Конкурсная работа

Автор: Кудрин Алексей Михайлович, к.ф.-м.н. (ЗАО «Русавиаинтер»)

Название работы: Технология адаптации материала (препрега) для комплексов автоматизированной выкладки

Цель: Разработка основных технологических решений для изготовления материла с высокими эксплуатационными и технологическими характеристиками, адаптированного для комплексов автоматизированной выкладки

Актуальность разработанной технологии: Задача снижения массы несущей конструкции и увеличения доли полезной нагрузки без ухудшения прочностных характеристик изделия всегда актуальна для авиакосмических производителей. Очевидное превосходство полимерных композиционных материалов (ПКМ) – низкий удельный вес в сочетании с высокими физико-механическими свойствами – делает их наиболее привлекательным инновационным материалом и, как следствие, создает устойчивую потребность в разработке новых наукоемких технологических решений, обеспечивающих применимость ПКМ.

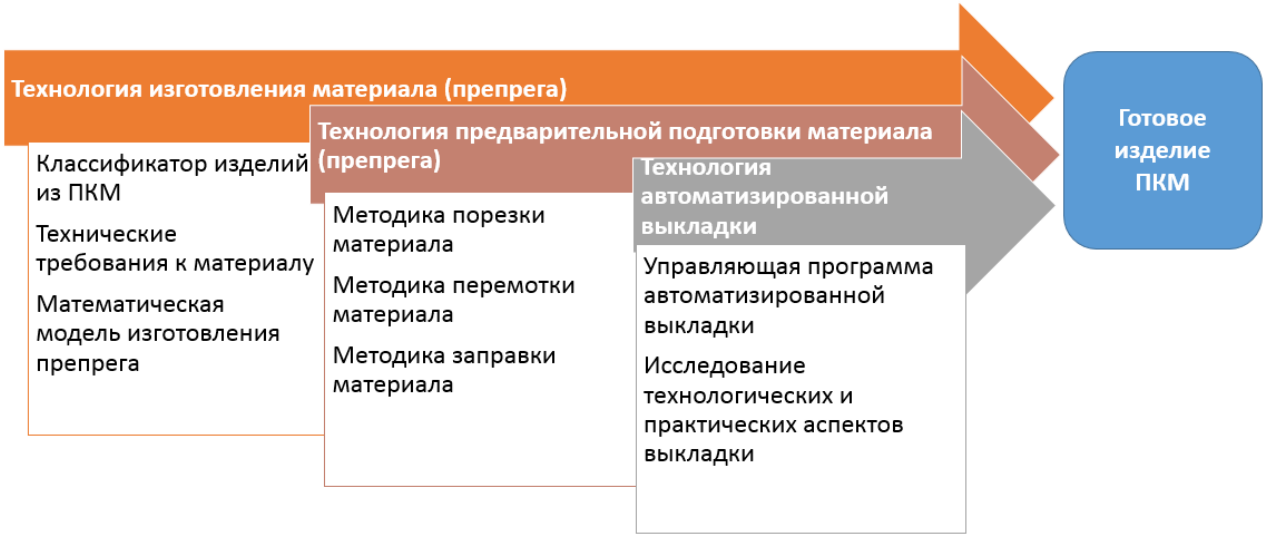
Эффективность применения композитного материала во многом предопределяется технологией его производства. Одной из ключевых технологий, применяемых для массового изготовления масштабируемых композиционных изделий, является препреговая с последующим автоклавным формованием. Нарастающая конкуренция на рынке диктует высокие требования к технологиям производства ПКМ. Инновационные методы изготовления изделий из ПКМ во многом связаны с применением автоматизированных методов выкладки, которые позволяют существенно повысить технологичность производства и сократить себестоимость готовой продукции за счет повышения производительности, увеличения качества продукции, снижения трудоемкости и сокращения брака. Кроме того, выкладка в автоматизированном режиме приводит к снижению загрязнения материала изделия, обеспечивает стабильность выходных прочностных, физических и геометрических параметров.

Вместе с тем многочисленные преимущества автоматизированной выкладки, высокий уровень компетенций отечественных инженеров и технологов не оказывают определяющего влияния на прорывное использование новой технологии. Комплексная проблема автоматизации выкладки – отсутствие адаптированного отечественного технологического сырья. Низкая технологичность существующих отечественных материалов не позволяет применять их напрямую без предварительной адаптации и отработки оптимальных технологических режимов изготовления и подготовки материалов. К тому же технологические особенности предварительных операций подготовки материала к процессу выкладки накладывают определенные ограничения к материалу сырья (препрегу). Адаптация существующих технологических материалов, с разработкой технологий их изготовления, является ключевым вопросом в решении задачи масштабного внедрения процесса автоматизированной выкладки в технологический цикл изготовления композитных изделий и снижения себестоимости изготовления

деталей и агрегатов из ПКМ.

Конкурентным преимуществом разработанной технологии, на примере изготовления экспериментальных готовых изделий – створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А, является возможность адаптировать технологический материал для любых комплексов автоматизированной выкладки с различными техническими и геометрическими требованиями с потенциалом изготовления целого класса авиационных изделий из ПКМ.

