

УДК 629.7.002: 624.016

В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,
В.А. Коваленко, д-р техн. наук,
А.В. Кондратьев, д-р техн. наук,
М.А. Шевцова, канд. техн. наук

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОМПОЗИТНЫХ ОТСЕКОВ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ИХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ. СООБЩЕНИЕ 1

Введение

Как уже сообщалось в работах [1, 2], в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» в содружестве с ГП «Антонов», ГП «Конструкторское бюро «Южное» и другими профильными предприятиями отрасли на протяжении ряда лет проводится комплекс исследований, связанных с проблемой создания высокоэффективных конструктивно-технологических решений (КТР) композитных конструкций авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ), позволившее получить ряд новых научных результатов. Из полученных результатов важное значение имеют принципы и методы проектирования рациональных конструктивно-силовых схем (КСС) корпусов и крыльев летательных аппаратов (ЛА) из полимерных композиционных материалов (ПКМ); результаты исследований эффективности структуры композита; методы и методики экспериментального определения свойств ПКМ, в том числе в условиях эксплуатации; новые КТР соединений высоконагруженных деталей и агрегатов ЛА; методики их проектирования, расчета на прочность и сертификации; алгоритмы и программные комплексы оптимизации параметров элементов КСС ЛА из ПКМ; научные основы технологии производства изделий из ПКМ и др. [1, 2].

Однако анализируя современное состояние использования ПКМ в изделиях АРКТ как резерва повышения их массовой и функциональной эффективности, можно сделать вывод о том, что большой круг проблем, связанный как с оптимальным проектированием, производством, так и с эксплуатацией изделий, остается не решенным [3, 4]. Одной из них, без решения которой существенно сдерживается внедрение ПКМ, является разработка КТР крупногабаритных и высоконагруженных оболочечных композитных агрегатов и их соединительных узлов. Поэтому исследования, посвященные разработке методологии разработки эффективных КТР решений композитных отсеков АРКТ и их соединительных узлов, являются безусловно актуальным как в научном, так и в прикладном отношении.

Анализ проблемы

В последнее время рассматриваемой проблеме во всем мире уделяется все большее внимание, о чем свидетельствует появление многочисленных публикаций. Из последних работ следует отметить монографии [5, 6] и ряд статей [7 – 11]. Приведенная в этих работах информация о состоянии оптимального проектирования и технологии производства изделий АРКТ из ПКМ свидетельствует о достаточно высоком уровне решения обсуждаемой проблемы. Однако все эти работы объединяет то, что большинство предлагаемых в них подходов реализуют достаточно близкие по содержанию математические модели, требующие соответствующей идеализации конструкции и видов внешних воздействий на нее [5, 6]. Погрешности, вносимые этой идеализацией, могут не только нейтрализовать преимущества предложенных аналитических моделей, но и привести к несоответствию реальной несущей способности изделия прогнозируемой [8, 9]. В ряде случаев расчетные схемы рассмотренных типовых технологических дефектов композитных агрегатов также предельно упрощенные [5, 6, 8, 9], что не позволяет обобщить полученные результаты для выявления взаимодействия технологических факторов и их совместного влияния на несущую способность рационального варианта конструкции. В других случаях решение задачи строится на основе некоторых эвристических дополнительных предположений [5 – 7, 10] (равнопрочность и т.д.). Так же следует отметить, что при проведении оптимизационных расчетов рассматривается, как правило, характерно малое число переменных параметров [5 – 7, 10]. При этом учет конструктивных, технологических и любых других ограничений проведен достаточно упрощенно.

На стыковые и соединительные узлы композитных агрегатов АРКТ приходится более 25% массы, при этом они ответственны за 80% случаев разрушения ЛА. Поэтому актуальной проблемой является разработка КТР, которые наиболее полно учитывали бы специфические особенности ПКМ, технологию изготовления и сборки изделий, а также эксплуатационные требования. Разработке КТР соединений в последнее время уделяется большое внимание, например [11 – 15]. Так исправляя один из основных недостатков ПКМ: низкую межслойную прочность, композитные конструкции подвергают трехмерному армированию [12]. Низкий показатель прочности на смятие ПКМ компенсируется усиливающими накладками, шайбами, которые вызывают сильный прирост массы конструкции, в связи с чем внедряются фольга и наполнители связующих. Используемые в настоящее время компенсирующие накладки или шайбы существенно замедляет этот процесс [11], делая возможным применение модифицированных болтовых соединений [11, 12]. Использование же традиционных КТР для перехода от ПКМ к металлу, как известно, малоэффективно и ограничено из-за большой дополнительной массы и

значительных габаритов [13]. Все это существенно расширяет номенклатуру синтеза различных КТР соединений «металл-композит» [14, 15]. Отмеченные выше обстоятельства подтверждают необходимость разработки эффективных КТР такого класса соединений и соответствующего теоретического и экспериментального обеспечения для их расчета на прочность и проектирование.

Постановка и решение задачи

Анализ результатов ряда работ, освещающих научные основы технологии производства агрегатов АРКТ из ПКМ позволяет обоснованно выделить существенную часть этой проблемы, представленную блок-схемой (рис. 1), в которой за структурно-логическим иерархическим порядком содержания блоков 1 – 4 исследований, проведенных нами ранее [3, 4], прогнозируется необходимость решения ряда принципиально важных задач в рамках блоков 5 – 6, охватывающих ключевые аспекты научных основ технологии производства изделий этого класса.



Рисунок 1 – Блок-схема исследований научного обеспечения эффективной технологии производства агрегатов АРКТ из ПКМ

К таким задачам представляется оправданным отнести следующие:

- синтезировать теоретические основы технологии производства деталей, узлов и агрегатов из ПКМ;
- разработать новые методы и реализующие их алгоритмы классификации типовых процессов производства изделий из ПКМ
- проанализировать, модифицировать и предложить новые способы соединений деталей из ПКМ как между собой, так и с металлическими деталями.

Последовательному рассмотрению и решению данных задач и был посвящен первый этап комплекса исследований, проведенный в 2017 году на кафедрах конструкций и проектирования ракетной техники, композитных конструкций и авиационного материаловедения Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» в содружестве с профильными предприятиями отрасли [16].

Основным объектом исследований этого комплекса являются крупногабаритные оболочечные агрегаты АРКТ из ПКМ и их соединительные узлы. Предмет исследований – методология синтеза рациональных КСС и КТР крупногабаритных оболочечных композитных агрегатов отечественной АРКТ и их соединительных узлов.

