Ан-124 и Ан-225 превысили уровень для самолетов данного класса.

Внедрение ПКМ обеспечило качественно новые характеристики несущих конструкций самолетов (снижение массы, улучшение аэродинамики, повышение усталостной прочности и вибропрочности, снижение трудоемкости изготовления и пр.). Проведенный комплекс работ явился основополагающим, но только начальным звеном по созданию несущих кон-

струкций авиационной техники из ПКМ в Украине. В настоящее время ведущие авиационные фирмы мира уже разрабатывают проекты создания крупных пассажирских самолетов с объемом внедрения ПКМ 60% и более от массы конструкции планера.

Различным аспектам проблемы создания АТ из ПКМ посвящено множество работ и ряд статей. Многие из этих работ выполнены в тесном сотрудничестве с АНТК «Антонов» и нашли свое отражение в решении общей проблемы создания авиаконструкций из ПКМ, перманентно решаемой на нашей фирме (рис. 1).

Основные принципы и правила проектирования ТП изготовления изделий из ПКМ обобщены и сформулированы в [4]. Реализация этих принципов в производстве АТ наиболее полно осуществлена на АНТК «Антонов» и представляет собой синтез многолетнего опыта и результатов выполненных на фирме НИОКР и внедрения конструкций из ПКМ в самолеты «АН».

Ниже приведены примеры реализации этих принципов и правил проектирования ТП на конкретных изделиях и ее результаты.

Принцип достаточности функциональных (эксплуатационных) характеристик изделий из ПКМ сформулирован в [5] применительно к сотовым за-



Рис. 1. Общая проблема создания авиаконструкций из ПКМ и основные направления ее решения

полнителям и конструкциям. Он заключается в реализации в конкретной продукции такого уровня ее потребительских свойств (характеристик), какой регламентируется соответствующим ТЗ на эту продукцию.

Этот принцип относит к негативу избыточность функциональных характеристик, так как она неизбежно связана с ростом показателей затрат Z , сроков создания C , а повышение интегрального показателя качества $I_{ИПК}$ сверх регламентированного ТЗ, как правило, не компенсирует в денежном выражении роста затрат и сроков.

Высокие требования по надежности и долговечности, предъявляемые к авиаконструкциям из ПКМ, явились определяющими при выборе и разработке методов и средств контроля качества их изготовления.

Специфичность свойств ПКМ потребовала разработки наряду с имевшимися и новых методов обеспечения надежности при проектировании и изготовле-

нии, а также сохранения надежности при эксплуатации конструкций.

Требование обеспечения надежности элементов конструкций из ПКМ на всех этапах их создания при сравнительно недостаточном объеме имеющейся информации по материалам и деталям из них, поставило задачу получения в короткий срок максимума необходимых данных при разумном минимуме НИОКР для обоснованного широкого применения ПКМ в конструкциях самолетов.

Были выделены главные факторы и степень их влияния на прочность и жесткостные характеристики, что в свою очередь дало возможность разработать и внедрить для новых изделий методику оценки состояния элементов конструкций из ПКМ практически на всех этапах ее создания.

Оценка состояния элементов конструкций основывается на обязательном контроле как свойств материалов и деталей, так и основных параметров ТП, а

затем и конструкций из ПКМ, являющихся следствием степени соблюдения выполнения объема всех технологических операций.

С целью наиболее тщательной проверки состояния элементов конструкций из ПКМ на всех этапах производстве, начиная с пропитки наполнителя связующим для будущего материала детали и кончая сборкой узлов и агрегатов, выполнялись экспериментальные оценки результатов выполнения ТП на соответствие техническим условиям.

На рис. 2 представлена принципиальная схема проводимой на предприятии оценки состояния элементов конструкций из ПКМ в условиях опытного производства.

Как видно из схемы, по функциональному назначению методы контроля подразделяются на три группы:

- контроль материала;
- контроль деталей и узлов;
- проверка состояния прочности к жесткости

готовых агрегатов техническим условиям или расчетным характеристикам.

Дальнейший контроль агрегатов проводился по двум направлениям:

- климатические испытания в условиях ускоренного воздействия на детали в барокамере или в зонах повышенного содержания основных климатических факторов (солнечное излучение, дождь и т.д.);
- в процессе эксплуатации изделия путем осмотра конструкций из ПКМ в эксплуатирующихся подразделениях специалистами - разработчиками конструкций.

Такое сочетание методов контроля обусловлено недостаточностью как данных по материалу, так и по характеру поведения готовых изделий под воздействием различных факторов. Кроме того, такой объем контроля дал информацию о допустимых методах

контроля при серийном производстве деталей и узлов из ПКМ.