Описание технологии: Разработка технологии адаптации технологического материала (препрега), применимого для комплексов автоматизированной выкладки углеродных лент комплексный многоступенчатый процесс, включающий не только изготовление самого материала, но и все промежуточные этапы вплоть до готового изделия. Каждый технологический этап вносит ограничения в эксплуатационные характеристики препрега, которые необходимо учитывать еще на стадии формулировки технических требований на будущий материал. Ниже (на схеме) представлены основные этапы технологии адаптации на примере изготовления готового изделия.



1) Технология изготовления материала (препрега)

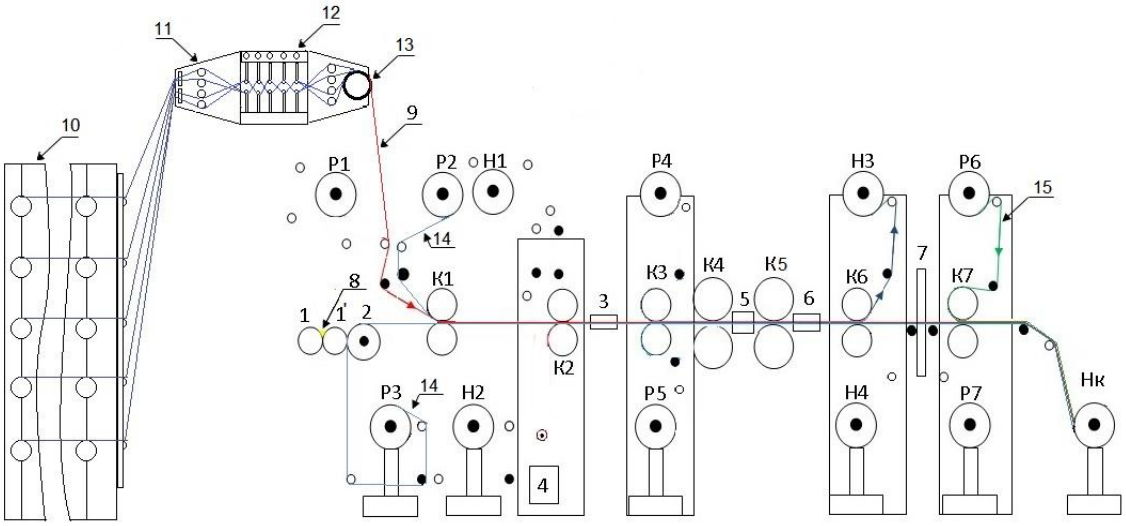
Главная задача технологического этапа – отработка технологии изготовления однонаправленного безуткового углеродного препрега. Отработка технологических режимов получения препрега на расплавной основе требует обеспечения не только заданных эксплуатационных характеристик изделий из ПКМ на их основе, но и реализацию различных комбинаций и режимов пропитки для сбора массива данных для создания математической модели технологического процесса изготовления препрега. Массив данных и построенная математическая модель, описывающая технологический этап пропитки, позволяет еще на стадии формулировки технических требований к материалу определить и задать необходимые режимы работы оборудования – технологического комплекса пропитки.

Изготовление препрега, адаптированного для систем автоматизированной выкладки, на примере изготовления готового изделия из ПКМ производилось на

опытном технологическом комплексе пропитки COS.T.A. (ФГБОУ ВО «ВГТУ») методом горячего расплава (hot-melt) в несколько этапов:

- формирование однонаправленной ленты, без зазоров, шириной до 400 мм с заданной поверхностной плотностью от 160 до 200 г/м^2;
- создание пленки связующего заданной ширины и толщины;
- совмещение сформированной однонаправленной ленты с пленкой связующего;
- процесс плавления и пропитка армирующего материала связующим и формирование необходимой толщины монослоя.

Технология получение препрега на основе безуткового углеродного однонаправленного наполнителя и расплавного связующего с использованием комплекса COS.T.A. схематически представлена ниже на рисунке.

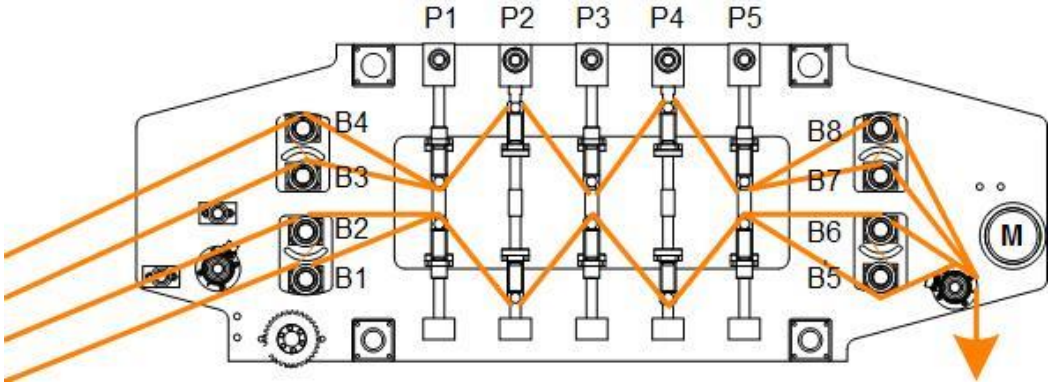


1 – дозирующие валы, 2 – ламинирующий вал, 3 – ИК-печь, 4 – ванна со связующим, 5 – нагревательная панель, 6 – охлаждающий стол, 7 – система контроля качества препрега QMS-12 MAHLO, 8 – связующее, 9 – сформированная лента, 10 – шпулярник, 11 – ролики с желобами, 12 – система натяжителей, 13 – мастер цилиндр, 14 – бумага, 15 – упаковочная пленка, P1-P7 – размотчики, H1-H4 – намотчики, K1-K7 – каландры, ● – тензодатчики, ○ – вспомогательные валы или ролики

Главной технологической особенностью изготовления материала, адаптированного для автоматизированной выкладки, а именно обладающего высокой технологичностью для предварительной подготовки (порезки и заправки), - было отсутствие уточных нитей (стеклянных и углеродных) в препреге. Для достижения поставленной цели было применено специальное техническое решение – изготовления безуткового препрега заданной поверхностной плотности с использование блока площения пропиточного комплекса (11-13 на блок-схеме комплекса).