Первый этап этого комплекса исследований посвящен развитию и совершенствованию теоретических основ технологии производства агрегатов АРКТ из ПКМ. Проведен анализ становления, развития и состояния технологии производства изделий из ПКМ, позволивший установить основные факторы, определяющие и стимулирующие создание теоретических основ технологии изготовления рассматриваемого класса конструкций в плане обеспечения их соответствия современным требованиям и критериям, предъявляемым к изделиям АРКТ. Были рассмотрены особенности основных типов технологических процессов, присущие производству АРКТ из ПКМ в соответствии с представленной на рис. 2 схемой принципиальной классификации типовых технологических процессов. Как следует из рис. 2, технологические процессы формообразования (формирования) из полуфабриката изделия представляют собой процессы придания полуфабрикату на формообразующей оснастке заданной и фиксируемой (обеспечиваемой) оснасткой неустойчивой формы, сохраняемой только благодаря этой оснастке. Эти процессы только создают условия для реализации в изделии заданных геометрии, ФМХ и обеспечиваемой ими жесткости [16]. Технологические процессы формования изделия представляют собой процессы придания сформированному на формообразующей оснастке полуфабрикату функциональных свойств и необходимой устойчивой формы изделия. Эти процессы реализуют условия, создаваемые различными процессами формообразования путем обеспечения отверждения связующего в полуфабрикате соответствующими технологическими режимами давления и температуры в заданные временные интервалы [16, 17].

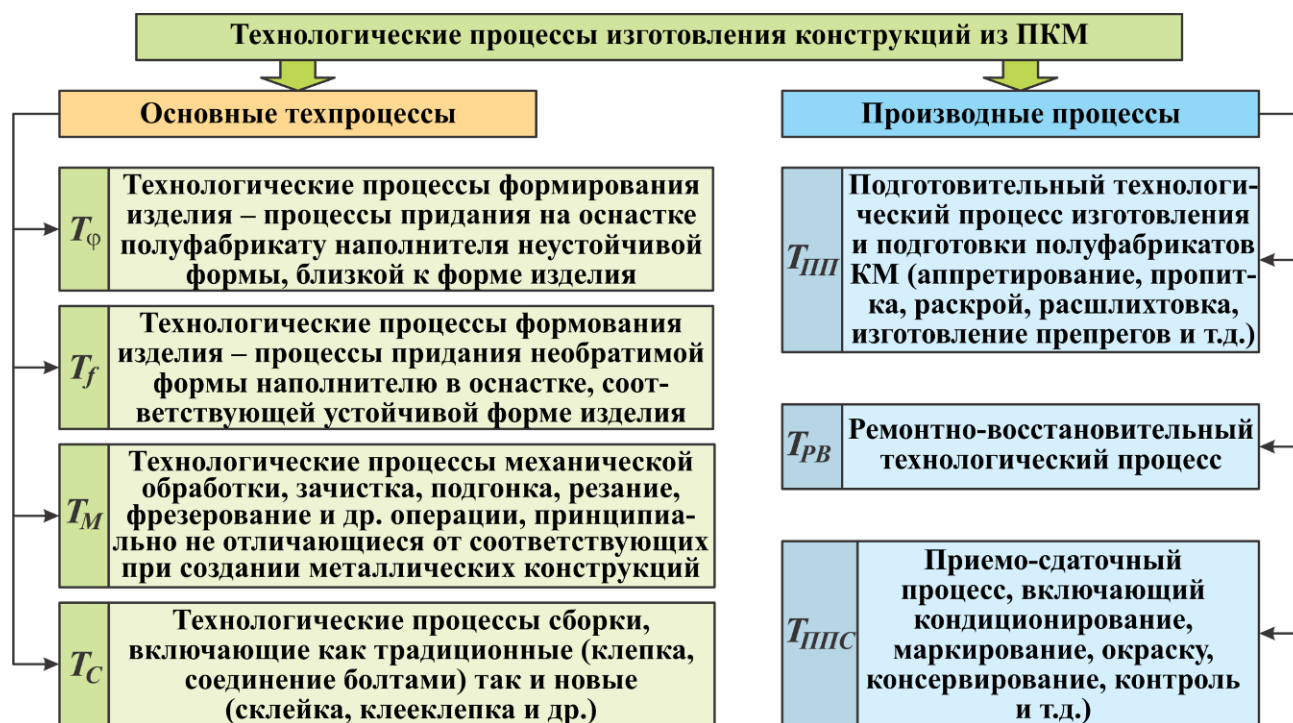


Рисунок 2 – Схема принципиальной классификации типовых технологических процессов производства изделий АРКТ из ПКМ

Технологические процессы механообработки включают в себя все ее виды, принципиально не отличающиеся от применяемых при производстве металлических изделий. Существенные различия имеют место в режимах различных видов механообработки и соответствующих параметрах инструмента (геометрии режущих кромок и материале) [18].

Технологические процессы сборки изделий из ПКМ имеют ряд специфических особенностей по сравнению с аналогами из металлов. Эти особенности ярко проявляются на стадиях сборки узлов и агрегатов (отсеков), в то время как общая сборка изделия АРКТ практически не имеет принципиальных отличий от сборки из металлических агрегатов [16 – 18].

К группе вспомогательных технологических процессов относятся подготовительные процессы, заключающиеся в подготовке армирующих материалов, приготовлении связующего и их комбинирования в виде препрегов, ремонтно-восстановительные и приемо-сдаточные процессы.

На основе классификаций предшествующих исследователей и зарубежного опыта разработки и использования типовых процессов производства изделий АРКТ из ПКМ уточнена и расширена их номенклатура с учетом современных достижений в области технологии создания ответственных конструкций АРКТ из ПКМ.

Синтезирована и обоснована виртуальная (условная) блок-схема создания новых агрегатов АРКТ в системе корпорации «проектирование – производство» отечественной отрасли, общая для объектов из традиционных материалов и ПКМ. Разработанная блок-схема реализована в структуре–ГП «КБ «Южное» (рис. 3) при изготовлении ряда изделий.