Для сравнительной оценки полученных данных применялись методы контроля как разрушающие - на испытательных стендах и машинах, так и неразрушающие – с помощью различных электронных приборов и механических приспособлений.

Особенность ПКМ, заключающаяся в совмещении процессов производства материала и детали из него, требует дополнительного входного контроля качества компонентов ПКМ (наполнителя, смол, растворителей и отвердителей), реализующегося изготовлением образцов материала и определением их прочностных и физико-химических свойств, после чего дается заключение о возможности дальнейшего применения компонентов в деталях из ПКМ.

На основе проведенных АНТК совместно с УкрНИИАТ НИР был внедрен в опытное и серийное производство метод ультразвукового контроля по следующим направлениям:

- определение содержания связующего в пропитанной углеленте (прибор УКБ-1М и специально разработанное приспособление;
- определение статического модуля упругости через динамический модуль (приборы УК-10П, УК13-П, УК22П и приспособления собственного производства).

Определение содержания связующего производится по следующей методике. На движущуюся в пропиточной машине УПСТ-300 и подсушенную углеленту опускается излучающий и принимающий преобразователи, которые прижимают ее к столу тележки приспособления. Время прохождения ультразвука между датчиками фиксируется на экране прибора УКБ-1М, после чего по разработанному графику корреляции определяется степень содержания связующего в пре-преге.

Корреляционный график $\Delta\tau = \Phi(\tilde{N})$ (рис. 3) дает основание для сравнительной обработки показаний прибора и данных, полученных в результате определения процентного содержания связующего в образцах препрега, вырезанных из проконтролированной прибором зоны и выжженных по известной лабораторной методике.^{*)}

Зависимости статического модуля упругости $E_{стат}$ от динамического $E_{дин}$ для листовых деталей из ПКМ были установлены экспериментально на приборах УК-10П, УК-13П в режиме сквозного прозвучивания. На образцах и обшивках замерялось время прохождения ультразвука с последующим определением $E_{\dot{\sigma} \dot{\sigma}}$ при растяжении этих же образцов.

В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных была определена корреляционная зависимость между статическим и динамическим модулями упругости (рис. 4).

Контроль готовых изделий проводится в режиме поверхностного прозвучивания на базе 100 мм. Разработанный метод контроля модуля упругости внедрен в опытном и серийном производствах деталей из ПКМ для самолетов «АН». Реализация свойств ПКМ осуществляется непосредственно в конструкции, в связи с чем эта стадия производства является не менее ответственной, чем предыдущая.

Получение высоких показателей качества склеенного узла или агрегата обеспечивается строгим соблюдением технологических режимов «сухой сборки» и склеивания, при этом предъявляются

*) Полученные сравнительные результаты дали высокую сходимость, в связи с чем в дальнейшем приборный метод контроля процентного содержания связующего в препреге непосредственно в процессе пропитки наполнителя был внедрен в опытном производстве.

строгие требования к соблюдению правильности заполнения технологической документации и выполнения самого техпроцесса.

Собственно процесс контроля качества изготовления конструкций из ПКМ подразделяется на три типа по характеру получаемых результатов: качественный, качественно-количественный, количественный.

Качественный контроль производится, как правило, визуально и служит для определения соответствия внешнего вида деталей утвержденным эталонам, а также для определения наличия пор или свищей по торцам клеевых швов.

В процессе проведения количественно-качественного контроля производится определение качества склеивания конструкций акустическо-импедансным методом с помощью приборов ИАД-3, АД-40И, АД50У, ДУК-65ПН.^{**)}

Для определения качества склеивания тонких (толщиной 0,2...0,35мм) обшивок из органопласта с сотами ПСП-1 в связи с недостаточной чувствительностью приборов разработан и внедрен новый метод контроля, заключающийся в изгибном деформировании панели в пределах ее упругости.^{***)}

**) Одновременно с проведением контроля качества склеивания определяется площадь непрочлеиваемых и места их расположения. Конфигурация непрочлеиваемых (в случае их наличия) наносится на поверхность контролируемой обшивки, после чего принимается решение о допустимости дефекта или отбраковке.

***) Разработанный метод применяется при контроле панелей интерьера и позволил существенно сократить трудозатраты на контроль и потребность в приборном оснащении в опытном и серийном производствах сотовых панелей самолетов «АН».