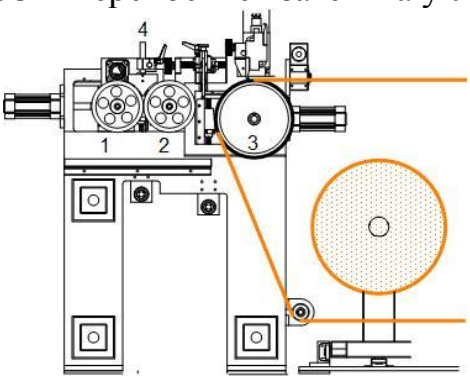
Для создания, направления и формирования однонаправленной безутковой углеродной ленты заданной поверхностной плотности – был модернизирован блок площения линии. Узел состоит из приводного устройства протягивания, управляемого тензодатчиками, из регулируемых роликов нитенаправителя, из хромированных, полированных валов на подшипниках,

имеющих желоба с определенным шагом для каждого волокна, и приводного механизма передвижения на колесиках. Расчет требуемой поверхностной плотности технологического материала позволил разработать валы нитенаправителя с уникальным шагом для волокон нитей. Схема заправки углеродных нитей в блок площения представлена схематично на рисунке.



P1 – P5 – ролики системы натяжения, B1 – B4 – входные направляющие валы, B5 – B8 – выходные направляющие валы

Также был модернизирован узел нанесения расплава связующего на бумагу – путем выбора соответствующих зазоров между валами 1, 2 и 3 (рисунок ниже) удалось точно контролировать долю нанесенного связующего в процентном соотношении к поверхностной плотности выбранной в качестве основы однонаправленной углеродной ленты. Подача клеевого связующего (4) осуществляется между валами 1 и 2, вращающимися вовнутрь, связующее попадает на бумагу с вала 3 и переносится затем на углеродную ленту.



Равномерность распределения связующего по ширине и длине препрега контролируется датчиком QMS-12 MAHLO в режиме реального времени – непосредственный контроль качества материала в ходе процесса пропитки.

Отработка технологии получения материала (препрега) заключалась в выборе оптимальных технологических режимов работы комплекса пропитки (скорость пропитки, зазоры и калибровки на валах нанесения) при различной вариации исходных материалов (процентное содержание связующего). Таким образом, было выявлено влияние фактов технологического процесса пропитки на конечные характеристики технологического материала (содержание связующего, поверхностная плотность материла). Для выходного контроля препрега – проводились физико-механические испытания элементарных образцов ПКМ, изготовленных на его основе для каждого режима пропитки. Значения физико-механических испытаний являлись – выходными (управляемыми) параметрами математической модели технологического

процесса изготовления материала (препрега).

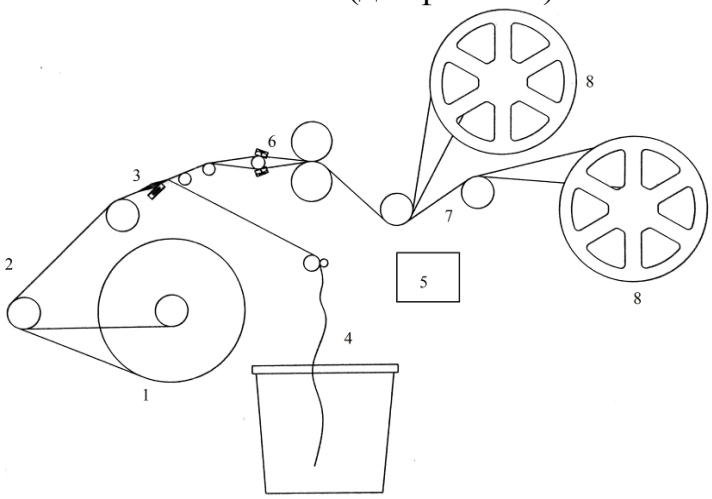
Математическое моделирование обеспечило управляемое изменение технологических параметров при отклонении критериев качества от заданных технических требований на материал.