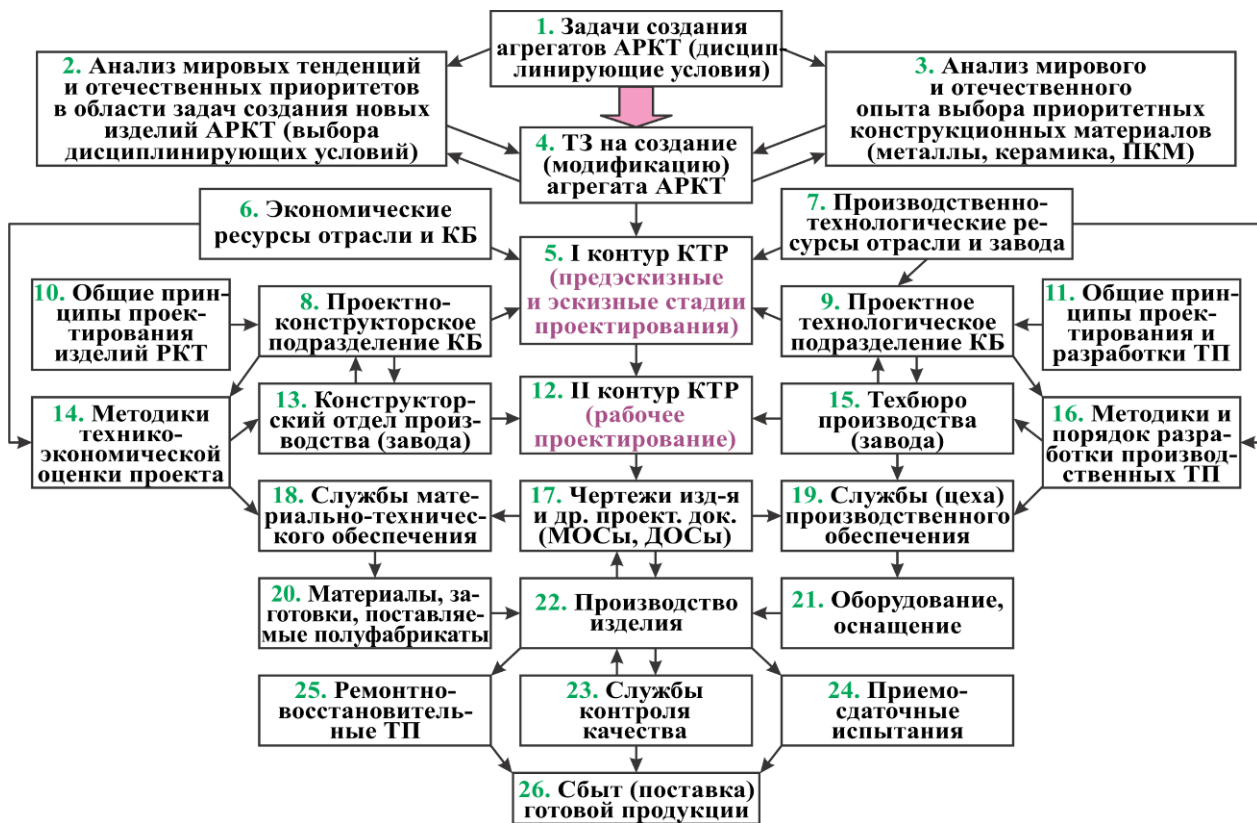


Рисунок 3 – Виртуальная (условная) блок-схема создания новых агрегатов АРКТ в системе корпорации «проектирование – производство» (КБ – завод)

Синтезированная блок-схема названа виртуальной (условной) в том смысле, что она не отражает в деталях реальную схему решения задач создания агрегатов АРКТ (дисциплинирующих условий) конкретной структурой взаимодействия подразделений КБ и завода, на котором реализуется проект, в частности – ГП «Конструкторское бюро «Южное»» и ГП «Южный машиностроительный завод» [17]. Назначение этой блок-схемы – выявить необходимые и достаточные условия реализации поставленных общих задач, сформулированных в [19] путем функционирования предложенной нами системы, синтезированной обобщением опыта и научного потенциала, содержащихся в ряде проектных и проектно-производственных организаций и предприятий советского и постсоветского периодов, а также дальнего зарубежья. В соответствии с предложенной блок-схемой ТЗ на создание или модификацию агрегата АРКТ (блок 4) формулируется заказчиком проекта совместно с реализующим проект КБ на основе дисциплинирующих условий, приведенных в таблице (или несколько отличающихся, что не является принципиальным).

При этом на стадии формирования ТЗ происходит непрерывный взаимообразный (прямой и обратный) итерационный процесс с условными блоками 2 и 3, конкретное содержание которых может иметь различные формы и находиться либо в службах Заказчика, либо в структурах КБ или даже вне этих объектов системы.

Сформированное в блоке 4 ТЗ является необходимым (но не достаточным) условием синтеза I контура КТР, соответствующего стадиям (этапам) предэскизной и эскизной реализации проекта. Этот контур формируется с учетом информации об экономических ресурсах отрасли и КБ (блок 6), производственно-технических ресурсах отрасли и завода-изготовителя (блок 7). Как уже отмечалось выше, информация, содержащаяся в этих условно выделяемых блоках, фактически может находиться в службах министерства и (или) ряда организаций самого разного подчинения, выполняющих роль соисполнителей проекта в различных организационных формах.

В формировании I контура КТР важное место принадлежит проектно-конструкторским (блок 8) и проектно-технологическим (блок 9) подразделениям КБ условно высшего уровня (отделений), содержащих соответствующее научное обеспечение, базирующееся на общих принципах и правилах проектирования изделий АРКТ (блок 10) и общих принципах и правилах проектирования и разработки технологических процессов (блок 11).

От информативности этих блоков, в которых должны быть интегрированы последние достижения современных информационных технологий, существенно зависит качество I контура КТР изделия АРКТ, которое закладывается в основу II контура КТР, соответствующего уровню и этапу рабочего проектирования (блок 12).

Этот блок формируется на базе проектно-конструкторской структуры завода-изготовителя (блок 13), находящегося в перманентном прямом (непосредственном) взаимном обмене информацией с блоком 8 и опосредствованной ее поставкой через блок 6 и блок 14, содержащие методики технико-экономической оценки проекта.

Аналогично функционирует и правая ветвь виртуальной блок-схемы, в которой непосредственное участие в формировании II контура КТР принимает блок 15, условно являющийся носителем информации уровня техбюро завода, с которым происходит обмен информацией блока 16, взаимодействующего с блоками 9 и 19. При этом блок 16, содержащий методики и порядок разработки ориентированных на непосредственное производство технологических процессов, получает дополнительно информацию из блоков 7 и 9 и обеспечивает ею совместно с блоком 5 службы (цеха) производственного подчинения (блок 19).

Следствием II контура КТР являются чертежи изделия и другая проектно-конструкторская документация (блок 17), являющаяся основной информацией для служб материально-технического обеспечения (блок 18), получающего дополнительную информацию из блока 14 и поставляющего ее в блок 20.

Аналогично функционирует правая ветвь блок-схемы, в которой информация блока 17 поставляется в службы (цеха) производственного обеспечения завода (блок 19), получающего дополнительную информацию из блока 16 и поставляющего ее в блок 21, снабжающий собственно

производство изделия (блок 22) оборудованием, оснащением и инструментом.

Результатом блока 22 является готовое изделие, при необходимости проходящее те или иные ремонтно-восстановительные процессы (блок 25), службы контроля качества (блок 23) и приемо-сдаточные испытания (блок 24), после которых осуществляется сбыт (поставка) готовой продукции.

На самом рабочем месте в блоке 22 осуществляется изготовление одного или нескольких агрегатов АРКТ одновременно. С этого рабочего места выходят кондиционные объекты производства, изменившие форму, размеры, свойства, а также бракованные объекты с параметрами, не соответствующими техническим требованиям (не прошедшие блоки 23, 24 и 25), а также отходы основных и вспомогательных материалов. Кроме того, на выходе имеется информация о состоянии объектов производства, если она получена в процессе выполнения того или иного технологического процесса (рис. 4) [20, 21].



Рисунок 4 – Средства оснащения и функции рабочего места

Типовая структура машиностроительного завода показана на рис. 5 [20, 21].

В проведенном анализе принципиальных аспектов теоретических основ технологии производства деталей, узлов и агрегатов АРКТ из ПКМ вскрыты роль и место общих принципов проектирования технологических процессов производства изделий исследуемого класса и разработана блок-схема научного обеспечения эффективной технологии производства агрегатов АРКТ из ПКМ, отличающаяся их принципиальной ориентацией на аспекты достижения высокого качества изделий, определяемые квалиметрией КТР, регламентами полей допусков на типовые технологические дефекты микро- и макроуровней (рис. 1) [3, 4].