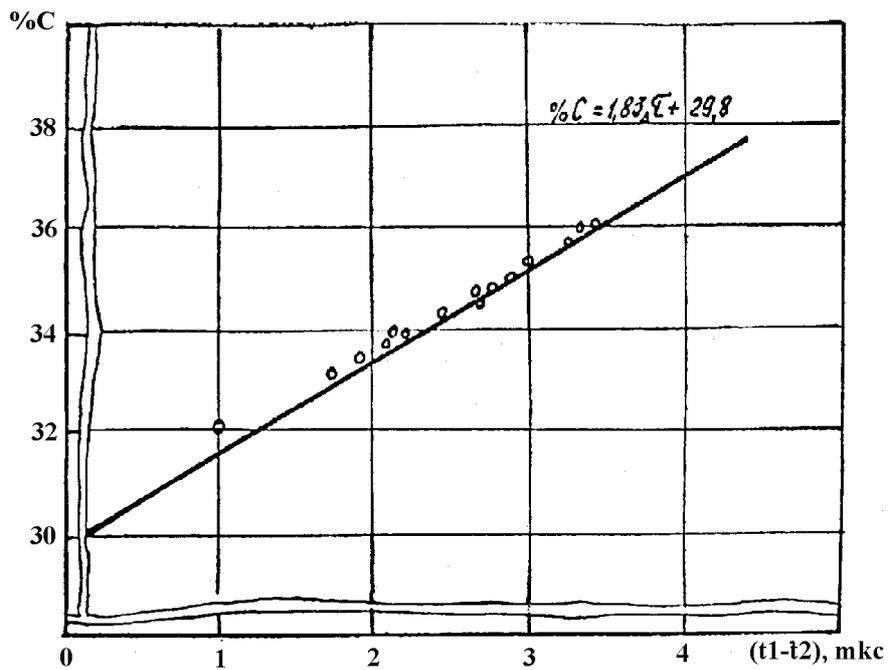


Рис. 3. Зависимость процентного содержания связующего в препреге от скорости распространения ультразвука

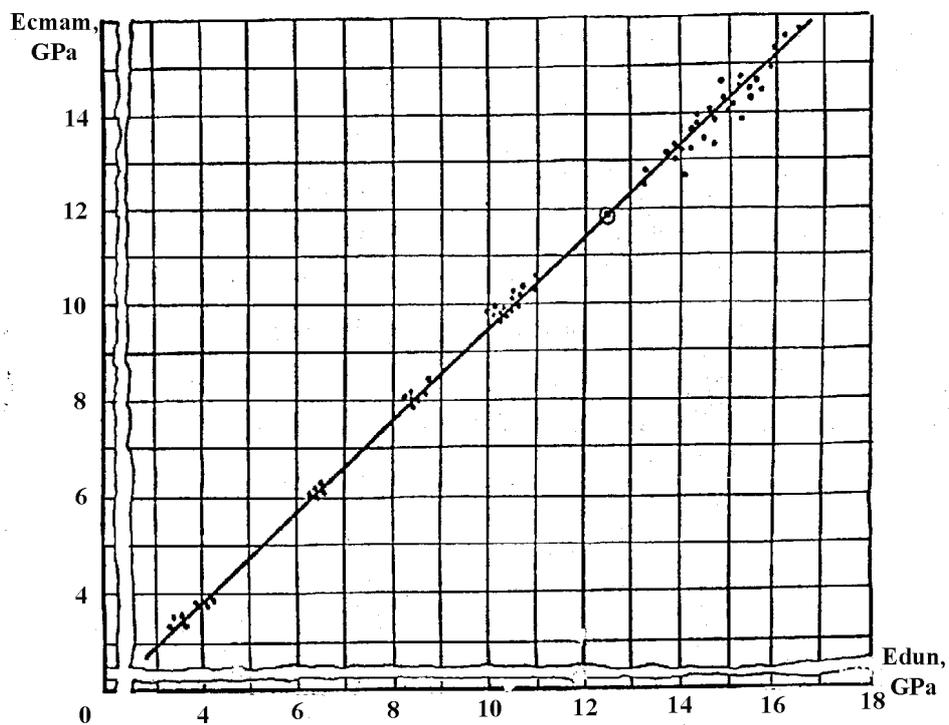


Рис. 4. Зависимость статического модуля упругости от динамического для образцов-свидетелей входного контроля и элементов конструкций

В плане реализации этого принципа на АНТК «Антонов» были проведены исследования по оптимизации применяемых для изделий из ПКМ связующих.**)

Совместные экспериментальные работы ВИАМ и АНТК «Антонов» по освоению связующего 5-211Б позволили доработать его рецептуру, что обеспечило достижение прочности и долговечности пластиков в конструкциях из ПКМ. Связующее 5-211Б в конструкциях из ПКМ для самолетов «АН» в настоящее время применяется как основное унифицированное связующее для пропитки всех типов наполнителей.