2) Технология предварительной подготовки материала (препрега)

Отработка технологии порезки и заправки технологического материала предусматривает его применимость для комплекса автоматизированной выкладки. На этой стадии главным критерием качества материала является его «технологичность». Основная задача – обеспечить повторяемость результатов порезки материла на узкие углеродные ленты с допустимой для комплекса выкладки точностью. Технологичность материала напрямую определяет уровень брака на этапе предварительной подготовки:

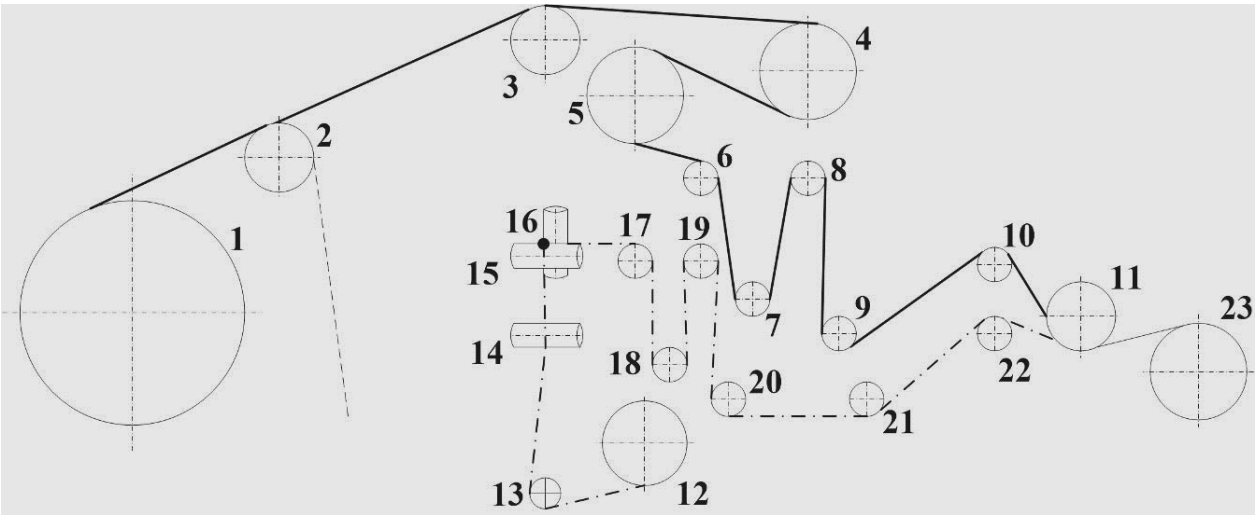
- расслаивания ленты при порезке и перемотке;
- коробления пленочной подложки при порезке;
- слипания соседних лент на бобинах и невозможность перемотки на шпули.

Исследование различных технологических режимов на специализированном оборудовании размотки и порезки «CDI Slitter» CD-8265GX (ПАО «ВАСО») позволило разработать оптимальные параметры перемотки и порезки, обеспечивающие высокую технологичность материала на стадии его адаптации к комплексу автоматизированной выкладки. На рисунке представлена схема размотки полотна препрега, нарезка его на ленты и движения лент при намотке их на бобины (диафильмы).

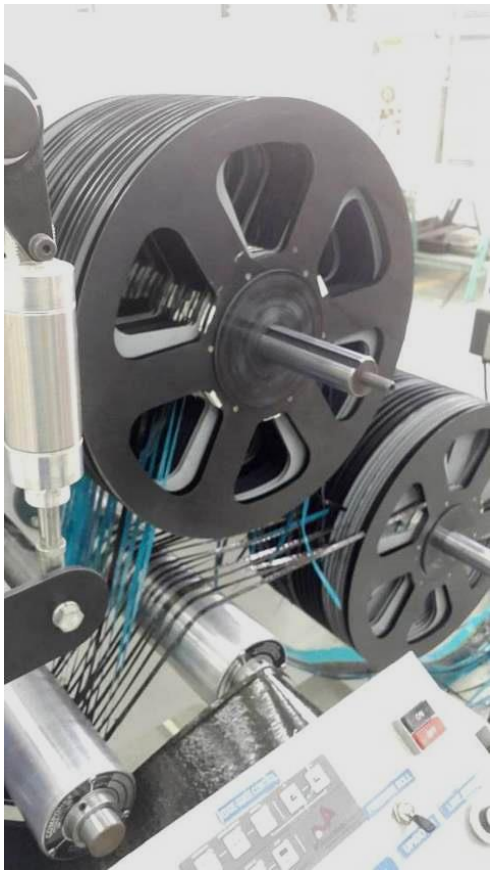


1 – рулон препрега, 2 – направляющий вал, 3 – блок удаления кромок полотна, 4 – сброс материала, 5 – панель управления, 6 – блок разделения подложки и материала для порезки, 7 – вал распускания лент препрега, 8 – бобина размотки

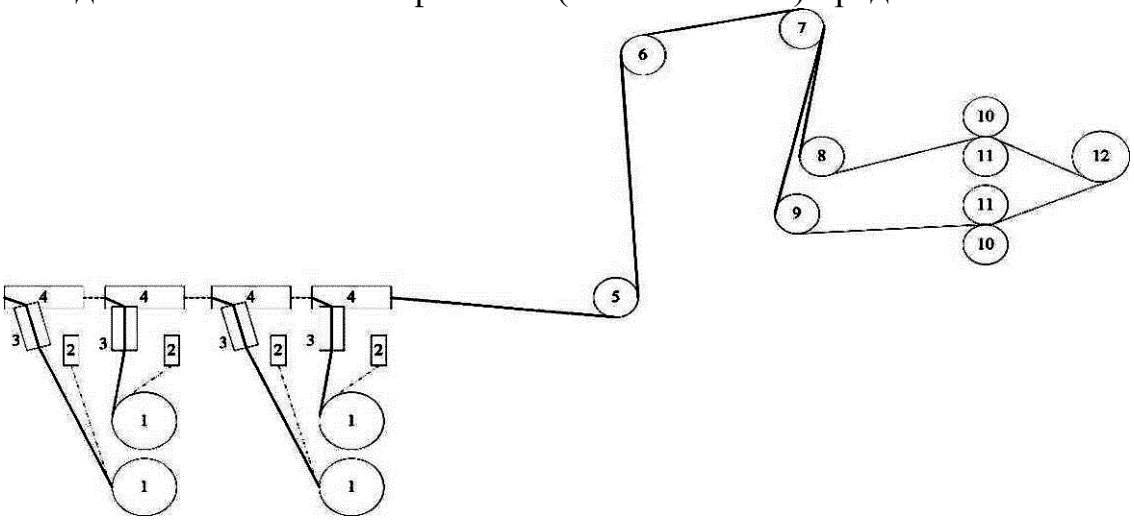
Перемотка материала с намотанного диафильма на шпули для использования на комплексе автоматизированной выкладки MAG Viper 1200 (ПАО «ВАСО») производилась на станке SAHM 460XE (ПАО «ВАСО»). Схема заправки станка перемотки лент препрега также представлена на рисунке.



1 – бобина с препрегом, 2 – механизм отделения подложки, 3, 6, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 19,20, 22 – направляющий ролик, 4, 5 – цилиндр выглаживания, 7, 9, 18, 21 – ролик натяжения, 11 – ролик укладки, 12- бобина подложки, 23 – шпиндель намотки со шпулей



Заправка технологического материала производилась в последовательности, определенной требованиями комплекса выкладки. Схема заправки для системы MAG Viper 1200 (ПАО «ВАСО») представлена ниже.

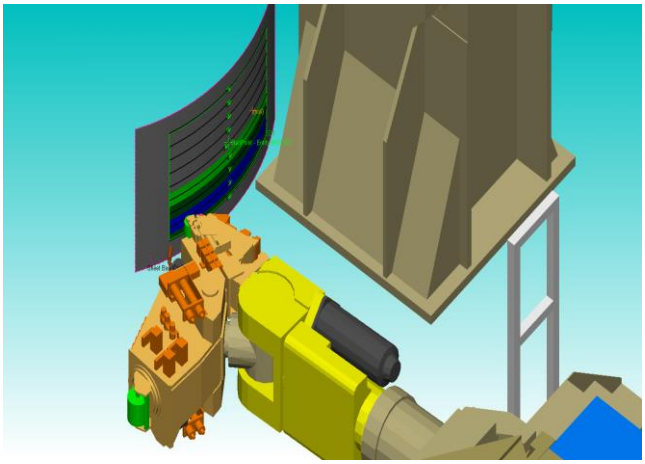
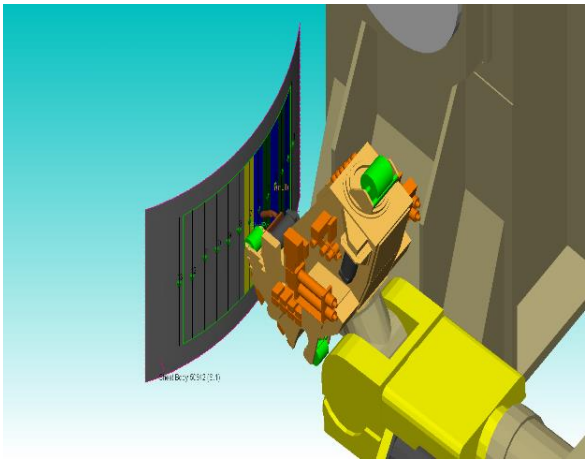
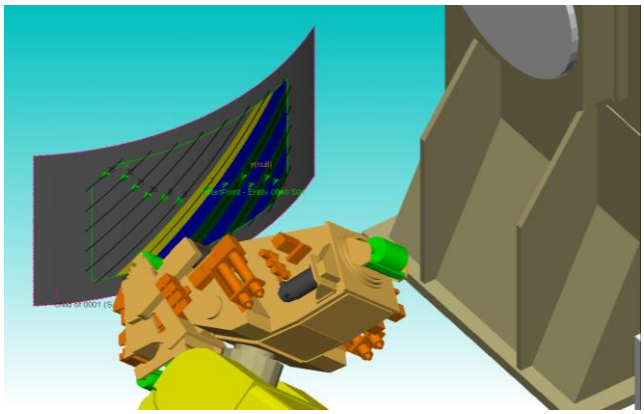
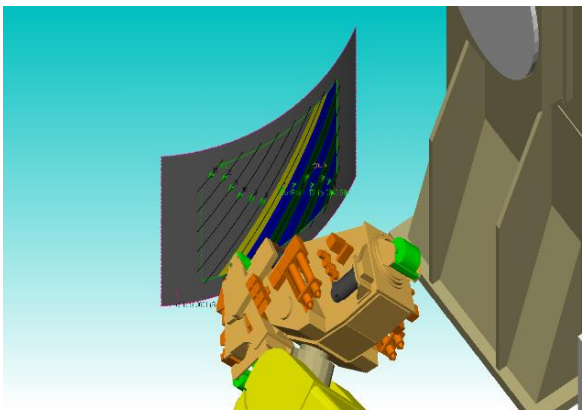


