Конкурсная работа

Авторы: Долженков Н.Н., Долинский С.В., Поляков А.В., *Голишев О.А.,* Антипов П.Ю. (АО «Кронштадт»), Авдеев В. В., Кепман А. В. (АО «ИНУМиТ»).

Название работы:

«Технология полного цикла создания цельнокомпозитных авиационных конструкций крупноразмерных низкоскоростных беспилотных летательных аппаратов»

Цель работы

Создание промышленной технологии, включающей проектирование, расчетные исследования, испытания, изготовление оснастки, материалов для производства авиационных конструкций, применимых при создании низкоскоростных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) среднего и тяжелого классов.

Описание работы

Специфика применения разведывательных и разведывательно-ударных БЛА определяет в качестве одного из ключевых требований большую продолжительность полета – свыше 24 часов. Удовлетворение таким требованиям возможно только при сверхлегкой конструкции планера, обеспечивающей прочность конструкции, достаточную для несения целевых нагрузок и большой массы топлива. Современная авиационная промышленность применяет полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе стекло-, органо- или углепластиков для снижения массы конструкции летательных аппаратов. Однако, применяемые в отечественной авиапромышленности технологии ПКМ разработаны для высокоскоростных реактивных самолетов и не позволяют создавать тонкостенные сверхлегкие конструкции, необходимые для низкоскоростных БЛА большой продолжительности полета.

АО «Кронштадт» разработало сквозную технологию, включающую все процессы от проектирования до изготовления и внедрило эту технологию в своих конструкторских и производственных подразделениях.

Для изготовления композитных конструкций применяется технология вакуумной инфузии. Важной проблемной особенностью процесса изготовления длинномерных (длиной от 8 до 15 метров) тонкостенных конструкций из ПКМ является искажение геометрии деталей при полимеризации связующего и теплового расширения (деформация формы) формозадающей оснастки.

Существенное искажение заданных геометрических размеров приводит к браку, а в случае незначительного искажения при сборке конструкций приходится применять компенсирующие прокладки, что снижает производительность сборки и не позволяет вывести технологию на уровень промышленной, пригодной для серийного выпуска продукции.

Решение проблемы

1. Конструкторская подготовка.

В компании внедрена PLM система, включающая, в частности, программный пакет Fibersim. Специалистами компании совместно с поставщиком ПО осуществлена его адаптация к задаче проектирования тонкостенных конструкций совместно с технологической проработкой и расчетами на прочность. Процесс проектирования детали идет совместно с проектированием оснастки для ее изготовления и включает следующие этапы:

- Подготовка геометрии
- Создание слоев и зон
  - Задание зон
  - Формирование переходов
  - Создание геометрии слоев
- Контроль с помощью 3D-сечения и контрольной точки
- Создание результирующего твердого тела
- Передача данных на расчет
- Оформление КД

В качестве опытной детали для отладки и апробации технологии был выбран элемент шпангоута БЛА «Орион»

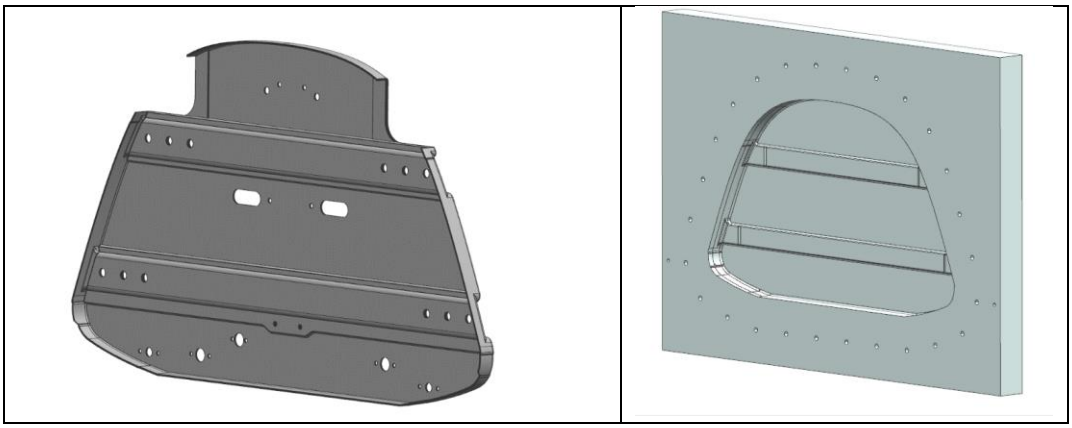

Рисунок 1 Модель шпангоута (слева) и формообразующая оснастка

2. Технологическая подготовка

Существенной проблемой при изготовлении деталей из ПКМ (в особенности тонкостенных и большой длины) является коробление деталей в процессе полимеризации связующего и линейного расширения оснастки при нагревании. Исключение коробления деталей при полимеризации в печи достигнуто применением специально разработанных с АО «ИНУМиТ» связующих, циклограмм нагрева и охлаждения в процессе полимеризации. Для снижения влияния коэффициента линейного расширения (КЛТР) оснастки ее изготавливают из материалов с КЛТР близким к КЛТР материала детали. Для устранения коробления при проектировании оснастки в ее геометрию вносится упреждение, обеспечивающее попадание фактической формы изделий в необходимый допуск. Для расчета необходимых упреждений строится геометрическая модель оснастки с номинальной формой, выполняется конечно-элементное моделирование коробления изделия, рассчитывается новая форма поверхности оснастки из поля перемещений изделия и, в результате получается геометрическая модель с упреждениями.

