

Технологическое проектирование углепластиковых деталей со сложной геометрической формой для беспилотных летательных аппаратов

Technological design of carbon fiber parts with a complex geometric shape for unmanned aerial vehicles

В.В. СОКОЛОВ, Ж.В. АГАШИНА, С.И. ВОЙНОВ,
П.Ю. АНТИПОВ, О.А. ГОЛИШЕВ, С.В. ДОЛИНСКИЙ

V.V. SOKOLOV, Z.V. AGASHINA, S.I. VOINOV, P.Y. ANTIPOV, O.A. GOLISHEV, S.V. DOLINSKY

АО «Кронштадт», Москва, Россия

JSC "Kronshtadt", Moscow, Russia

skit988@mail.ru

В данной работе рассмотрен процесс технологического проектирования малогабаритных углепластиковых деталей со сложной геометрией, используемых в конструкции беспилотных летательных аппаратов. Представлены подходы к размещению мест срачивания в слоях преформы. Установлены закономерности, связывающие количество и расположение мест срачивания в армирующих слоях углепластика и его механические характеристики.

Ключевые слова: Fibersim, углепластиковые детали авиационного назначения, прочность

In this paper, the process of technological design of small-sized carbon fiber parts with complex geometry used in the design of unmanned aerial vehicles is considered. Approaches to the placement of splicing points in preform layers are presented. Regularities have been established that relate the number and location of splicing points in the reinforcing layers of carbon fiber reinforced composite and its mechanical characteristics.

Keywords: Fibersim, carbon fiber parts for aviation purposes, strength

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-11-12-36-39

Для улучшения летно-технических характеристик самолетов в мировом авиастроении широко используются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Отечественная авиационная промышленность также стремится к увеличению доли композиционных материалов в планерах современных гражданских и военных самолетов [1]. На основе ПКМ проектируются и изготавливаются российские беспилотные летательные аппараты (БПЛА) класса MALE (Medium Altitude Long Endurance – средневысотный, большой продолжительностью полета).

оснастки происходит образование складок и разрывов в тканом материале (рис. 1), а также отклонение от заданной ориентации нитей. Указанные дефекты устраняются посредством формирования армирующего слоя детали из нескольких заготовок, края которых срачиваются между собой. Образующиеся складки также возможно вырезать с последующим срачиванием краев заготовки вдоль линии надреза. Срачивание армирующего материала при неправильном подходе к выкладке преформы может оказать негативное влияние на прочностные характеристики композитной детали [2–5]. Поэтому изготовление деталей из ПКМ сопряжено с решением сложной технологической задачи по достижению оптимальной укладки ткани при сборке преформы, то есть такой укладки, которая позволит минимизировать потерю прочности углепластика из-за близкорасположенных срачиваний [6].

Целью настоящей работы являлось установление закономерностей, связывающих расположение мест срачивания в армирующих слоях углепластика и его прочностные характеристики при растяжении и сжатии, а также оценка эффективности различных технологических решений по размещению стыков в слоях ПКМ на примере деталей планера БПЛА со сложной геометрической формой.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследований в работе использовали сформованные методом вакуумной инфузии углепластиковые пластины и детали на основе равнопрочной углеродной ткани марки 22502 саржевого переплетения производства ООО «Итекма».

Срачивание краев АМ при выкладке преформ выполнялось «встык», то есть способом, при котором края соединяемых тканых заготовок стыкуются между собой.

В таблице 1 приведены основные текстильные характеристики и показатели драпируемости (предельный и предупреждающий углы деформации) исследуемой ткани. Предельный угол деформации – угол между нитями основы и утка, при достижении которого происходит образование складки. Предупреждающий угол деформации равен половине предельного угла.

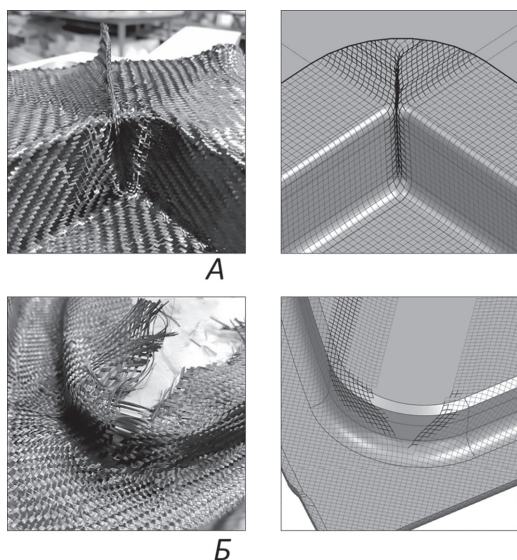


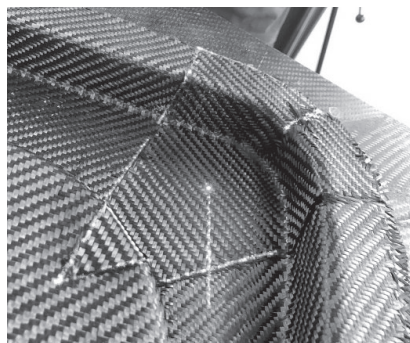
Рис. 1. Дефекты, образующиеся при укладке армирующей ткани в оснастку, и их отображение при моделировании в ПО Fibersim: А – складка; Б – разрыв в тканом материале.

Композитные детали БПЛА класса MALE характеризуются малыми размерами и сложной геометрией, что создает определенные трудности при выкладке слоев преформы. При укладке армирующего материала (АМ) на геометрически сложные участки

Таблица 1. Текстильные характеристики и показатели драпируемости ткани 22502.

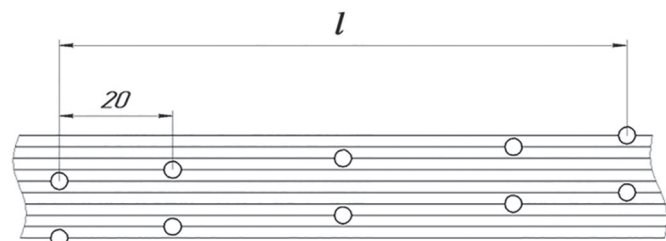
Тип плетения ткани	Поверхностная плотность, г/м ²	Предупреждающий угол деформации, град	Предельный угол деформации, град
Саржа	200 ± 10	27	54

В качестве связующего была выбрана эпоксидная смола Т67 производства ООО «Итекма». Определение прочности при растяжении выполняли в соответствии с ГОСТ Р 56785-2015 на образцах с габаритами 250×25 мм. Определение прочности при сжатии выполняли в соответствии с ГОСТ Р 56788-2015 на образцах с габаритами 300×36 мм. Разрушающие испытания образцов проводили на испытательной машине Tinius Olsen серии ST. Технологическое проектирование композитной детали выполняли в программном обеспечении (ПО) Fibersim, которое моделирует укладку армирующего материала в оснастку. Данное ПО позволяет обнаружить формирующиеся при выкладке дефекты и подобрать методы для их устранения. Результатом моделирования являются данные о геометрии заготовок, формирующих армирующие слои детали. Эти данные передаются на раскройный комплекс, при помощи которого заготовки вырезаются из полотна армирующего материала. Данные также отсылаются на лазерную проекционную систему, которая отображает на оснастке видимые линии контура заготовок. При выкладке заготовок обеспечивается совпадение их контура с контуром, проецируемым на оснастку. На рис. 2 приведена фотография, иллюстрирующая проекционную выкладку композитной детали.

**Рис. 2. Фотография проекционной выкладки детали, контур заготовки подсвечен лазерным проектором.**

Результаты

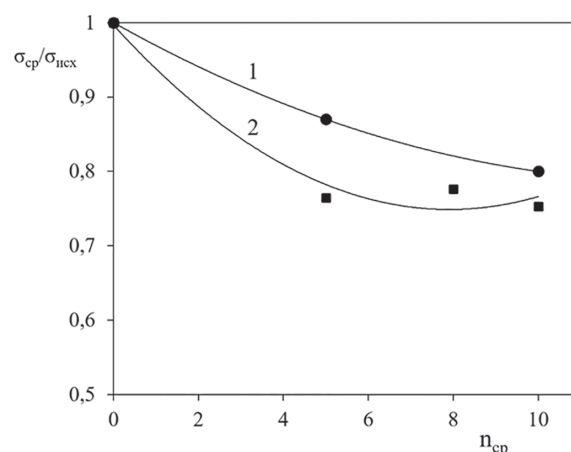
При устранении дефектов, возникающих на стадии выкладки деталей со сложной геометрией, не всегда возможно разнести места срачивания в слоях преформы на значительное расстояние друг относительно друга. Это приводит к тому, что зона сосредоточения мест срачивания может составлять менее 100 мм. В этом случае при размещении стыков целесообразно использовать технологическую схему, представленную на рис. 3. Данная схема позволяет равномерно разнести места срачивания в армирующих слоях ПКМ на ограниченном по длине участке.

**Рис. 3. Технологическая схема расположения 10 срачиваний в 10-слойном образце. l – зона сосредоточения мест срачивания.**

На рис. 4 представлены зависимости относительной прочности ($\sigma_{ср}/\sigma_{исх}$ – отношение прочности углепластика со сращенными слоями к прочности углепластика, армированного непрерывным тканым материалом) образцов ПКМ при растяжении и сжатии от количества сращенных слоев. При изготовлении образцов была использована технологическая схема, показанная на рис. 3.

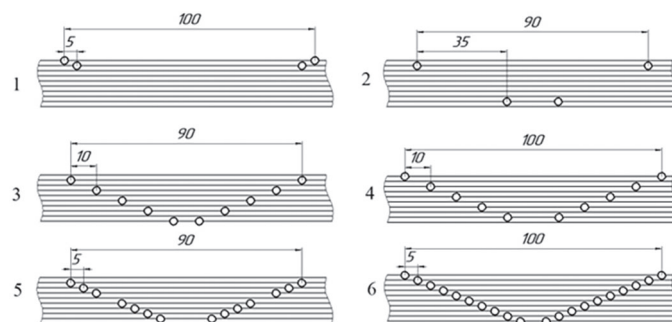
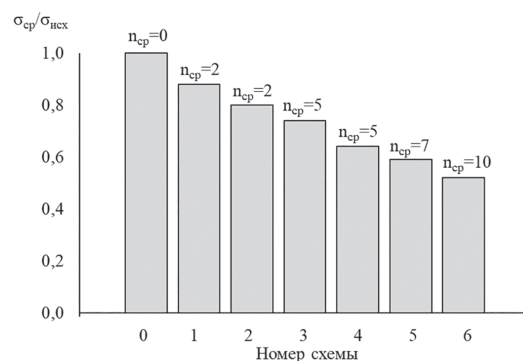
Из рис. 4 видно, что с увеличением количества срачиваний от 0 до 10 прочность углепластиковых образцов при растяжении и

сжатии монотонно снижается на 25 и 20% соответственно. Установленные закономерности следует учитывать при проектировании композитных деталей посредством введения дополнительных армирующих слоев, компенсирующих снижение механических характеристик ПКМ из-за близкорасположенных срачиваний.

**Рис. 4. Зависимости относительной прочности образцов ПКМ на основе ткани 22502 при сжатии (1) и растяжении (2) от количества сращенных слоев ($n_{ср}$). $l = 100$ мм.**

Если при выкладке армирующего слоя в оснастку со сложной геометрией происходит разрыв ткани, то для его устранения в зону сформировавшегося дефекта укладывают «вставку» – тканую заготовку небольшого размера (по сравнению с другими заготовками, образующими армирующий слой). Существенным недостатком данного способа является то, что в каждом слое преформы на близком расстоянии друг относительно друга формируются два места срачивания. То есть в композите будут присутствовать слои с парными стыками, что отрицательно скажется на его прочности.

Для оценки влияния количества сращенных слоев, содержащих близкорасположенные парные стыки, на прочность ПКМ были изготовлены 10-слойные образцы с различным $n_{ср}$ в соответствии со схемами, приведенными на рис. 5. На рис. 6, 7 представлены прочностные характеристики данных образцов.

**Рис. 5. Технологические схемы расположения парных стыков в 10-слойном образце, где $\circ$ обозначены места срачивания.****Рис. 6. Относительная прочность при растяжении 10-слойных образцов ПКМ на основе ткани 22502, содержащих различное количество сращенных слоев с близкорасположенными парными стыками.**

Из рисунков видно, что с увеличением количества срачиваний слоев, содержащих парные стыки, наблюдается тенденция по снижению прочностных характеристик композиционного материала. При наличии парных стыков в каждом слое ПКМ его

прочность при растяжении и сжатии снижается относительно прочности углепластика, армированного непрерывными слоями, на 48 и 30% соответственно. Следует отметить, что σ_r является более чувствительной характеристикой к присутствию сращиваний в структуре образцов по сравнению с $\sigma_{сж}$. Сравнение результатов испытаний образцов, изготовленных в соответствии с технологическими схемами №1 и 2, показало, что при использовании «вставок» существенное влияние на прочность ПКМ оказывает положение слоя с парными стыками в структуре композита. Так, при равном количестве слоев с парными стыками образец №1 продемонстрировал большую прочность как при растяжении, так и при сжатии, по сравнению с образцом №2.

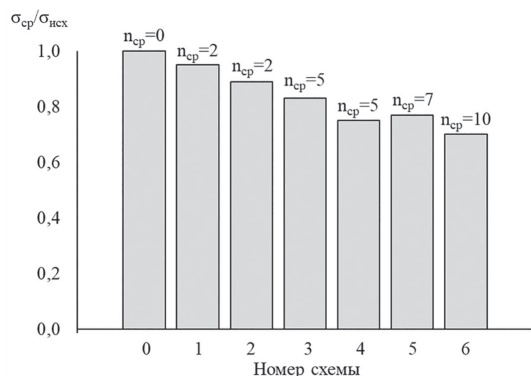


Рис. 7. Относительная прочность при сжатии 10-слойных образцов ПКМ на основе ткани 22502, содержащих различное количество сращиваемых слоев с близкорасположенными парными стыками.

Анализ диаграмм растяжения и фотографий разрушенных при растяжении образцов №1, 2 позволил определить механизм их разрушения. С возрастанием нагрузки на образец №1 происходит отслаивание имеющих парные стыки поверхностных слоев, что видно по фотографии разрушенного образца (рис. 8) и наличию характерного пика при 28,3 кН на диаграмме растяжения (рис. 9). При дальнейшем росте нагрузки до 39,0 кН образец разрушается. При нагружении образца №2 в местах расположения сращиваний, которые, по сути, являются технологическими дефектами, начинается развитие поперечной трещины, которая повреждает поверхностные слои, что приводит к полному разрушению образца. Разница в прочности данных образцов обусловлена тем, что у образца №1 на первом этапе разрушения из работы исключаются два слоя, а остальные продолжают сопротивляться нагрузке, в то время как образец №2 одновременно теряет 4 внешних слоя.



Рис. 8. Фотография разрушенного образца, изготовленного в соответствии с технологической схемой №1.

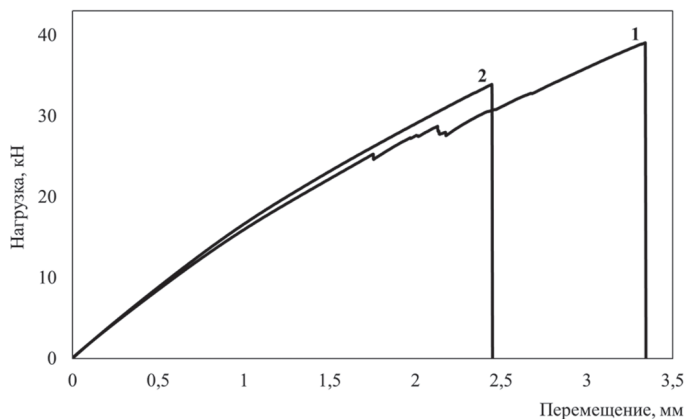


Рис. 9. Диаграммы растяжения образцов, изготовленных в соответствии с технологическими схемами №1 (1) и №2 (2).

Для установления закономерностей, связывающих положение слоев с парными стыками в структуре углепластика и его прочностные

характеристики, были изготовлены образцы в соответствии со схемами, приведенными на рис. 10. Результаты разрушающих испытаний данных образцов при растяжении и сжатии показаны на рис. 11.

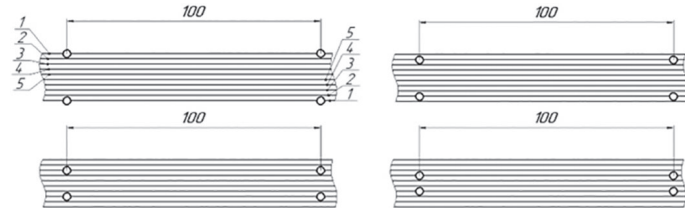


Рис. 10. Технологические схемы расположения «вставок» в 10-слойном образце, где слой №1 является поверхностным, слой №5 – прилегает к плоскости симметрии композита.

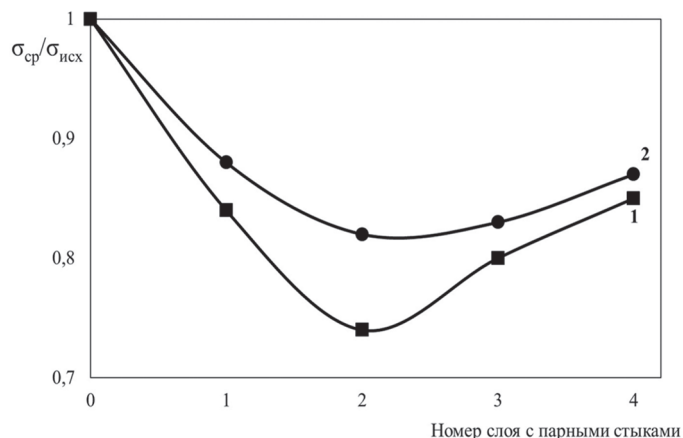


Рис. 11. Зависимости относительной прочности при растяжении (1) и сжатии (2) углепластика от глубины залегания сращиваемых слоев с близкорасположенными парными стыками.

Из рисунка видно, что зависимость прочности образцов, как при растяжении, так и при сжатии, от глубины залегания сращиваемых слоев имеет экстремальный характер. Самое низкое значение прочностных характеристик наблюдается при расположении «вставок» в приповерхностных слоях углепластика (слои №2), что, как и в предыдущем примере, обусловлено преждевременным разрушением четырех внешних слоев (слои №2 и 1). При размещении «вставок» ближе к плоскости симметрии композита, то есть в слоях №4 и 3, механические показатели образцов возрастают. При этом разрушение углепластика также начинается в местах сращивания.

Представленные закономерности дают общее представление о тенденции снижения прочности ПКМ при сращивании краев тканых полотен. Принципиальный характер изменения прочности, по всей видимости, будет одинаков для композиционных материалов всех типов. Для углепластиков на основе ткани 22502 установленные закономерности позволяют с высокой достоверностью прогнозировать прочность материала в зависимости от количества мест сращивания, внесенных в преформу.

На рис. 12 показан 5-слойный шпангоут планера БПЛА, в радиусных зонах которого при формировании каждого армирующего слоя из цельной заготовки образуются разрывы ткани и складки, что подтверждается результатами моделирования укладки преформы в ПО Fibersim.

Удаление складок в процессе создания технологической электронной модели детали осуществляли посредством выполнения операции «надрез». Суть данной операции заключается в следующем: заготовка надрезается в зоне дефекта, а ее края стыкуются вдоль линии надреза. Для устранения разрывов в тканом материале при проектировании слоев №1, 3, 5 были использованы «вставки», слои №2 и 4 формировались из нескольких заготовок, стыкуемых между собой в местах образовавшихся дефектов (рис. 13). Применение комбинированной технологической схемы (включающей в себя применение «вставок» и деление армирующих слоев на несколько заготовок) для устранения разрывов в тканом материале позволило разнести места сращивания в слоях преформы друг относительно друга на приемлемое расстояние. Таким образом, посредством моделирования углепластикового шпангоута в ПО Fibersim подтверждена эффективность использования «вста-

вок» при технологическом проектировании малогабаритных деталей со сложной геометрией. Адекватность разработанной технологической электронной модели была полностью подтверждена в процессе выкладки преформы шпангоута при помощи лазерной проекционной системы Laserguide.

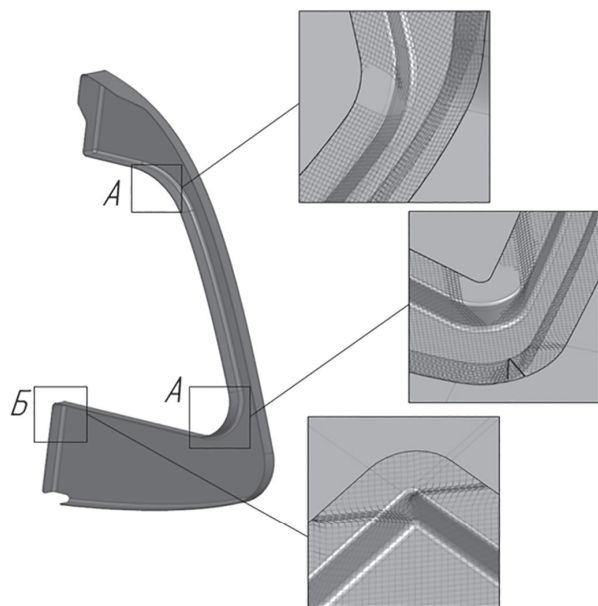


Рис. 12. Шпангоут планера БпЛА и результаты моделирования укладки его армирующего слоя (ориентация нитей в слое $\pm 45^\circ$), где А – разрыв ткани, Б – складка ткани.

Заключение

1. Установлены закономерности, связывающие расположение и количество мест сращивания в армирующих слоях углепластика и его прочностные характеристики при сжатии и растяжении. На примере 10-слойного образца показано, что с увеличением количества сращиваний от 0 до 10 прочность углепластиковых образцов при растяжении и сжатии монотонно снижается на 25 и 20% соответственно.

2. Использование «вставок» при устранении разрыва тканого материала приводит к тому, что в каждом слое преформы на близком расстоянии друг относительно друга формируются два места сращивания. Показано, что при наличии парных стыков

в каждом слое ПКМ его прочность при растяжении и сжатии снижается относительно прочности углепластика, армированного непрерывными слоями, на 48 и 30% соответственно.

3. Существенное влияние на прочность ПКМ оказывает положение слоев с парными стыками в структуре композита, что обусловлено реализацией различных механизмов его разрушения. Как показали испытания по растяжению 10-слойных образцов, наличие парных стыков в поверхностных слоях углепластика приводит к их отслаиванию при нагрузке 28,3 кН. При этом композит продолжает сопротивляться нагружению, и его окончательное разрушение происходит при 39,0 кН. В случае расположения парных стыков в приповерхностных слоях ПКМ разрушение начинается именно с них и распространяется на поверхностные слои. Это приводит к полному разрушению образца при 33,9 кН.

4. Посредством моделирования углепластикового шпангоута в программном обеспечении Fibersim подтверждена эффективность использования «вставок» для устранения разрывов в тканом материале при выкладке преформы малогабаритной детали со сложной геометрией.

Литература

1. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – т. 14. – №4(2). – С 686–693.
2. Meng Zhu, Dingding Chen, Qigao Hu. Failure mechanisms and reinforcing modes of ply splice fiber-reinforced composite laminates under tensile load // Materials. – 2019. – №12. – P. 1–18.
3. Meng Zhu, Dingding Chen, Suli Xing, Qigao Hu, Rui Wang. Tensile properties of ply splice fiber reinforced composite laminates // Journal of Composite Materials. – 2020. – V. 54. – P. 2887–2897.
4. Chen, D., Wang, M., Arakawa, K. et al. Tensile properties of fiber reinforced epoxy resin composite with ply splice structures // Acta Mater Compos Sin. – 2017. – №34. – P. 2473–2478.
5. Meng Zhu, Qigao Hu, Su Ju, Wang Rui, Dingding Chen. Mechanical properties of CFRP materials with ply splice structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №2. – P. 1–8.
6. Соколов В.В., Войнов С.И., Агашина Ж.В., Антипов П.Ю., Голишев О.А., Долинский С.В. Особенности технологического проектирования малогабаритных углепластиковых деталей со сложной геометрией, используемых в конструкции беспилотных летательных аппаратов // Полет. – 2021. – №12. – С. 54–60.

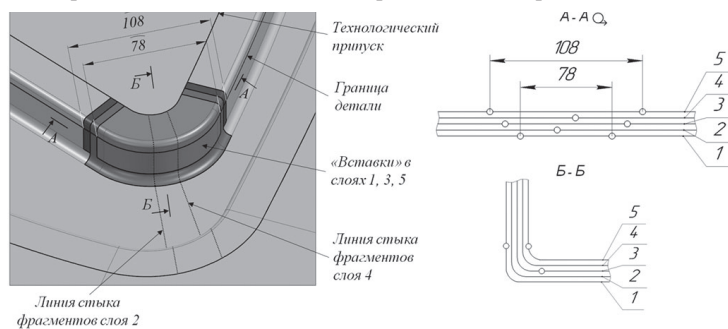


Схема деления армирующих слоев на фрагменты и результаты их моделирования в ПО Fibersim

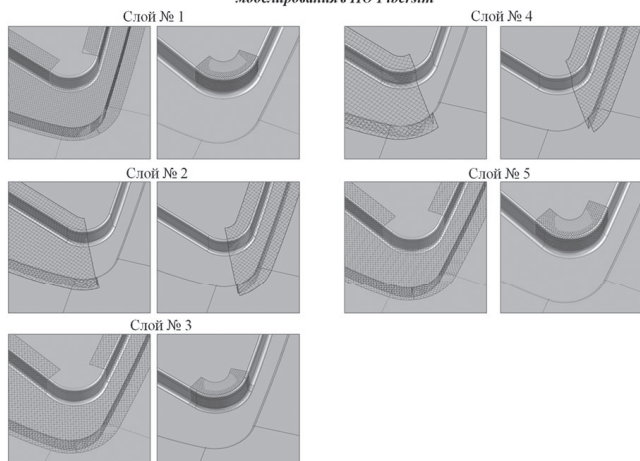


Рис. 13. Схема расположения мест сращивания в шпангоуте планера БпЛА.