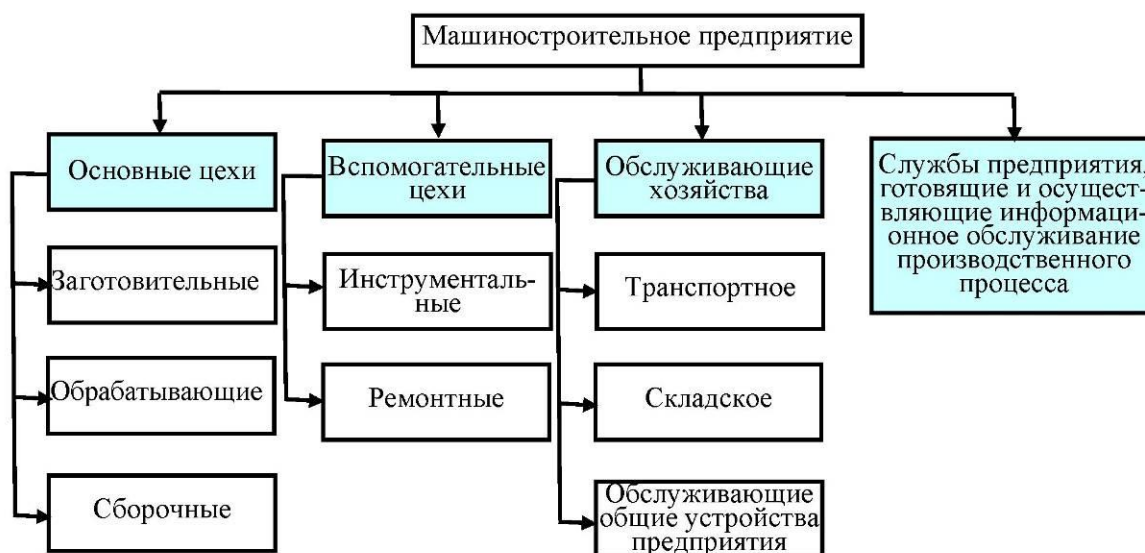


Рисунок 5 – Производственная структура машиностроительного предприятия

Попытка синтезировать основные принципы и методику проектирования технологических процессов производства изделий из ПКМ, основываясь на результатах преимущественно своих исследований процессов намотки, была сделана Цыплаковым О.Г. [22]. Анализ изложенных им результатов в одном из разделов монографии [22] показывает, что, несмотря на отдельные научно обоснованные выводы в целом, его классификацию принципов нельзя признать достаточно аргументированной. На наш взгляд [17, 23], эта классификация содержит ряд ошибочных положений как в методологическом, так и в иерархическом аспектах. Ранее нами в работах [17, 23] сделана попытка провести краткий анализ условий, предлагаемых в работе [22] в качестве основных принципов проектирования технологических процессов производства конструкций из ПКМ. Так, несмотря на то, что в работе [22] выдвинуто 22 условия в качестве основных принципов, в ней не выделяется основной принцип оптимального технологического обеспечения структурно-силовых сочетаний компонентов ПКМ в изделии, прямо следующий из условия реализации основных принципов конструирования изделий из ПКМ [24] в процессе технологической подготовки производства. В то же время из этого принципа непосредственно вытекают основные правила проектирования техпроцессов, в той или иной степени выделяемые автором работы [22] в ранг независимых принципов. Ряд условий работы [22] не могут при обоснованном анализе быть выделенными ни как принцип, ни как правило проектирования технологических процессов [17, 23]. Основываясь на современных результатах исследований ученых в области технологии производства изделий авиакосмической техники из ПКМ [24 – 29] была предложена классификация, которая исходит из иерархической структуры системы принципов (рис. 6).

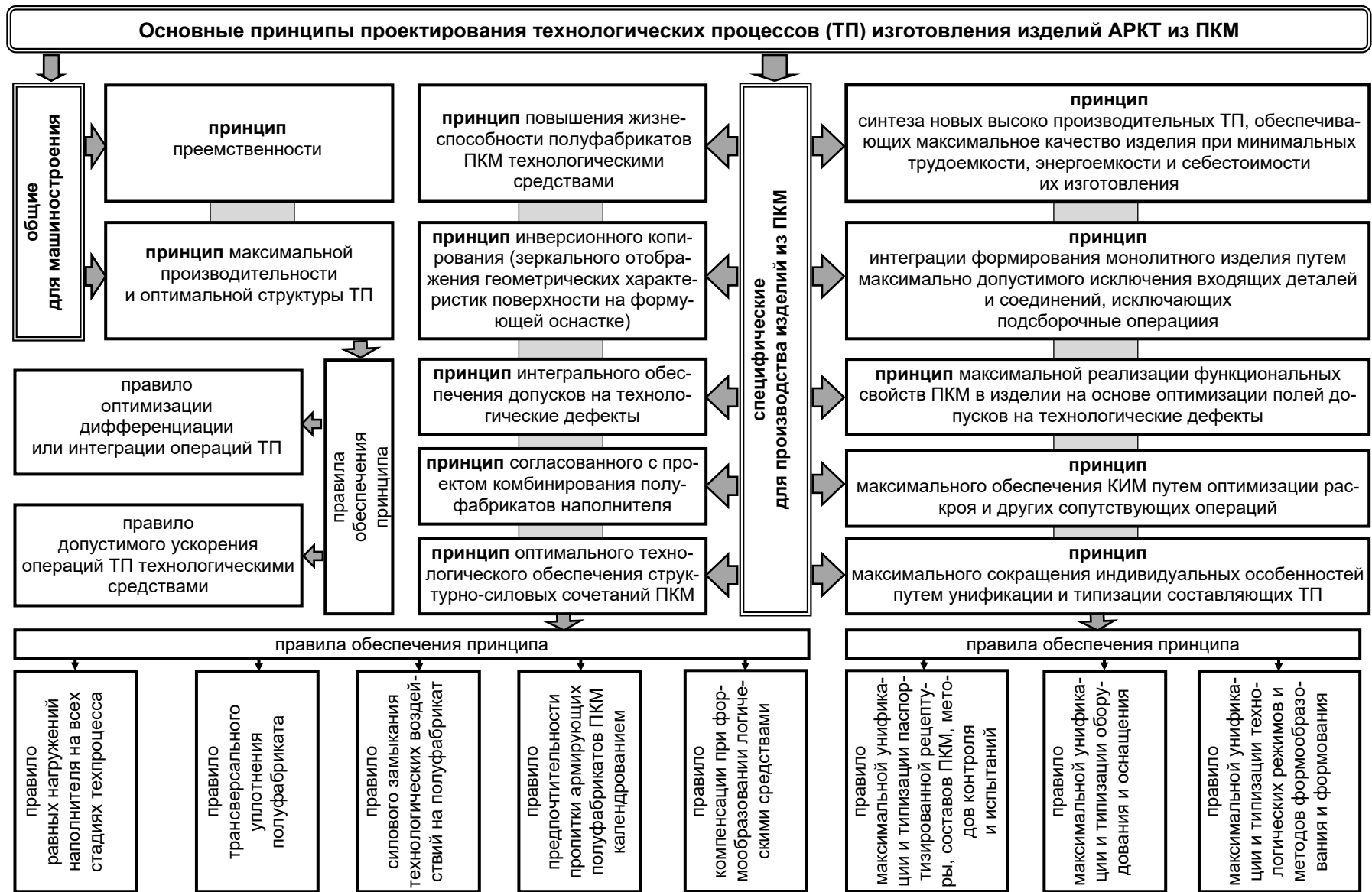


Рисунок 6 – Основные принципы и правила проектирования технологических процессов изготовления изделий АРКТ из ПКМ

В основе этой классификации лежат две категории принципов проектирования технологических процессов: 1 – общих для машиностроения и 2 – специфических для производства изделий из ПКМ. Первая категория содержит два основных принципа, один из которых включает в себя два основных правила проектирования технологических процессов, содержащих в себе и соответствующие условия, формулируемые в работе [22] как независимые принципы.

Вторая категория включает 10 принципов, специфических для изделий из ПКМ, четыре из которых содержатся и в классификации [22], а остальные шесть синтезированы нами на основе анализа результатов исследований [17, 23]. Из основного принципа этой категории – принципа оптимального технологического обеспечения структурно-силовых сочетаний компонентов ПКМ в изделии – следуют 6 правил проектирования технологических процессов производства изделий из ПКМ, в той или иной мере включающих в себя содержание условий классификации [22], представленные автором в качестве независимых принципов. Предложенная нами классификация основных принципов и правил проектирования технологических процессов производства изделий из ПКМ, как легко видеть, непосредственно вытекает из представленных в блоках 1 – 4 блок-схемы рис. 1 результатов исследований, относящихся к сфере теоретических основ технической подготовки производства изделий АРКТ из ПКМ и не противоречива (сохраняет принцип преемственности) современным концепциям технологии производства ответственных композитных агрегатов рассматриваемой наукоемкой отрасли.

Все отмеченное выше позволяет рекомендовать эти принципы и правила ОКБ и предприятиям, занимающимся вопросами технологической подготовки производства изделий АРКТ из ПКМ

Заключительным этапом исследований стал анализ, модификация и разработка новых способов соединений деталей из ПКМ как между собой, так и с металлическими деталями.

На основе существующего опыта изготовления агрегатов из ПКМ, возможностей применяемых техпроцессов и оснащения для их производства, а также требований, предъявляемых к подкрепленным композитным панелям, предложена их классификация по типу пересечения элементов продольного и поперечного силового набора (рис. 7). Данная классификация предусматривает деление композитных подкрепленных панелей на 4 класса:

- с непрерывными продольными и поперечными ребрами;
- с непрерывными продольными и дискретными (секционированными) поперечными ребрами;
- с дискретными продольными ребрами и непрерывными поперечными;
- с дискретными продольными и поперечными ребрами.

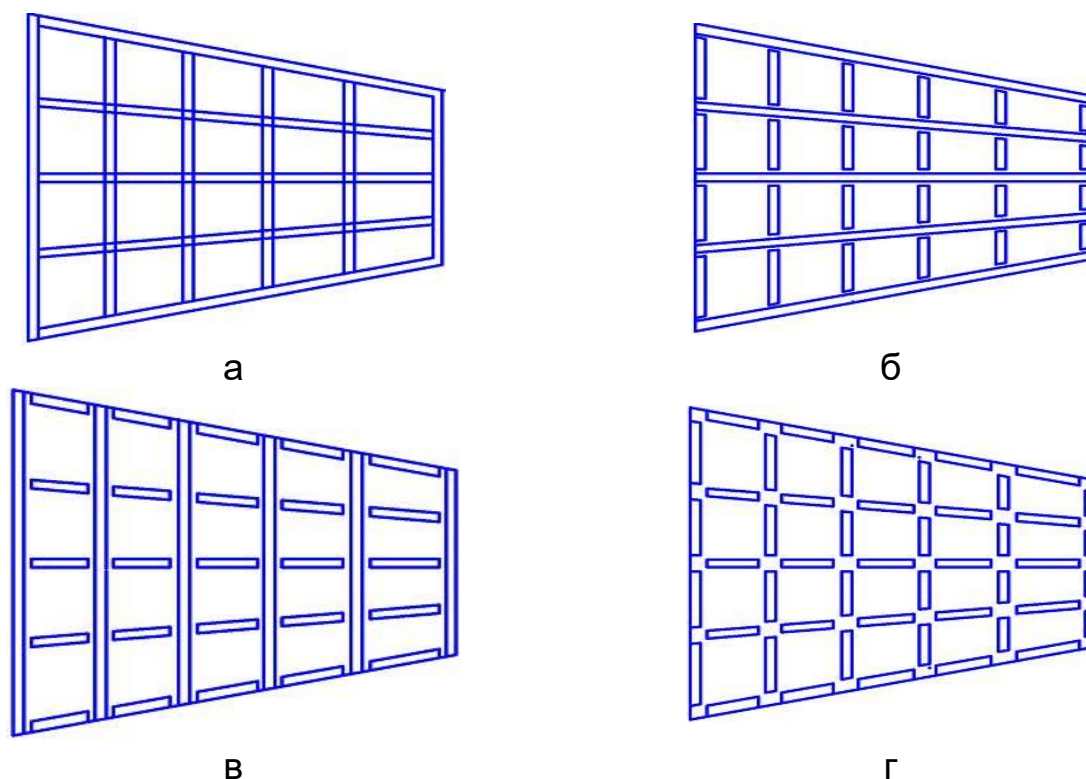


Рисунок 7 – Классификация панелей по типу пересечения элементов продольного и поперечного силового набора:

а – с непрерывными продольными и поперечными ребрами; б – с непрерывными продольными и дискретными (секционированными) поперечными ребрами; в – с дискретными продольными ребрами и непрерывными поперечными; г – с дискретными продольными и поперечными ребрами

Предложенная классификация обуславливает и предопределяет основные КТР соединения ребер в местах их пересечения, которые во многом зависят от технологии их образования и формования, а также сборки панели в целом. Сформулированы основные факторы и требования, влияющие на выбор типа соединения продольных и поперечных ребер [16]. Разработаны эскизные КТР обшивки с продольно-поперечным подкреплением (рис. 8). С учетом того, что наиболее полной реализации свойств ПКМ можно добиться при сохранении целостности волокон армирующего материала в продольных и поперечных силовых элементах, предложены два КТР подкрепленных панелей – с пересечением ребер (рис. 8, а) и с разнесением их по высоте (рис. 8, б). Сформулированы основные рекомендации позволяющие повысить качество соединений ребер между собой, а также с обшивкой [16]. В частности, формование утолщения в зоне пересечения ребер с использованием резиновых или силиконовых вкладышей, образование ребер с призматическим поперечным сечением, облегчающим процесс формования, выкладка части слоев обшивки между ребрами с отбортовкой на них и др.

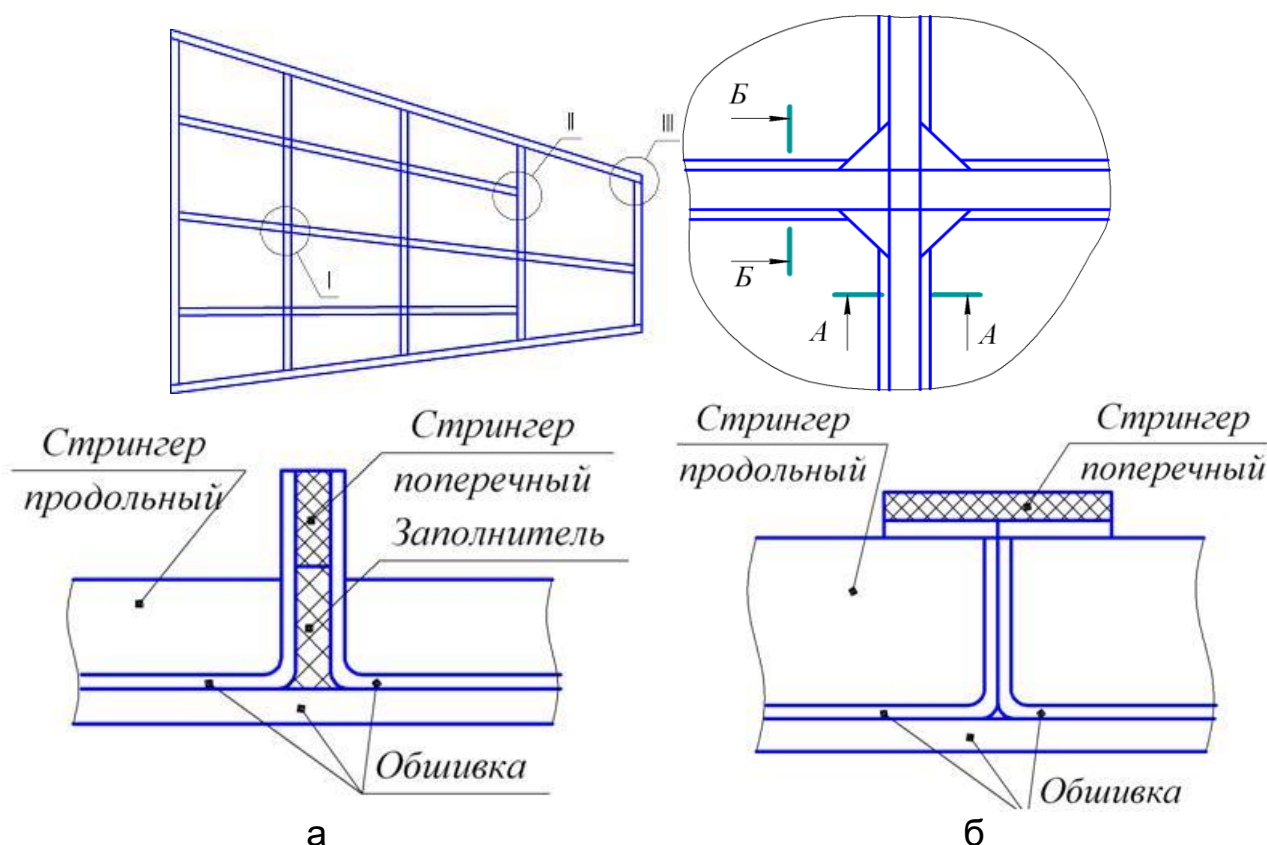


Рисунок 8 – Эскизные конструктивно-технологические решения панелей обшивки с продольно-поперечным подкреплением:
а – с пересечением ребер; б – с разнесением ребер по высоте

Разработанные типовые КТР соединения непрерывных и дискретных элементов продольного и поперечного набора показаны на рис. 9.

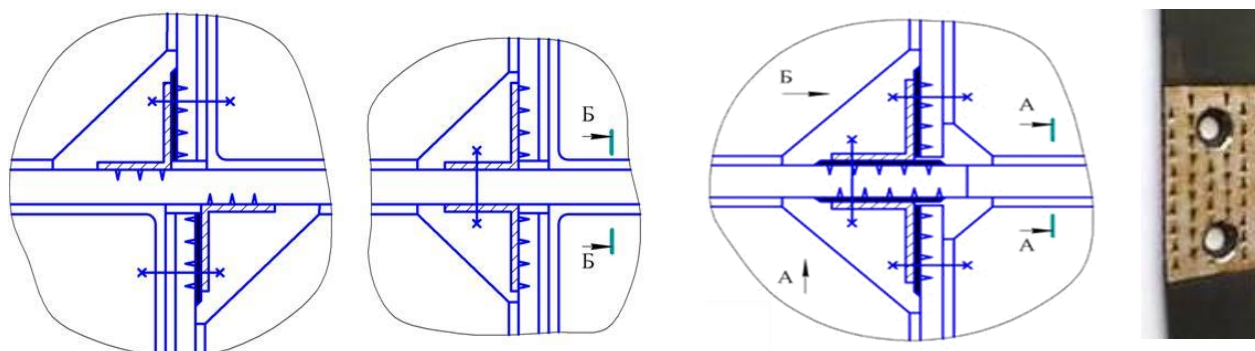


Рисунок 9 – Разработанные КТР соединения непрерывных и дискретных элементов продольного и поперечного набора

Отличительными особенностями данных КТР является применение соединительных фитингов с элементами поперечной связи, внедряемых в ПКМ на стадии изготовления ребер, а также усиление композитных ребер в зоне сверления отверстий накладками из фольги (или тонкого листа) толщиной 0,2...0,5 мм, в которых штамповкой образованы зубья типа «канцелярская кнопка». В зависимости от технологии сборки карка-

са (из готовых элементов или выкладкой из препрегов) расположение соединительных фитингов (книц) с крепежными элементами поперечной связи может быть разнообразным [16].

Концептуально новое КТР представлено на рис. 10, суть которого заключается в использовании специальных соединительных профилей для соединения дискретных продольных и поперечных ребер, которые изготавливаются отдельно [16].

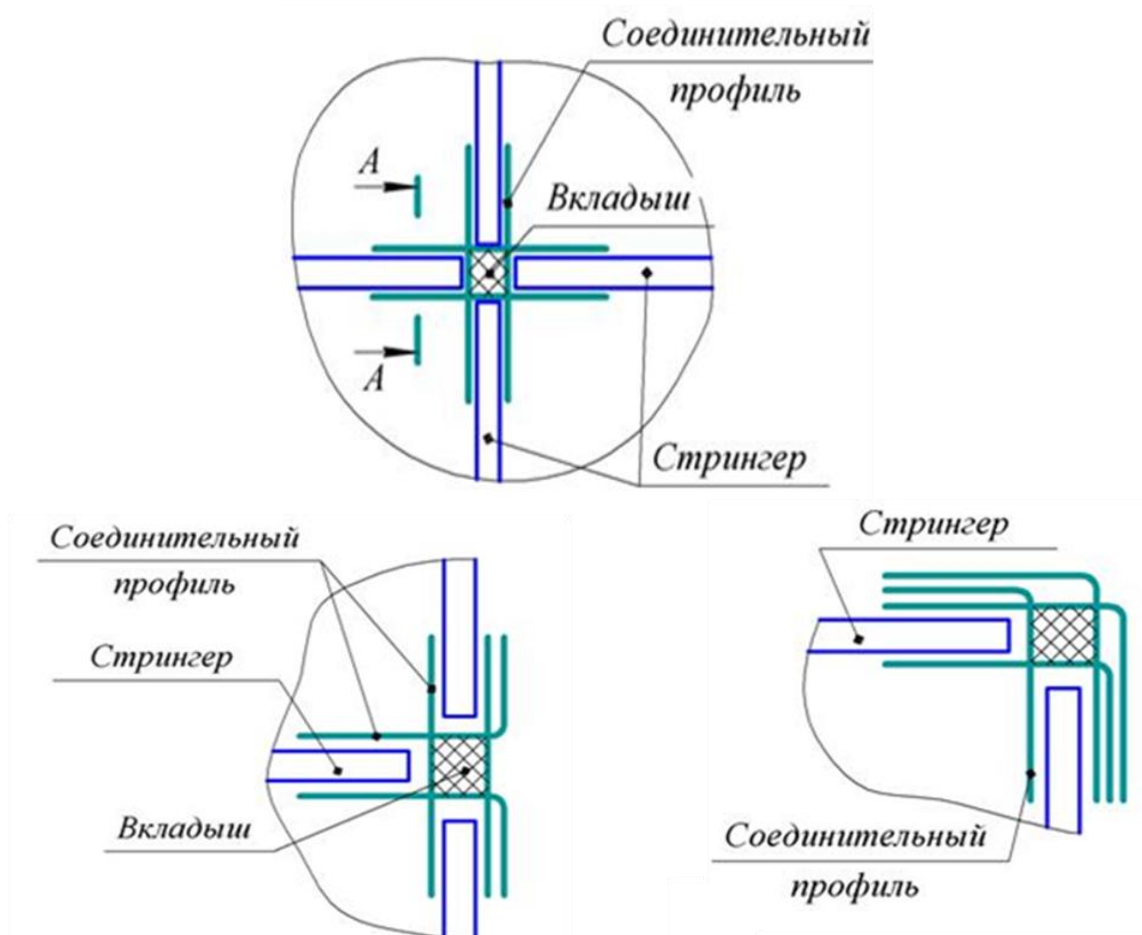


Рисунок 10 – Использование специальных соединительных профилей для соединения дискретных продольных и поперечных ребер, которые изготавливаются отдельно

Универсальность конструкции соединительного профиля позволяет реализовывать крестообразные, Т-образные и уголковые сочленения ребер при помощи клеевого соединения. Толщина и длина стенок профиля выбираются из условия передачи расчетных усилий, возникающих в ребрах при эксплуатации [16]. Преимуществом данного КТР является то, что использование соединительных профилей при изготовлении каркаса из секционированных продольных и поперечных ребер, практически приближает его к КТР с непрерывными ребрами. Еще одним преимуществом является однотипность образуемых соединений, что обеспечивает их тщательную отработку и позволит обеспечить высокое качество.

Выводы

На основе проведенного комплекса исследований были получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Проведен краткий обзор и анализ становления, развития и состояния технологии производства деталей, узлов и агрегатов изделий из ПКМ, позволившие установить основные факторы, определяющие и стимулирующие создание теоретических основ технологии изготовления рассматриваемого класса конструкций в плане обеспечения их соответствия современным требованиям и критериям, предъявляемым к изделиям АРКТ.

2. На основе классификаций предшествовавших исследователей и зарубежного опыта разработки и использования типовых процессов производства изделий АРКТ из ПКМ уточнена и расширена их номенклатура с учетом современных достижений в области технологии создания ответственных конструкций АРКТ из ПКМ.

3. Предложенная новая классификация типовых технологических процессов производства изделий АРКТ из ПКМ позволила научно обосновать порядок выбора эффективных КТР агрегатов исследуемого класса конструкций для реализации их в процессе проектирования и производства в условиях предприятий отечественной отрасли.

4. Синтезирована и обоснована виртуальная блок-схема создания новых агрегатов АРКТ в системе корпорации «проектирование – производство» отечественной отрасли, общая для объектов из традиционных металлических и полимерных композиционных материалов.

5. В проведенном анализе определяющих аспектов теоретических основ технологии производства деталей, узлов и агрегатов АРКТ из ПКМ вскрыты роль и место общих принципов проектирования технологических процессов производства изделий исследуемого класса и разработана блок-схема научного обеспечения эффективной технологии производства агрегатов АРКТ из ПКМ, отличающаяся их принципиальной ориентацией на аспекты достижения высокого качества изделий, определяемые квалиметрией КТР, регламентами полей допусков на типовые технологические дефекты микро- и макроуровней.

6. Синтезированы основные общие принципы и правила проектирования технологических процессов и операций производства композитных изделий. Предлагаемые принципы и правила лишены недостатков, присущих условиям, выдвигаемых ранее другими исследователями в качестве принципов проектирования технологических процессов производства изделий АРКТ из ПКМ и включают в себя те из этих условий, которые не противоречат методологическим и иерархическим аспектам. Разработанные принципы и правила сохраняют преемственность с общими для технологии авиастроения и машиностроения принципами,

сформулированными ведущими отечественными учеными в области технологии.

7. На основе анализа литературных и других источников информации сделан вывод о том, что наиболее перспективным направлением решения проблемы использования ПКМ в силовых конструкциях является разработка КТР соединений с крепежными микроэлементами, установленных (образуемых) на металлической соединительной законцовке и заформовываемых в композит при изготовлении детали (агрегата).

8. Предложена и обоснована классификация соединений продольных и поперечных подкрепляющих элементов, в соответствии с которой в композитных конструкциях возможны адгезионные, механические и комбинированные соединения, и сформулированы основные факторы и требования, влияющие на выбор класса соединения.

9. Разработан классификатор стыковых элементов «стрингер-стрингер» и «стрингер-стенка» для интегрированных панелей.

10. На основе анализа условий работы разработана классификация подкрепления панелей обшивки продольными и поперечными стрингерами, согласно которой классы определяются непрерывностью или дискретностью (секционированием) продольных или поперечных стрингеров.

11. Обоснованы КТР, обеспечивающие максимальную степень непрерывности арматуры ПКМ подкрепленных композитных панелей, использующих штифтовые соединения (соединений с трансверсальными крепежными микроэлементами), сетчатых структур с сохранением непрерывности ребер в местах пересечения, специальных универсальных подкрепляющих элементов на основе полупетлевого соединения и др.

12. Предложены эскизные КТР панелей обшивки, подкрепленных продольно-поперечным набором, отличающихся надежным и технологичным соединением обшивки и стрингеров в месте пересечения, а также высоким коэффициентом реализации свойств ПКМ. Показано, что усиление композита титановой фольгой может быть эффективным только в том случае, когда армирование производится тонкими листами, на которых образованы штифты типа «канцелярская кнопка».

13. Анализ результатов микрошлифов и характера разрушения позволил сформулировать некоторые выводы и рекомендации в том числе, о целесообразности уменьшения размеров крепежных микроэлементов.

Результаты проведенных исследований внедрены и используются на ряде ведущих предприятий отрасли – ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», ГП «Антонов», что позволило обеспечить повышение эффективности созданных на них композитных агрегатов АРКТ.

Список использованных источников

1. Тридцять років наукової школи з проблеми створення виробів авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів [Текст] / В.Є. Гайдачук, О.В. Гайдачук, Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №2 (69). – С. 12 – 19.
2. Роль ХАИ в решении проблемы научного обеспечения внедрения композиционных материалов в авиационно-космическую технику: итоги и перспективы [Текст] / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – №7. – С. 21 – 39.
3. Создание научных основ проектирования и технологии производства агрегатов авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 1 [Текст] / А.В. Гайдачук, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, М.А. Шевцова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (84). – Х., 2015. – С. 7 – 20.
4. Создание научных основ проектирования и технологии производства агрегатов авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. Сообщение 2 / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, М.А. Шевцова // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(88). – Х., 2016. – С. 7 – 21.
5. Моделирование статике и динамики оболочечных конструкций из композиционных материалов [Текст]: монограф./ В.О. Каледин, С.М. Аульченко, А.Б. Миткевич та інш. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 196 с.
6. Сметанкина, Н.В. Нестационарное деформирование, термоупругость и оптимизация многослойных пластин и цилиндрических оболочек [Текст]: монограф. / Н.В. Сметанкина. – Х.: НАН Украины, Ин-т пробл. машиностроения им. А.Н. Подгорного, 2011. – 376 с.
7. Смердов, А.А Расчетный анализ и оптимизация многостеночных композитных несущих оболочек [Текст] / А.А. Смердов Т.Ш. Фан // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – № 11 (656). – 2014. – С. 90 – 98
8. Многоуровневая модель анализа прочности конструкций из полимерных композитов при многофакторном нагружении [Текст] / О.Г. Осяев, Ю.А. Татурин, А.М. Костин, А.В. Жуков // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11. – № 5 (56). – С. 613 – 620.
9. Strength calculations and optimal weight design of multilayer shell-shaped composite products under a set of loads [Текст] / V.I. Butyrin,

V.N. Maksimenko, L.V. Pavshok, B.S. Reznikov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2014. – Т. 55. – № 1. – С. 44 – 51

10. Optimal Design of Annular Lattice Structures [Текст] / Jafar Eskandari Jam, Milad Noorabadi, Nader Namdaran, Hossein Taghavian, Masoud Mohammadi // Journal of Science and today's world 2013. – Vol.2. – Issue 1. – P. 42 – 57.

11. Методика идентификации жесткостных характеристик стыковых соединений изделий ракетно-космической техники / Г.Б. Клейменов, Ю.О. Бахвалов, И.В. Шевченко // Научные труды (Вестник МАТИ). – 2009. – № 16 (88). – С. 65 – 72.

12. Koh, T. M. Improving the Mechanical properties of aerospace carbon fibre-epoxy joints by z-pinning [Text]: Thesis ... Ph. D.: defend March 2012 / Koh Tze Min. – Melbourne, 2012. – 231 p.

13. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст]: монограф. / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2006. – 359 с.

14. Heimbs, S Failure behaviour of composite T-joints with novel metallic arrow-pin reinforcement [Text] / S. Heimbs, A.C. Nogueira, E. Hombergmeier, M. May, J. Wolfrum // Composite Structures. – 2014. Vol. 110. – P. 16–28.

15. European Pat. №. EP 2025953 Deutschland, Int. Cl. E 04 B 1/49, E 04 B 1/38, E 04 B 1/48, F 16 B 15/06. Bauteilverbinder, insbesondere zur Verbindung von Holzbauteilen [Text] / Heiz B.; applicant and assignee AGM Mader GmbH, 85221, Dachau (DE). – № 102010042463; filing 14.10.2010; public. 19.04.2012, Bull. № 2010/04. – 12 p.

16. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных отсеков авиакосмической техники и их соединительных узлов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): Д401–15/2017-ф / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т»; рук. А. Гайдачук; отв. исполн. А. Кондратьев; исполн. В. Гайдачук, В. Коваленко, Я. Карпов, Ф. Гагауз, М. Шевцова [и др.]– Х., 2017. – Этап 1. – 147 с. – № ГР 0117U002499.

17. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: монограф. в 2 т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / А.В. Гайдачук, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, В.В. Кириченко, А.М. Потапов; под. ред. А.В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016. – 263 с. ISBN 978-966-662-711-0

18. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монограф. [Текст] / Криворучко Д.В., Залого В.А., Колесник В.А. и др.; под ред. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2013. – 272 с.

19. Беляков, И.Т. Технологические проблемы проектирования летательных аппаратов [Текст] / И.Т. Беляков, Ю.Д. Борисов. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.

20. Тарасов, В.А. Теоретические основы технологии ракетостроения [Текст] / В.А. Тарасов, Л.А. Кашуба; под ред. В.А. Тарасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 352 с.

21. Коваленко, В.А. Порядок выбора эффективных конструктивно-технологических решений агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов и их реализации в производстве [Текст] / В.А. Коваленко // Вестник Восточноукр. Нац. ун-та им. В. Даля. – 2013. – 8 (179). – С. 95 – 105.

22. Цыплаков, О.Г. Научные основы технологии композиционно-волокнутих материалов [Текст] / О.Г. Цыплаков. – Пермь, 1975. – Ч.2. – 274 с.

23. Гайдачук, В.Е. Основные принципы и правила проектирования технологических процессов производства агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / В.Е. Гайдачук, В.А. Коваленко, А.В. Потапов // Технологические системы. – 2013. – № 2(63). – С. 29 – 39.

24. Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів [Текст]: підруч. / С.А. Бичков, О.В. Гайдачук, В.Є. Гайдачук та ін. – К.: ІСДО, 1995. – 376 с.

25. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

26. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппарато-строении [Текст] / Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев и др. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 271 с.

27. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении [Текст] / под ред. А.Г. Братухина, В.С. Боголюбова, О.С. Сироткина. – М.: Знание, 2003. – 516 с.

28. Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов. Корпоративные нано- и CALS-технологии в наукоемких отраслях промышленности [Текст] / под ред. под ред. К.В. Фролова, О.С. Сироткина, В.С. Боголюбова. – М.: Знание, 2006. – 864 с.

29. Тарасов В.А. Теоретические основы технологии ракетостроения / В.А. Тарасов, Л.А. Кашуба; под ред. В.А. Тарасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 352 с.

Поступила в редакцию 15.03.2018.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Бычков,
ГП «Антонов», г. Киев.*