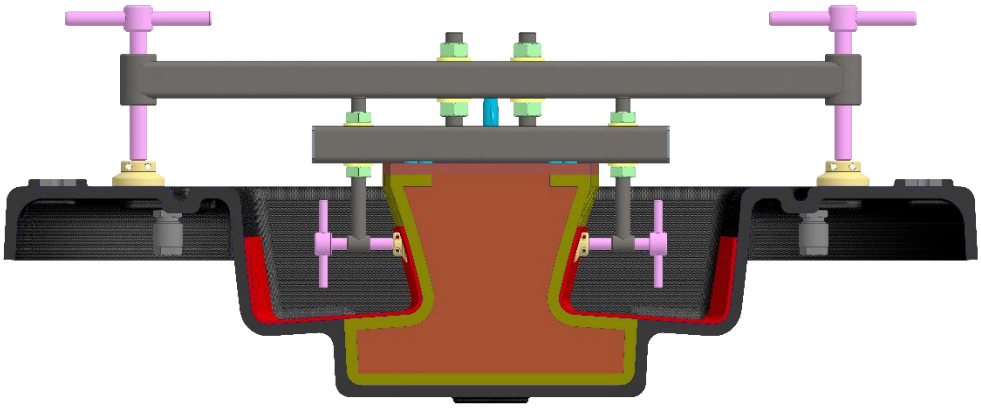

Рисунок 2 Геометрическая модель оснастки в разрезе

Для того чтобы модель материала давала результаты с высокой точностью, разработана концепция калибровочных образцов, служащих для уточнения ключевых параметров механической модели отверждения (рис. 2).

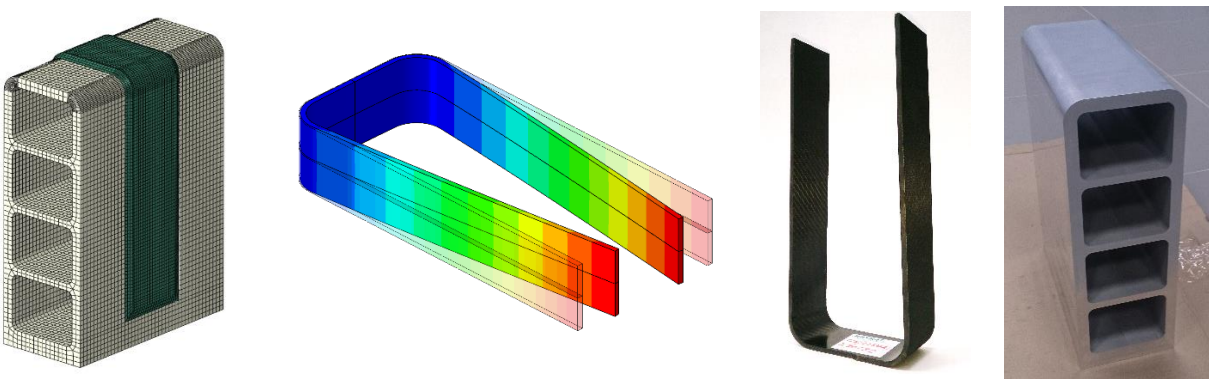

Рисунок 3 Калибровочный образец и его численное моделирование

Экспериментальному определению подлежали свойства связующего, а также базовые свойства композита на его основе. Для получения полного трехмерного набора свойств композита в конкретном изделии созданы и верифицированы аналитические инструменты двухуровневого осреднения, позволяющие получать значения тепловых и механических свойств композита для произвольных волокон, типа армирующего наполнителя и порядка укладки слоев, зависящие от объемной доли волокна.

3. Основные преимущества и характеристики разработанных материалов

Однокомпонентное высокотемпературное связующее разработанное специально для инфузии и RTM процессов;

- Отверждение при 180 °С дает температуру стеклования 205 °С;
- Широкое технологическое окно для проведения пропитки; не менее 7 часов при температуре 110 °С;
- Высокие физико-механические характеристики.