1 – шпулярник, 2 – трубка отвода подложки 3, 4 – разворотный ролик, 5 – направляющий барабан, 6, 7 – ролики компенсации движения головы, 8 – ролики четных лент, 9 – ролики нечетных лент, 10 – ведомые ролики протягивающего механизма, 11 – ведущий вал протягивающего механизма, 12 – ролики укладки препрега

3) Технология автоматизированной выкладки

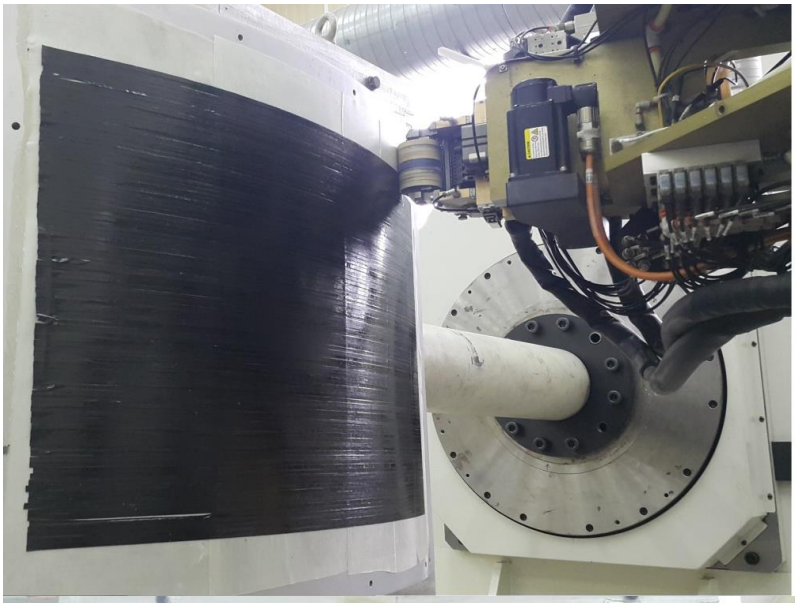
Качественная подготовка технологического материла (исходного сырья для комплекса выкладки) во многом задается повышенными требованиями, сформулированными программой выкладки к прецизионности процесса. Выкладка осуществляется согласно собственному разработанному универсальному технологическому регламенту, оптимизированному для отработки технологий автоматизированной выкладки композитных конструкций с любыми геометрическими параметрами и ориентацией слоев.

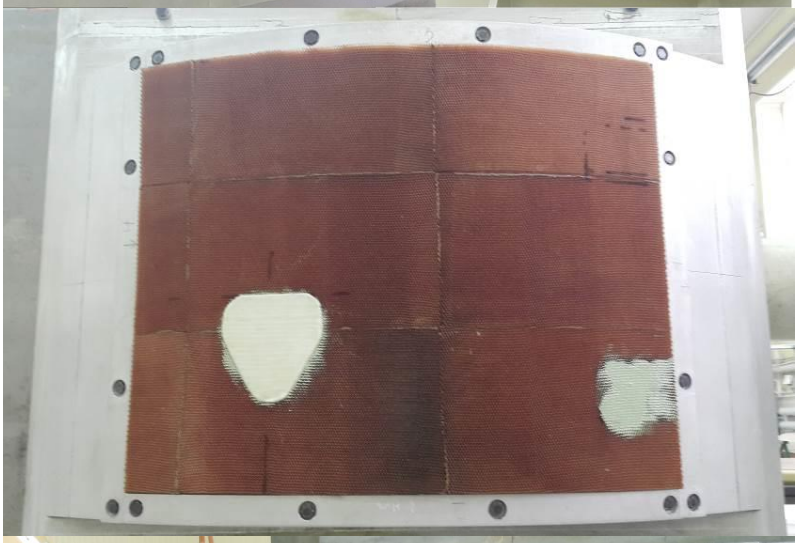
Задание точных параметров выкладки обеспечивается конкретной управляющей программой. Процесс разработки программы должен быть увязан с электронными моделями изготавливаемого изделия и криволинейной оснастки. Для комплекса выкладки MAG Viper 1200 (ПАО «ВАСО») в модуле Fibersim были заданы дополнительные характеристики изделия (конструктивное исполнение): сведения о материале, количество и направление слоев выкладки. Данные были переданы через графический интерфейс системы в среду программного обеспечения MAG Industrial Automation Systems ACE. В среде ACE были заданы технологические режимы работы станка (усилие прижатия ролика, температура подогрева оснастки, скорость движения ролика (скорость выкладки), сила натяжения лент препрега), а также была проведена обработка входящей информации (электронная модель изделия с конструктивным исполнением, технологическими режимами, электронная модель оснастки) и преобразование данных в управляющую программу для станка MAG Industrial Automation Systems Viper 1200. Возможности ПО позволяют пошагово визуализировать процесс выкладки.

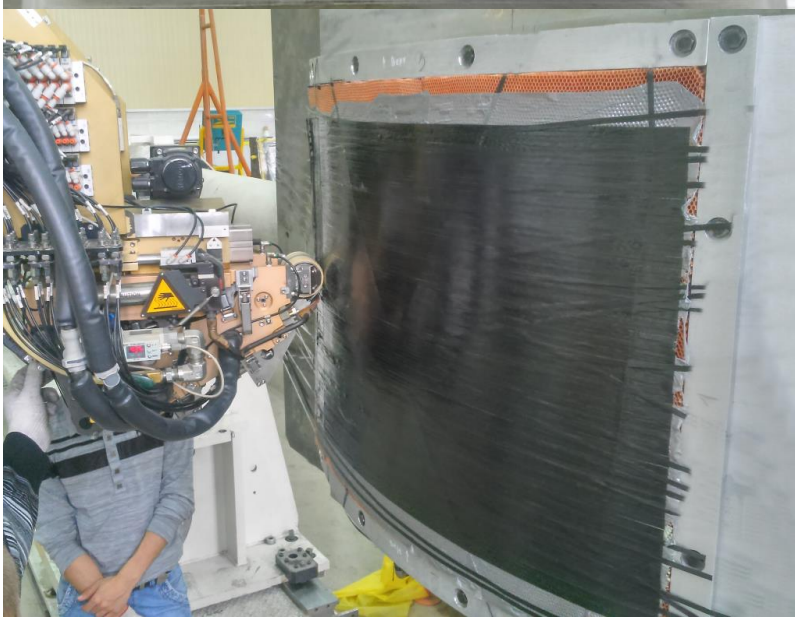





Производится позиционирование технологической оснастки, загрузка управляющей программы в систему ЧПУ системы выкладки, протягивание заправленных углеродных лент через ролики укладки в выкладочной голове станка.

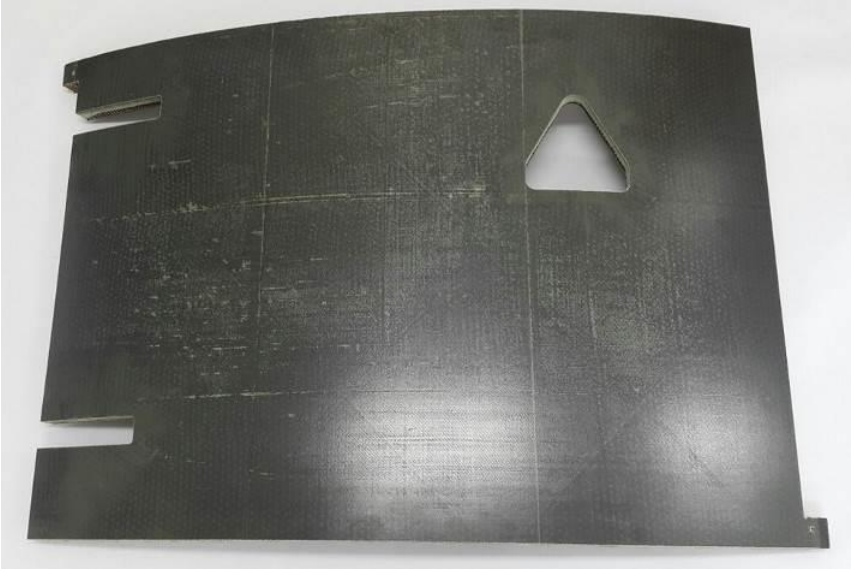
В качестве экспериментального готового изделия был выбран элемент створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А – трехслойная панель заданной кривизны с сотовым заполнителем. Выкладка панели производилась в один этап в соответствии в управляющей программой – укладка внутренней обшивки, закрепление сотового заполнителя, укладка наружной обшивки.







Технология дальнейшей переработки готовой детали (формование в автоклаве, фрезерование по контуру и изготовление технических отверстий) производилась в соответствии с директивной технологией изготовления конструктивноподобного изделия, без внесения изменений. Внешний вид готового элемента створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А представлен ниже на рисунке.



Исследовательские испытания технологического процесса автоматизированной выкладки, с учетом эксплуатационных требований по технологичности материала на стадиях предварительной подготовки, позволили определить оптимальный технологический режим для изготовления технологического материала (препрега) и сделать вывод о применимости разработанной технологии для изготовления подобных – аналогичных изделий, соответствующих выбранному классу авиационных агрегатов. По итогам работ разработаны технические требования на адаптированный технологический материал (препрег), обеспечивающие наилучшие технологические свойства для автоматизированной выкладки.

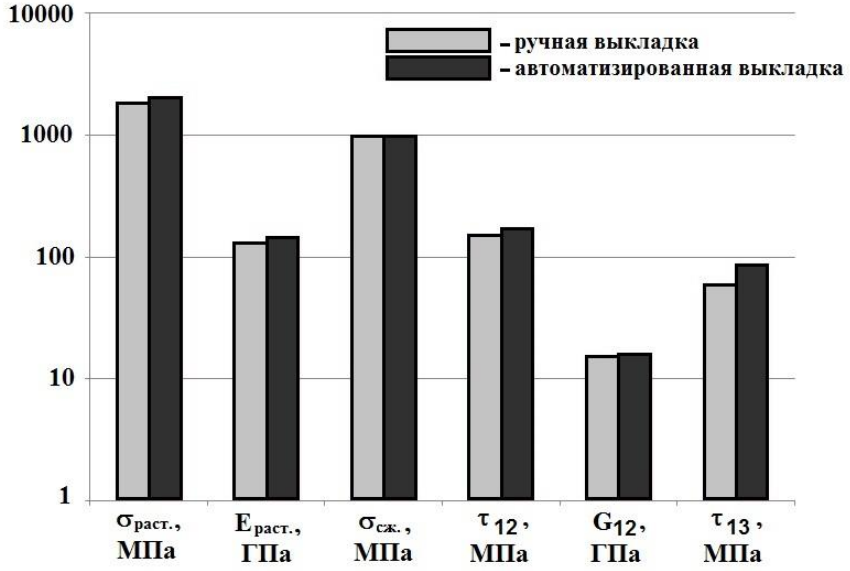
Результаты работ:

1) В части разработки технологии адаптации материала (препрега) для систем автоматизированной выкладки:

- разработаны комплекты нормативно-технологической документации (технологические регламенты, программы и методики испытаний) для технологических процессов изготовления однонаправленного безуткового препрега, предварительной переработки технологического материала, автоматизированной выкладки готового изделия;
- разработанная технология апробирована на примере изготовления створки мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А, доказана применимость технологии для изготовления целого класса конструктивноподобных авиационных изделий;
- высокая точность автоматизированной выкладки позволила идеально сохранить геометрию (отклонение от эталонной модели составило 0,2

мм при допустимых 0,5 мм), обеспечить повторяемость результатов;

– сравнительный анализ результатов основных физико-механических испытаний показал превосходство прочностных характеристик образцов ПКМ, выложенных в автоматизированном режиме, перед ручной выкладкой. Показательны усредненные результаты, полученные для значений предела прочности при межслоевом сдвиге (τ_{13}): применение автоматизированной выкладки повышает характеристику до 50 %, что доказывает высокую технологичность автоматизации технологического режима выкладки, повышая точность и качество укладки слоев, существенно снижая риск расслоения. Остальные сравнительные характеристики представлены на рисунке.



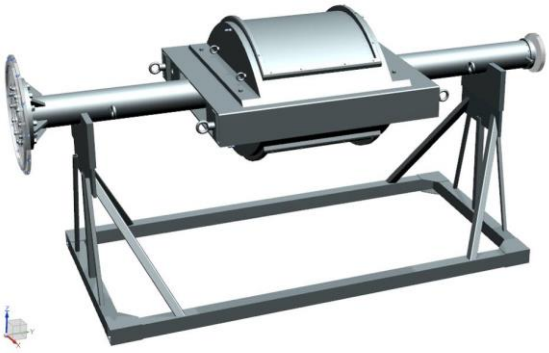
2) В части разработки композиционного материала с заданными эксплуатационными свойствами:

– разработана математическая модель технологического процесса изготовления материала (препрега), позволяющая на стадии пропитки прогнозировать выходные физико-механические характеристики будущего ПКМ;

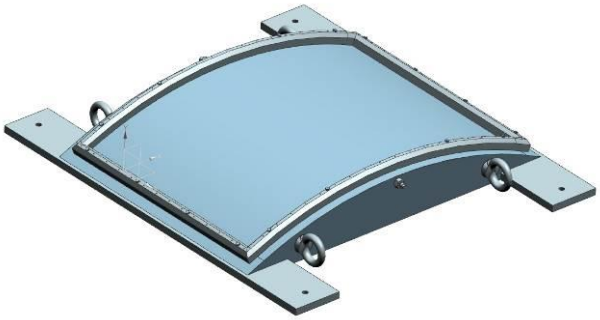
– получен патент на разработанную программу для ЭВМ «Прогнозирование результатов механических испытаний экспериментальных образцов ПКМАВ» (RU № 2016662272 от 20.12.2016 г.).

3) В части изготовления технологической оснастки для автоматизированной выкладки

– комплект технологической оснастки обладает не только совмещенностью (одновременная выкладка левой и правой створки с заданной поверхностью кривизны), но и однопереходностью технологии выкладки, позволяющей в один этап выкладывать трехслойные панели;



– комплект технологической оснастки универсален – имеется возможность крепления любой специальной оснастки на предметный стол;



– получен патент на полезную модель «Оснастка для получения конструкций из полимерных композиционных материалов» (RU №166663 U1 от 10.12.2016 г.)

4) Экономическая эффективность разработанной технологии

Расчет экономического эффекта произведен исключительно при производстве створок мотогондолы двигателя самолет ИЛ-76МД-90А по утвержденным годовым программам ПАО «ВАСО» до 2021 года. Эффективность достигается за счет снижения трудоемкости (на 40 %) и энергозатрат (в 2,7 раза при автоклавном формовании) при внедрении однопереходной автоматизированной технологии изготовления методом автоматизированной выкладки и обрезки. Погодовые финансовые показатели из расчета изготовления створок мотогондолы двигателя самолета ИЛ-76МД-90А:

Показатели	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	2	3	4	5	6	7	8
Годовой экономический эффект			2 449 284	4 898 568	6 531 424	6 531 424	6 531 424
Денежный поток по инвестиционной деятельности		-15 350 000					
Чистый денежный поток (по операционной и инвестиционной деятельности)	0	-15 350 000	2 449 284	4 898 568	6 531 424	6 531424	6 531 424
Кумулятивный денежный поток	0	-15 350 000	-12 900 716	-8 002 148	-1 470724	5 060 700	11 592 124

1	2	3	4	5	6	7	8
Дисконтированный денежный поток	0	-12 899 160	1 729 598	2 906 888	3 257 017	2 736 989	2 299 991
Дисконтированный денежный поток накопительным итогом	0	-12 899 160	-11 169 561	-8 262 674	-5 005657	-2 268 668	31 323
NPV	31 323						
IRR	19,09%						
Срок окупаемости проекта	**4,63**						