Учитывая, что в процессе изготовления препрега закладываются основные свойства будущего ПКМ [6], вопросу пропитки было уделено очень серьезное внимание. Еще до создания промышленных установок на АНТК «Антонов» были отработаны процессы пропитки углелент и стеклотканей на опытных установках, разработанных и изготовленных силами предприятия, а также создано необходимое оснащение для приготовления связующего 5-211Б.-

После поставки и внедрения промышленных пропиточных установок УПСТ-300, УДС-3, УПСТ-1000 на АНТК были выполнены работы, позволив-

шие отработать и установить параметры режимов пропитки наполнителей на этих установках (скорость, температуру, натяжение) и отработать ультразвуковой метод контроля нанесения связующего на углеродные наполнители непосредственно в процессе пропитки.

По результатам выполненных работ разработана и внедрена техническая документация, обеспечивающая получение стабильных качеств препрегов и пластиков на их основе.

Отработан, освоен и внедрен процесс вакуум-автоклавного формования в электрическом автоклаве «Шольц», для чего были проведены:

- оптимизация параметров формования с использованием экспериментально-статистической методологии исследования влияния технологических факторов (содержания связующего в пластике, давления прессования, температуры и др.) на прочностные характеристики КМ;
- доработка оснащения автоклава, заключающаяся в изготовлении съемных столов для обеспечения многэтажной загрузки форм в экономичном варианте;
- усовершенствование подсоединения формочной оснастки к вакуумной сети автоклава.***)

***) Так применявшееся на первом этапе работ с ПКМ связующее имело малую жизнеспособность и относительно высокую температуру отверждения, а прочность пластиков на основе этого связующего при температуре 80°C снижалась на 35%, что совершенно недопустимо с точки зрения обеспечения надежности создаваемых конструкций. Поэтому возникла необходимость создания нового связующего, лишённого указанных недостатков.

С этой целью по техническому заданию АНТК «Антонов» отраслевым институтом были созданы связующее 5-211Б и углепластик КМУ-3 на его основе. В дальнейшем с использованием этого же связующего были разработаны органопласт Органлт-7Т, стеклопластики СТ-5211Б и СТК-5-211Б, гибридные органостеклопластики на основе тканей СВМ и Т-10-80.

***) В результате проведенной работы освоены и внедрены в производство новые материалы для вакуум-автоклавного формования, повышающие качество изделий из ПКМ, сокращающие трудоемкость подготовительных операций и улучшающие условия труда:

- полиамидная пленка ППН-Т для вакуумных мешков (взамен ткани 500);
- герметизирующий жгут-замазка 51-Г-27 для крепления вакуумных мешков к оснастке (взамен ранее применявшегося клея типа 88НП);
- дренажные материалы на основе волокнистых нетканых материалов из отходов типа ватина (взамен стеклотканей Т-10 и Т-14);
- разработана техническая документация на выполнение процессов вакуум-автоклавного формования в опытном и серийном производствах.

Отработанный процесс вакуум-автоклавного формования внедрен для изготовления деталей из ПКМ самолетов «АН» в опытном и серийном производствах.

В документации на применение связующих и клеев их разработчики указывают, как правило, относительно узкий диапазон возможных скоростей нагрева и охлаждения при термообработке, что совершенно недостаточно для разработки оптимального ТП при конкретных сочетаниях теплоемкости термообрабатываемых пакетов с оснасткой и мощности термообрабатывающего агрегата (автоклава или печи).

При заданной температуре термостатирования связующего или клея процесс относительно полной пространственной сшивки полимера происходит за определенный срок, который и характеризует минимальное время термостатирования.

В то же время скорость физико-химических процессов, происходящих в неотвержденном полимере во время его нагрева, зависит от скорости нагрева. Скорость же нагрева в реальных условиях производства определяется мощностью термоагрегата и совместным действием таких факторов, как материалоемкость и теплоемкость оснастки и формуемого или склеиваемого на оснастке пакета.*)

*)Как известно из общих закономерностей выполнения ТП формования и склеивания, наименьшие усилия формования или склеивания можно приложить в тот момент, когда связующее или клей имеют минимальную вязкость [110]. В этом случае при формовании возможна наилучшая пропитка материала наполнителя за счет жидкотекучести связующего. При склеивании жидкотекучий клей лучше смачивает склеиваемые поверхности, чем обеспечивается максимальная прочность склеивания для конкретной пары клей - материал.