Свойства полимерной матрицы

Предел прочности при растяжении, Мпа 96

Модуль упругости, Гпа 3,1

Удлинение при разрыве, % 7,2

Предел прочности при изгибе, Мпа 152

КIС, Мпа* м1/2 0,624

GIC, Дж/м2 188

Температура стеклования Tg, ℃ 205

Двухкомпонентное связующее разработанное специально для вакуумной инфузии и RTM процессов;

- Соотношение компонентов А: В – 100: 40,9 (на единицу массы компонента А необходимо добавить 0,409 единиц компонента В);
- Отвержение при 120 ℃ дает температуру стеклования 128 ℃;
- Технологическое окно для проведения пропитки; не менее 2-х часов при температуре 50 ℃;
- Высокие физико-механические характеристики.

Свойства полимерной матрицы

Предел прочности при растяжении, МПа ASTM D638 85

Модуль упругости при растяжении, ГПа ASTM D638 3,1

Удлинение при разрыве, % 5,7

Температура стеклования Tg, ℃ FSTM E2092 128

ПКМ

Углепластик получен методом вакуумной инфузии на основе низкотемпературного связующего и стандартной углеродной ткани 22504 (8Н-сатин, 200 г/м2).

Предел прочности при сдвиге τ13,

Мпа при 25 ℃ ASTM D2344 70

Предел прочности при сдвиге τ13,

Мпа при 85 ℃ ASTM D2344 52

Высокие физико-механические характеристики конечного материала при изначально низкой вязкости и большой длительности технологического окна, что позволяет осуществлять пропитку деталей сложной геометрии и габаритов.

4. Производство

Основываясь на вышеизложенных подходах к проектированию деталей из ПКМ, проектированию формозадающей оснастки (ФЗО) и разработанному комплексу материалов появилась возможность изготавливать детали из ПКМ соответствующих заданным геометрическим формам и прочностным показателям.

При производстве деталей из ПКМ на производстве работы по выкладке слоев ткани в формообразующую оснастку выполняются с помощью лазерной проекционной системы состоящей из нескольких проекторов. Слои ткани вырезаются на специальном плоттере с одновременным нанесением информационной разметки. Программное обеспечение оборудования выполняется на этапе проектирования детали в КБ и технологическом отделе.

Рабочее место по выкладке слоев ткани в ФЗО приведено на рис. 4. ФЗО с рядом выложенных слоев ткани приведена на рис. 5.

Уложенные в ФЗО слои ткани подлежат дальнейшему пакетированию, вакуумируются и направляются в печь для пропитки связующим и полимеризации, по специально разработанным циклограммам.

Рисунок 4 Участок выкладки слоев ткани в оснастку

Рис 5. Формозадающая оснастка

Результаты работы

В части изготовления авиационных конструкций из ПКМ решена сложная задача изготовления крупноразмерных деталей с высокой геометрической точностью. Разработанная технология обеспечивает:

- сокращение сроков проектирования, технологической подготовки и трудоемкости изготовления;
- сквозной процесс от проектирования до изготовления детали;
- получение композита с низкой пористостью (<3%);
- получение стабильных характеристик изготовленных деталей;
- сокращение сроков и трудоемкости внесения изменений в КД и ТД;
- снижение вероятности возникновения ошибок при проектировании и изготовлении;
- оптимизацию конструкции, снижение веса деталей;
- увеличение коэффициента использования материала при раскрое до 90%;
- сокращение стоимости проектирования и изготовления деталей;
- высокую геометрическую точность деталей, что обеспечивает сборку агрегатов планера клеевым соединением без применения

компенсационных прокладок;

Результаты работы позволили осуществить изготовление опытных образцов беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета и внедрены в технологию опытного производства.

Рис. 6. Участок сборки БЛА

По результатам работы выпущена научно-техническая документация

Технологические процессы, в т.ч. специальные.

ТУ на ткани, связующие и тиксотропный клей.

Научная статья.

Технические отчеты.

Экономический эффект

Основной экономический эффект достигается за счет улучшения показателей приведенных в таблице. 1 изготовления деталей из ПКМ без дорогостоящего технологического оборудования (автоклавов).

Таблица 1.

Показатель	**Было**	**Стало**	**Эффект**
Время конструкторской подготовки производства	1,5 месяца	1 месяц	Сокращение в 1,5 раза
Срок внесения изменений в КД и ТД	Точные значения отличаются в зависимости от типа изменения		Сокращение в 3-4 раза
Коэффициент использования материала (ткани)	33%	75%	Повышение более, чем в 2 раза
Расход материала (ткани)	22,5 м	9,8 м	Сокращение на 110 % (на опытной детали шпангоут)
Время раскроя ткани	6 часов 40 минут	30 минут	Сокращение в 13 раз
Время выкладки ткани в форму	35 часов 15 минут	16 часов	Сокращение более, чем в 2 раза

Дополнительный экономический эффект достигается за счет изготовления деталей из ПКМ без использования дорогостоящего технологического оборудования (автоклавов).