

ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Анализ современных тенденций в области разработки авиационной техники свидетельствует о том, что одним из основных направлений повышения эксплуатационных характеристик и эффективности летательных аппаратов (ЛА) является применение в их конструкции композиционных материалов (КМ). При этом следует выделить еще один немаловажный факт – если до недавнего времени в серийных ЛА композиты применялись исключительно в малонагруженных неответственных элементах конструкции планера, то сейчас внимание конструкторов направлено на разработку цельнокомпозитных высоконагруженных агрегатов ЛА.

Одной из причин этого явления является то, что возможности увеличения физико-механических характеристик авиационных металлических сплавов уже исчерпаны и единственным решением проблемы снижения массы конструкции ЛА, а значит, и затрат на ее эксплуатацию, является применение современных высокопрочных и высокомодульных композитов, которые по своим удельным прочностным и жесткостным характеристикам вдоль главного направления многократно превосходят традиционные конструкционные материалы.

Вместе с тем существует ряд проблем, которые до недавнего времени сдерживали и продолжают ограничивать рост объемов применения КМ в ЛА. Одна из них связана с тем, что основные конструктивные агрегаты самолета (крыло, фюзеляж, оперение) подвержены сложному нагружению, что вызывает необходимость решения задачи оптимального армирования КМ для наиболее эффективной и полной реализации его высоких прочностных и жесткостных свойств. Другая проблема связана с наличием в авиационных конструкциях достаточно большого количества разнообразных стыков и соединений, которые необходимы по причине различных технологических и эксплуатационных требований. Будучи источниками сильных нерегулярностей (геометрической и силовой), стыки и соединения вызывают необходимость использования в своих зонах материалов с соответствующими свойствами (повышенная твердость, износостойкость, высокая прочность на смятие и срез и т.д.), которыми армированные пластики не обладают.

Необходимо отметить, что некоторые положительные результаты в области решения этих проблем уже получены. В частности, решение фундаментальной задачи проектирования структуры КМ [1, 2] может быть использовано для оптимального армирования пакета КМ в регулярных зонах конструкции с детерминированным характером нагруже-

ния. И в этом плане можно отметить положительные тенденции, характеризующиеся тем, что в последнее время ведущие мировые КБ постепенно отказываются от консервативной концепции «черного алюминия», использование которой зачастую не позволяет реализовать в полной мере уникальные свойства КМ [3 – 5]. Однако при конструировании деталей из КМ в зоне соединений очень часто возникает потребность изменения траектории силовых потоков, что в свою очередь требует соответствующего армирования КМ в местах соединения и сопряжено со значительными трудностями технологического характера, а также с необходимостью учета специфических свойств КМ, таких, как существенная анизотропия вдоль главных направлений материала, низкая межслоевая и контактная прочность и т.д.

С учетом этих обстоятельств, а также накопленного опыта по сборке ЛА из отдельных агрегатов с использованием типовых конструктивно-технологических решений (КТР) стыковых узлов из металлов единственно возможным пока подходом в реализации высоконагруженных соединений в конструкциях из КМ будет применение промежуточного переходного соединения, которое обеспечивает съем и передачу усилий с композитного агрегата (или детали) на металлический фитинг. Использование наиболее естественных для полимерных КМ адгезионных (клеевых) соединений или применение традиционных многорядных болтовых соединений для формирования зоны перехода от КМ к металлическому фитингу малопродуктивно ввиду низкой прочности и технологической ненадежности первых и вследствие значительного прироста массы, вносимого в конструкцию вторыми.

Данные факторы послужили толчком к разработке нового класса соединений деталей из КМ – металлокомпозитных гетерогенных структур (МКГС). Наиболее полное описание принципов конструирования МКГС, использование которых позволило синтезировать ряд новейших, достаточно эффективных КТР стыковых узлов высоконагруженных агрегатов ЛА, изложено в монографии [6]. Кроме того, в данной работе предложено теоретическое и экспериментальное обеспечение для проектирования МКГС и их расчета на прочность, что наряду с рекомендациями по конструированию соединений деталей из КМ и результатами экспериментальных исследований, бесспорно, имеет большую практическую значимость.

Несмотря на достигнутые результаты в области разработки типовых КТР стыковых узлов и соединений агрегатов ЛА из КМ, вопрос о создании научных основ технологии формирования таких соединений пока остается открытым. Основной задачей таких исследований, безусловно, должно стать обеспечение высокого качества серийноспособных соединений КМ с типовыми металлическими фитингами при минимальной стоимости и дополнительной массе, вносимой в конструкцию. Данную задачу можно решить с использованием двух кардинально противо-

положных подходов: первый – разработка соответствующих технологических процессов под конкретное КТР и второй – разработка собственно самого КТР с полным учетом всех особенностей соединяемых материалов и возможностей дальнейшей технологической реализации в условиях серийного производства. Оба подхода имеют право на существование, хотя необходимо отметить, что до недавнего времени ввиду отсутствия достаточно эффективных и работоспособных соединений деталей из КМ проблема обеспечения качества решалась разработкой КТР, обладающих технологической надежностью.

Как уже отмечалось выше, в результате этих исследований был синтезирован новый класс КТР стыковых узлов авиаконструкций – металлокомпозитные гетерогенные структуры, технологическая надежность которых обусловлена самой идеей соединения. К примеру, формирование переходного соединения композитной детали к металлическому фитингу с трансверсальными крепежными микроэлементами (см. рис. 1, а) происходит при формовании пакета КМ без какого-либо участия человека и дополнительных операций, сопутствующих традиционным болтовым и заклепочным соединениям. Во-вторых, технологическая надежность соединения с трансверсальными крепежными микроэлементами обусловлена высокой воспроизводимостью качества соединения независимо от процесса формования композита, начиная с традиционного вакуумного или вакуум-автоклавного формования из препрегов и заканчивая современными и перспективными технологиями RTM, VA-RTM, RFM и т.п.

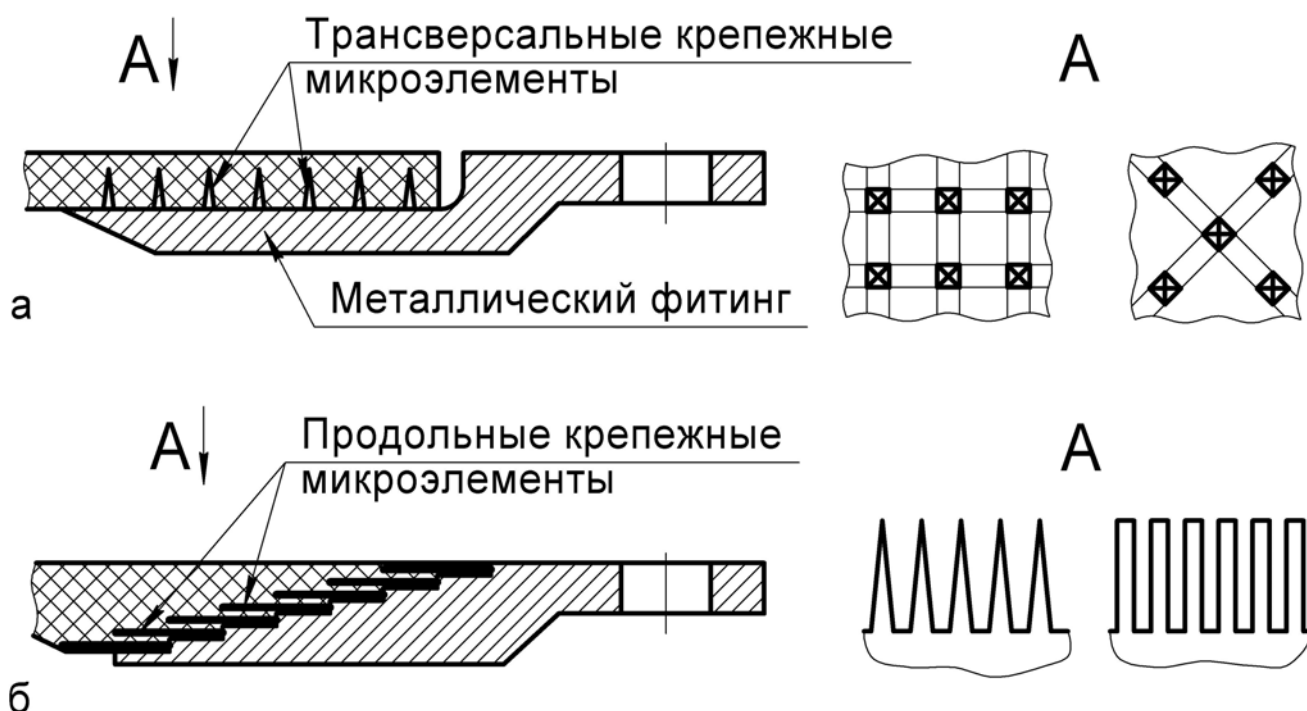


Рисунок 1 – КТР интегрированных металлических соединительных законцовок [6]

Помимо технологической надежности качество МКГС характеризуется также и высокой технологичностью, которая в свою очередь обусловлена следующими факторами:

- сокращением количества сборочных операций, поскольку сборка металлического фитинга с композитной деталью совмещена с процессом формования;

- возможностью автоматизации и механизации как процесса образования или установки крепежных микроэлементов путем запрессовки, сварки фрезерования и т.п., так и самого процесса выкладки или намотки препрега КМ;

- возможностью проведения неразрушающего контроля качества соединения;

- возможностью применения в различных технологических процессах, в том числе оптимальных в условиях серийного производства (RTM, VA-RTM и др.).

Немаловажным фактором, определяющим качество соединений, является коэффициент работоспособности, который отражает степень реализации несущей способности соединения. Здесь следует отметить, что в МКГС переход к металлическому соединительному фитингу обеспечивается без нарушения целостности волокон и при достаточном количестве крепежных элементов, повышающих межслоевую прочность КМ, данное КТР будет соответствовать объемному соединению, обладающему наибольшим потенциалом по обеспечению заданной несущей способности.

В заключение следует обратить внимание еще на один фактор, который существенно будет влиять на коэффициент работоспособности соединения, а значит, и на качество принимаемого КТР. В месте внедрения крепежных элементов в пакет КМ неизбежно происходит искривление и уплотнение волокон (рис. 2, а), что в свою очередь приводит к изменению начальных углов армирования слоев КМ и объемного содержания армирующей фазы (рис. 2, в). Таким образом, в окрестности крепежного микроэлемента образуется анизотропный композит с переменными физико-механическими характеристиками, а в «зоне обтекания» неизбежно возникает «спутная зона» из чистого связующего (рис. 2, б). Данные обстоятельства в итоге приводят к снижению несущей способности детали из КМ и соединения в целом, которое количественно можно оценить через коэффициент снижения прочности композита в месте внедрения крепежного микроэлемента.

Возможно, первой попыткой решения задачи прогнозирования степени изменения упругих свойств КМ в МКГС является предложенная в работе [6] математическая модель взаимодействия крепежного микроэлемента и волокнистого композиционного материала. Не вдаваясь в подробное описание предложенной аналитической методики, можно отметить, что данный подход базируется на задании траектории обтекания

крепежного элемента волокнами КМ в виде упругой линии балки, что дает возможность численно оценить новые значения углов армирования и объемного содержания монослоя в заданных точках представительного элемента с размерами $t_x \times t_y$ (см. рис. 2) и впоследствии определить осредненные упругие свойства пакета КМ в осях соединения.

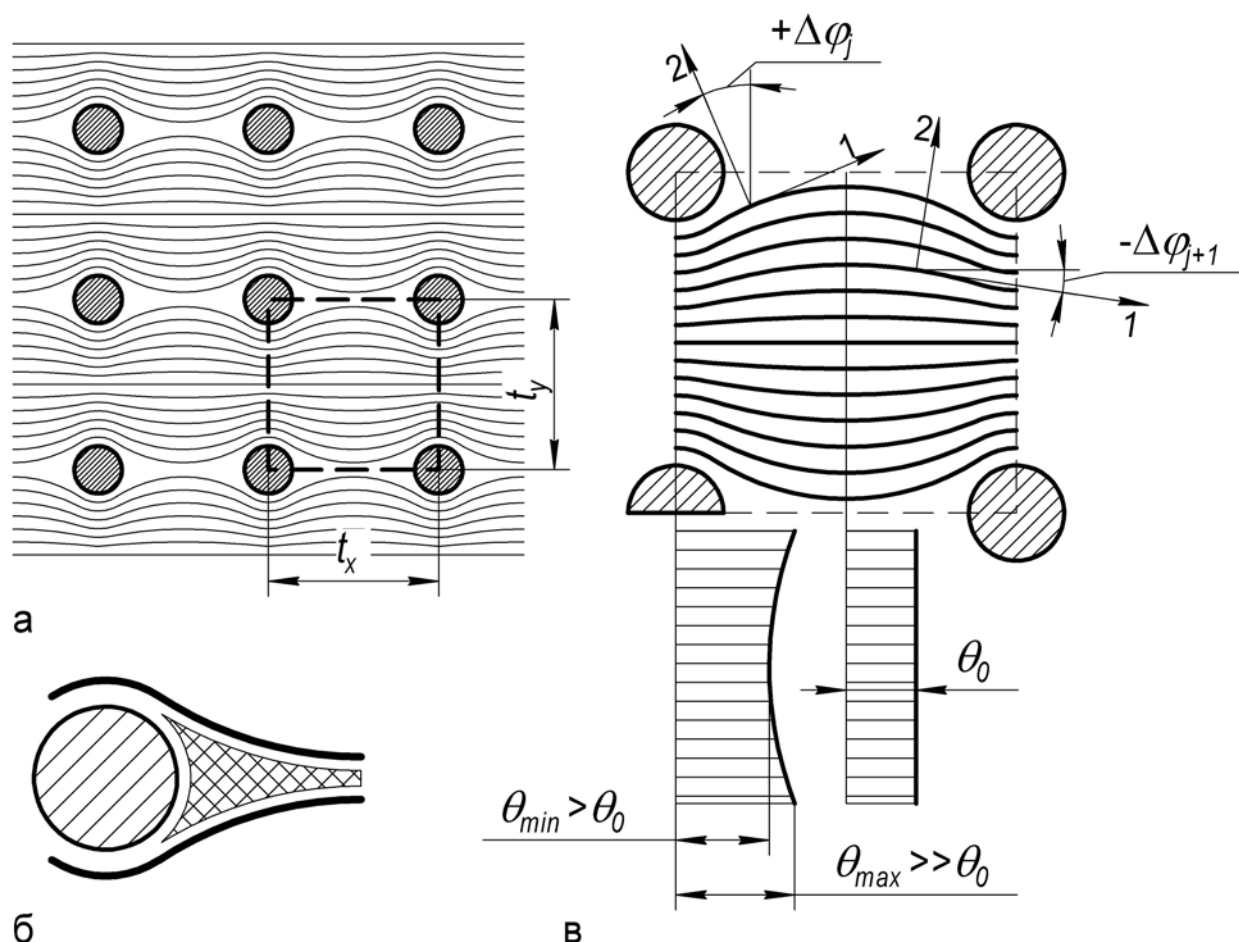


Рисунок 2 – Расчетная схема взаимодействия крепежного элемента с волокнами (нитеями) КМ

Данная математическая модель является теоретической базой для разработки методики, направленной на обеспечение регламентированного изменения объемного содержания армирующей фазы и траектории армирования слоев КМ в зоне заформовки крепежных микроэлементов путем варьирования их размерами и расположением. Во-вторых, использование данной методики позволит количественно оценить коэффициент снижения прочности КМ в МКГС и в конечном итоге качество разрабатываемого КТР.

С учетом изложенных выше обстоятельств можно сформулировать цели и задачи дальнейших исследований, направленных на создание научных основ технологии формирования соединительных узлов конструкций ЛА из волокнистых композитов:

1. Разработка теоретического обеспечения для прогнозирования структурных параметров КМ (объемного содержания и местных углов армирования) в зоне заформовки крепежных микроэлементов.

2. Проектирование МКГС с учетом упругих и прочностных характеристик в зоне неоднородности структурных параметров КМ.

3. Разработка новых технологических процессов для обеспечения регламентированных параметров структуры композита в зоне заформовки продольных и трансверсальных крепежных микроэлементов.

4. Обоснование и синтез КТР соединительных узлов конструкций ЛА и технологических процессов их реализации, обладающих высокой воспроизводимостью качества в условиях серийного производства.

Таким образом, сформулированы основные проблемы, которые необходимо решить для повышения эффективности силовых конструкций из композитов путем обеспечения минимального прироста массы, технологической надежности и серийноспособности соединений и стыковых узлов в условиях ограниченного пространства в зоне перехода от КМ к металлическому фитингу.

Список использованных источников

1. Карпов, Я.С. Теория оптимизации структуры пакета слоев композиционного материала [Текст] / Я.С. Карпов // Технологические системы : науч.-техн. журнал. – К. , 2002. – № 4 (15). – С. 42 – 46.

2. Карпов, Я.С. Оптимизация структуры композиционного материала панелей летательных аппаратов при ограничениях по прочности, устойчивости, прогибу [Текст] / Я.С. Карпов // Проблемы прочности. – 2004. – № 6. – С. 33 – 47.

3. Peters, S.T. Ten common mistakes in composite design and manufacture and how to avoid them [Текст] / S.T. Peters // SAMPE Journal, Vol. 42, No. 5. – 2006. – p.p. 53 – 58.

4. Niu, M.C.Y. Composite Airframe Structures: Practical Design Information and Data [Текст] / M.C.Y. Niu. – Hong Kong: Conmilit Press Ltd. – 1992. – 664 p.

5. Strong, A.B. Breakthroughs in Aerospace Composites Manufacturing [Эл. ресурс] // A.B. Strong. – <http://strong.groups.et.byu.net>.

6. Карпов, Я.С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст] / Я.С. Карпов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 359 с.

Поступила в редакцию 23.11.2012.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*