Кроме того, наиболее интенсивно летучие из полимеров удаляются также при температурах, близких к температуре гелеобразования полимера, и удаление летучих из объема полимера происходит

Разработчики связующих и клеев не дают информации о характеристиках гелеобразования и динамики удаления летучих по связующему. В связи с этим перед разработчиками технологии в АНТК «Антонов» возникла задача получения необходимых данных.

В АНТК «Антонов» отработана и внедрена новая методика определения характеристик гелеобразования связующих и клеев, прототипом для разработки которой явился СТП ВИАМ, регламентирующий определение времени сшивки полимера путем прямого замера электрического объемного сопротивления образца связующего и клея в процессе их сшивки. По разработанной методике были проведены соответствующие экспериментально-исследовательские работы и определены характеристики гелеобразования связующего 5-211Б и клея ВК-41.**)

При охлаждении термообрабатываемого пакета физические превращения в полимере происходят при определенных температурах, но время их достижения зависит от скорости охлаждения полимера. Скорость охлаждения будет зависеть как от теплоемкости оснастки и сформованного на ней пакета, так и от количества тепла, отбираемого в единицу времени от охлаждаемого пакета. Указанные параметры определяют время достижения минимальной температуры стеклования.

тем полнее, чем меньше давление и больше объем среды, окружающей полимер [6].

**)Результаты проведенных работ показали, что для названных полимеров существует температурно-временная область, где в процессе их нагрева до момента начала гелеобразования можно не создавать давления формования или склеивания, облегчая и интенсифицируя тем самым процесс удаления летучих веществ в объем обжатого вакуумного мешка термообрабатываемого пакета, а также улучшая качество смачивания связующим или клеем соответственно поверхностей наполнителя пластика или склеиваемых деталей.

При этом, согласно известным зависимостям физики полимеров, после охлаждения полимера ниже его минимальной температуры стеклования в нем возможны только упругие деформации. Это, в свою очередь, позволяет утверждать, что удержание детали под давлением на оснастке при температурах ниже минимальной температуры стеклования не имеет смысла, так как величина остаточных напряжений в готовой детали из ПКМ не превысит предела пропорциональности и возможные коробления детали или под сборки уже зафиксированы в процессе охлаждения.

С учетом проведенных экспериментально-исследовательских работ и оценки состояния полимеров были разработаны оптимизированные по режимам нагрева и охлаждения ТП формования деталей и элементов конструкций из ПКМ для самолетов «АН» с использованием связующего 5-211Б, а также склеивания таких деталей клеем ВК-41.

Оптимизация ТП термообработки деталей из ПКМ по указанным направлениям дала возможность без снижения качества и прочности конструкций из ПКМ сократить цикл термообработки с одновременным снижением энергозатрат и увеличением календарного срока службы автоклавов, печей и вакуум-насосов.

Литература

1. Антонов О.К. Композиційні матеріали для авіабудування // Вісник АН УРСР, 1975, №12. С. 68-71.
2. Balabuev P.V. New conceptions of development of transport airplane load-carrying structures of polymeric composites // Composite materials, technologies and automation of products manufacturing. Ed. by K.V. Frolov, A.G. Bratukhin, O.S. Sirotkin, V.S. Bogo-

lyubov, V.I. Kostikov. – Moscow: SAMPE, 1999.- P. 369.

3. Итоги науки и техники. Авиастроение. Т. 9. Самолетостроение за рубежом. Под ред. С.М. Егера и С.В. Румянцева. – М.: ВИНТИ, 1986. – 266 с.

4. Гайдачук А.В. Общие принципы и правила проектирования технологических процессов и операций производства авиаконструкций из полимерных композиционных материалов // Авіаційно-космічна техніка і технологія: науково-технічний журнал. Вип. 36. Нац. аерокосмічн. ун-т ім. М.Є. Жуковського “ХАІ”. – Х.:ХАІ, 2003. – С.

5. Гайдачук А.В., Сливинский В.И. О концепции квалитетрии и управления качеством производства сотових заполнителей и конструкций // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аерокосмічн. ун-та ім. Н.Е. Жуковського “ХАІ”. – Х.:ХАІ, вып. 23(6), 2000. – С. 59-65

6. Забашта В.Ф. Кривов Г.А., Бондарь В.Г. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения: Справочник. – К.: Техніка, 1993. – 160

Поступила в редакцию 05.09.03

Рецензент: д.т.н., профессор Гайдачук А.В., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт"