

Проблемы и решения
аддитивных технологий создания
композитных конструкций
с пространственным армированием
непрерывными волокнами

Прокофьев Г.И. НПФ «РАПС»
тел. +7(812)234 66 77, +7 (901)301 59 35
giprokofiev@yandex.ru

1. Под определение «аддитивные технологии» подпадают, в частности, технологии послойного добавления материалов, а также технологии изготовления слоистых конструкций с практически произвольными размерами из композиционных материалов методами автоматизированной выкладки с использованием в качестве исполнительных систем (ИС) выкладочных машин и роботов.

Аддитивные технологии (автоматизированной укладки композита, армированного волокном - AFP) часто не имеют альтернатив в изготовлении ответственных анизотропных композитных конструкций с заданными свойствами.

Проблемы

1. Уметь разрабатывать (проектировать и изготавливать) **ОПТИМАЛЬНЫЕ** КОМПОЗИТНЫЕ анизотропные конструкции
2. Взаимное влияние ограничений процессов проектирования и изготовления
3. Концепция разработки моделей процессов проектирования и формообразования **ОПТИМАЛЬНЫХ** армированных конструкций

2. Внедрение аддитивных технологий для конструкций, армированных непрерывными волокнами, связано с рядом сложностей, которые можно условно разделить на три группы: проектирование, прогнозирование свойств, обеспечение технологического процесса. Условность деления объясняется связанностью процессов разработки анизотропных армированных конструкций. Так, процесс и результат конструкторского проектирования изделия должен учитывать функциональные возможности имеющихся ИС или предъявлять функциональные требования к ИС, создаваемой для формообразования проектируемого класса конструкций.

Технологическое проектирование процессов формообразования конструкции связано с учетом функциональных возможностей и параметров ИС, требуемой топологией АМ конструкции и соответствующими ей траекториями укладки АМ, свойствами армирующих лент, сформированных из наборов компонентов композита, свойствами поверхности укладки, способов формирования лент, деформационных возможностей лент и других факторов, влияющих на возможность укладки АМ и качество композита «выращиваемой» конструкции.

Средства (параметры) оптимизации конструкций

- **Геометрическая форма** (создается в процессе концептуального проектирования и мало варьируется при конструкторском и технологическом проектировании)
- **Компонентный состав композита** (определяется средой эксплуатации и мало варьируется при конструкторском и технологическом проектировании)
- **Схема армирования** (определяется при конструкторском и технологическом проектировании и является основным средством оптимизации)

3. Основными параметрами оптимизации армированной конструкции являются ее геометрическая форма, компонентный состав композита и топология АМ в объеме конструкции. При этом геометрическая форма и компонентный состав конструкции определяются на ранних стадиях формирования изделия в целом (концепции) и мало подвержены изменениям на последующих стадиях. На стадии разработки конструкции основным средством (параметром) ее оптимизации (управления свойствами) является топология АМ, традиционно задаваемая в результатах конструкторского проектирования схемой армирования конструкции.

Решения

(технологии разработки и изготовления)

- На основе **изотропии** свойств композита
(как **конструкционного материала**)
 - Средства конструкторского проектирования
 - Технологии, дающие хаотичное расположение армирующих волокон
- На основе **анизотропии** свойств композита
 - Слоистые технологии с анизотропией слоев
 - Технологии пространственного армирования
(плетение, ткачество, 2.5D-укладка)

4. Теория оптимизации тонкостенных слоистых конструкций типа тел вращения посредством армирования хорошо разработана и широко используется в практике синтеза схем армирования и изготовления оболочек, работающих на внутреннее и внешнее давление.

Для анизотропных конструкций с поверхностями произвольной формы теория анализа свойств композитных конструкций и синтеза схем их армирования менее развита. Их анализ проводится с использованием хорошо зарекомендовавших себя систем анализа изотропных конструкций, а используемые схемы армирования направлены на обеспечение изотропии свойств композита конструкции. Для армированных слоистых конструкций с поверхностями, гауссова кривизна которых близка к нулю, используются средства армирования зон конструкции, в которых задаются углы армирования относительно осей системы координат зоны и количество слоев. Такие средства встроены в программное обеспечение многих машиностроительных (Siemens NX, CATIA и др.) и специализированных (FiberSim, CADFiber и др.) САПР слоистых конструкций.

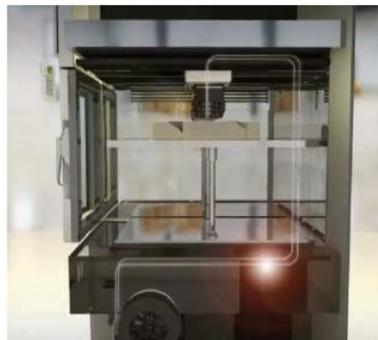
В слоистых конструкциях связь армированных слоев композита обеспечивается связующим материалом (матрицей), у которого значения физико-механических свойств могут быть значительно ниже таковых для АМ, что приводит к разрушению связей армированных слоев при перегрузках и к ухудшению эксплуатационных свойств конструкции.

Аддитивные технологии (3D-печать мелких деталей)

Послойная укладка нитей
расплавленного материала (FFF / FDM)

- Полимер
- Армированный полимер (пластик)

Материал укладывается по заданной траектории движения



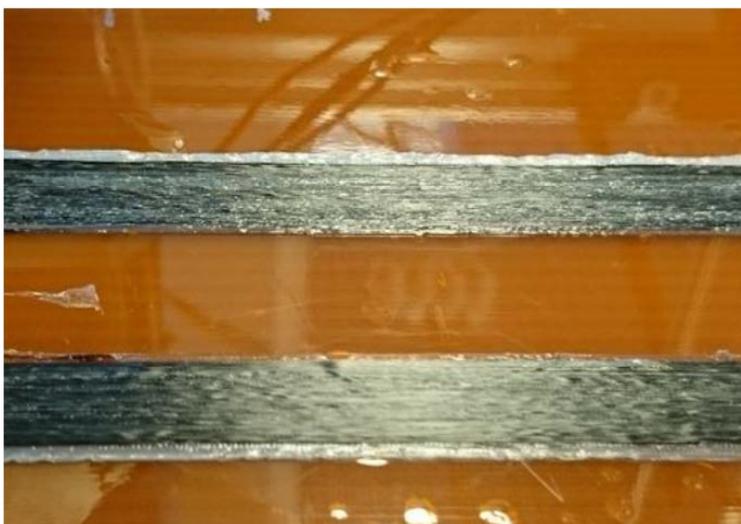
Source: SOLID CONCEPTS



Направления работ ПАО «ОАК» в сфере АМ-технологий

- инициация и расширение количества НИОКР с ведущими российскими организациями участия в консорциумах практической направленности

Первый российский композитный 3D принтер

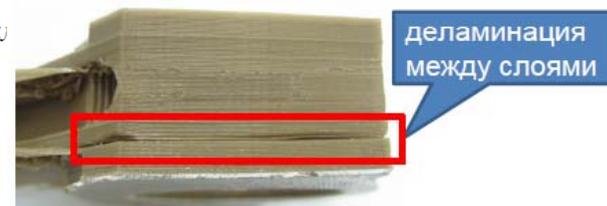


Skoltech

Сколковский институт науки и технологий

Одна из ключевых задач проекта — создание технологии и оборудования для аддитивного производства композитных конструкций. На сегодняшний день сотрудниками Сколковского института науки и технологий уже разработана технология 3D печати изделий из композитов, позволяющая получать образцы композиционного материала, превосходящие по своим механическим характеристикам мировые аналоги.

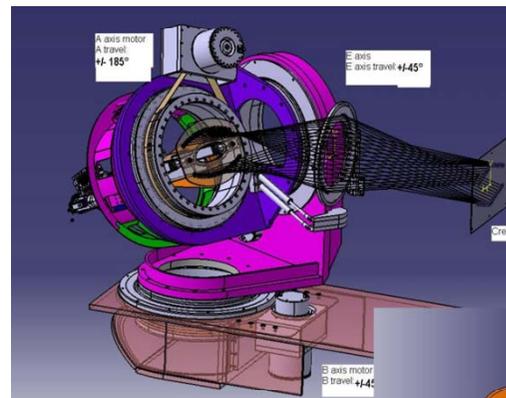
Идея всего проекта – в том, чтобы научиться проектировать и создавать оптимальные композитные конструкции



деламинация между слоями

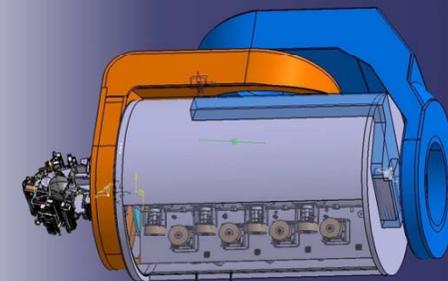
5. Аппаратные и программные средства аддитивных технологий изготовления слоистых конструкций хорошо развиты в направлении 3D-печати (мелкие конструкции) у зарубежных производителей и развиваются в РФ (Сколково: цель – научиться создавать оптимальные композитные конструкции)

Машины и устройства автоматизированного формования крупных тонкостенных конструкций (оболочек)



Инновация в композитах:
Управление полос материала

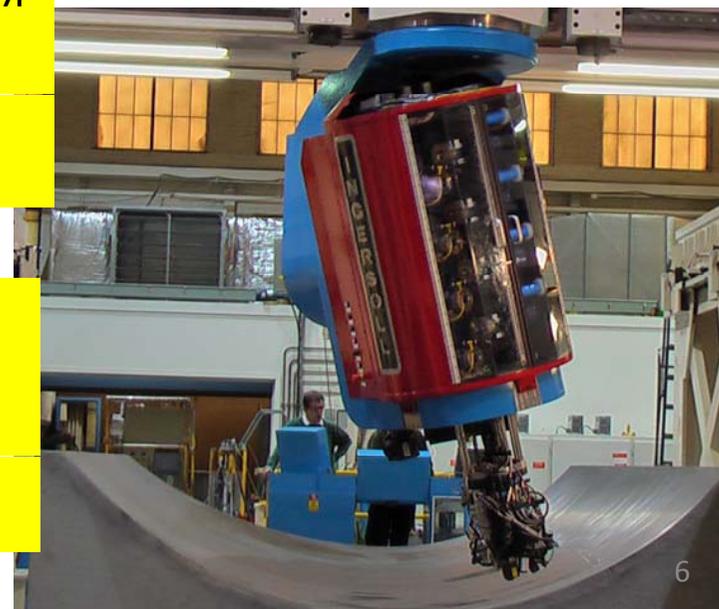
Конструкция
"Mongoose" ("Мангуста")



Слоистые
конструкции
выращиваются
путем добавления
слоев
армированного
материала



Укладка лент
материала на
поверхность
(одинарной и двойной
кривизны)



6. Хорошо развиты и промышленно используются технологии изготовления слоистых конструкций с практически произвольными размерами из композиционных материалов методами автоматизированной выкладки с использованием выкладочных машин и роботов в качестве исполнительных систем.

Они также не лишены недостатков слоистых конструкций и требуют совершенствования в направлении сшивки слоев армирующим материалом и оптимизации с учетом пространственного направления армирования. В этом направлении развиваются и будут развиваться аддитивные технологии создания оптимальных конструкций из композитов как на стадии их проектирования, так и формообразования.

Производство лопаток вентилятора для авиационного ГТД («монолитные» конструкции с пространственным армированием) консорциумом General Electric и Snecma для двигателя LEAP-X

а)



б)



в)



г)



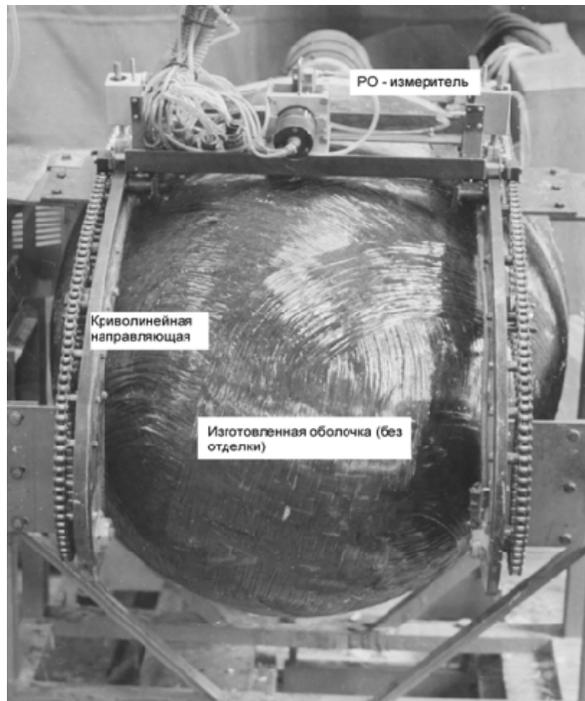
а – ткачество преформы; б – готовая преформа; в – преформа в оснастке для RTM; г – отформованная лопатка

7. Для улучшения свойств ответственных и оптимальных конструкций, имеющих коэффициент запаса близкий к единице, вводят направления армирования, связывающие внутренние области конструкции и ее внешние поверхности (пространственное армирование). При реализации трехмерного армирования (например, для изготовления лопаток вентилятора авиационного газотурбинного двигателя) используют технологии плетения или ткачества преформы, укладку преформы в матрицу, пропитку и прессование преформы. При этом применяется сложное и дорогое ткацкое оборудование, а направления нитей (арматуры) тканой преформы изменяются на каждой стадии формообразования, что не позволяет установить конечную топологию АМ в изготовленной конструкции с достаточной точностью и снижает возможность точного анализа ее свойств.

Неслоистые конструкции (2.5D)

(физическая модель обтекателя ГАС)

- Управление траекториями армирования
- Произвольные формы поверхности (замкнутые и незамкнутые)
- Плотная и неплотная упаковка материала (полости, аномалии)
- Практически произвольные размеры конструкции



8. Аддитивные технологии потенциально позволяют получить конструкции с пространственным армированием при условии отказа от очередности укладки полос АМ, обеспечивающей послойную укладку АМ и переходу к такой очередности их укладки, которая обеспечит нужное наложение и «переплетение» полос АМ. Следует подчеркнуть, что существующие ИС для послойной укладки полос АМ позволяют это делать без их существенной аппаратно-программной модификации и затрат на нее. Поэтому пространственное армирование в аддитивных технологиях будет развиваться в направлении создания оптимальных конструкций из композитов.

Очевидно, что при использовании аддитивных технологий практически невозможно обеспечить армирование в направлении нормали к поверхности конструкции (как у технологии ткачества). Но они могут обеспечить такое армирование, при котором траектории армирования принадлежат поверхностям укладки, сформированным в процессе укладки АМ. С учетом отмеченных ограничений Add и аналогии с терминологией 3D (3Dimension) назовем такой тип пространственного армирования 2.5D-армированием.

Пример: гребной винт как целое (конструкции с пространственным армированием)

(Large composite propeller blades for both navy and commercial vessels)



9. 2.5D-армирование может найти эффективное применение в создании цельных (не сборных) конструкций из композитов с заданными свойствами, например гребных винтов большой мощности (европейской компанией изготавливаются только композитные лопасти).

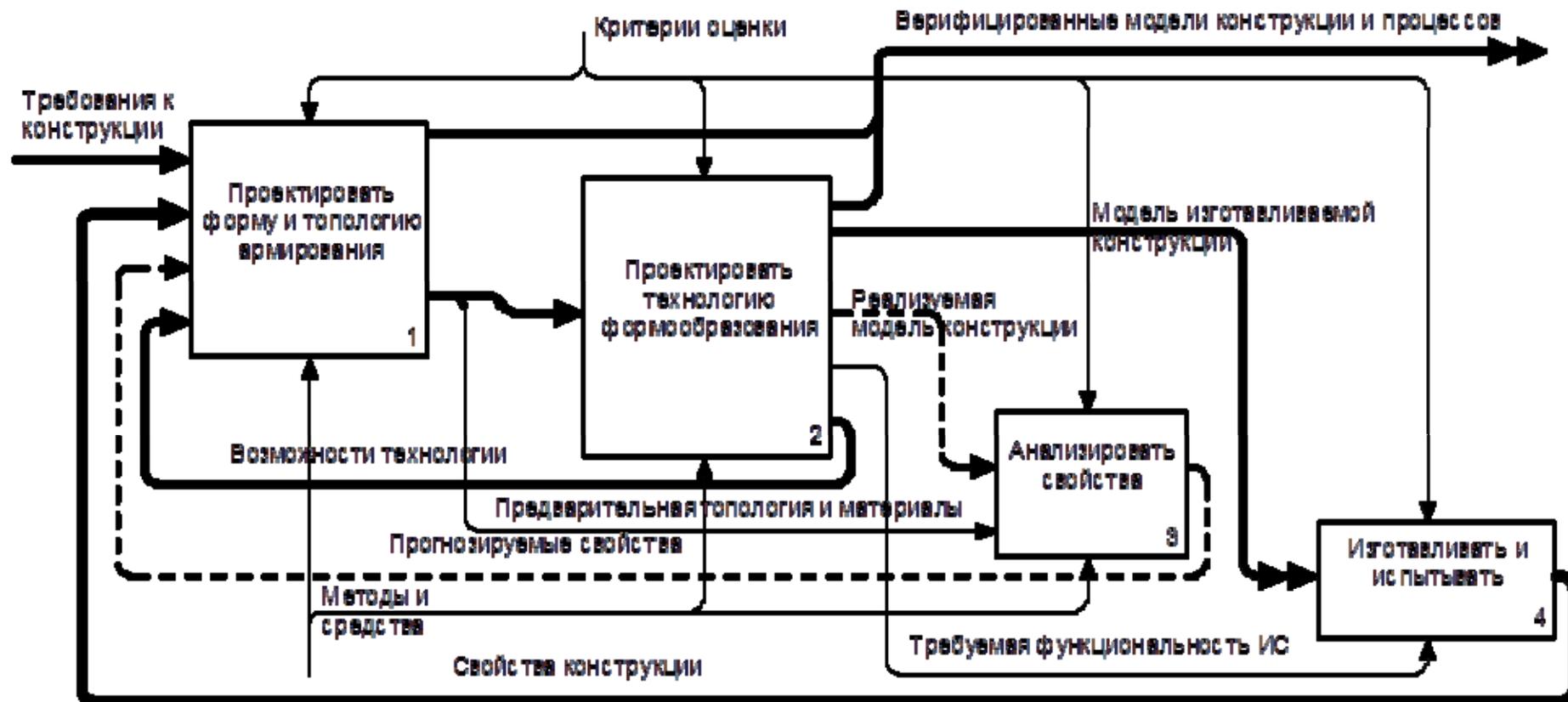
Задачи разработки оптимальных конструкций с 2.5D-армированием

1. Синтезировать форму поверхностей и топологию арматуры (геометрическую модель) оптимальной анизотропной конструкции (конструкторское проектирование).
2. Реализовать технологически геометрическую модель конструкции, близкую к оптимальной (технологическое проектирование и формообразование)

10. Укрупненно разработка изделия предполагает циклическое итерационное решение двух задач: конструкторское проектирование, технологическая подготовка и изготовление опытной или головной конструкции. При этом цикл повторяется до достижения требуемых свойств изготовленной конструкции.

Модель процесса разработки конструкции с 2.5D-армированием

С чего начать?



11. Разработку конструкции с 2.5D-армированием можно упрощенно представить трехконтурной схемой. В ней блоки 1, 2 связаны жирными стрелками с одним наконечником, входят во внутренний контур и отражают взаимосвязанные итерационные процессы моделирования топологии и формообразования реализуемого варианта конструкции.

Блоки 1 и 2 имеют доминирование одного порядка, так как проектировать топологию нельзя без информации о возможностях аддитивных технологий, которые, в свою очередь, зависят от требуемой топологии армирования конструкции. Конструкторское проектирование топологии в большой степени определяется условиями эксплуатации конструкции, а результатом проектирования является компонентный состав АМ и топология, которую можно описать (задать) в общем виде. Топология арматуры порождается в результате итерационного геометрического моделирования, анализа и оптимизации анизотропной конструкции. Предварительная топология конструкции и компоненты армирующих лент определяется при выполнении конструкторских работ блоков 1 и 3.

Модели блока 2 изначально наиболее непонятны (сложны) и, поэтому, имеют высший приоритет для их рассмотрения и определения в системе процессов разработки.

Технологическое проектирование

Связанно с созданием:

моделей

1. **Армирования конструкции** (топологии, схемы армирования)
2. **Технологически реализуемых траекторий укладки** (с которых не «уходят» натянутые армирующие ленты)
3. **Технологически реализуемой топологии арматуры конструкции** (соответствующей требованиям конструктора)
4. **Управления исполнительной системой** (коллективом роботов при работе с перекрывающимися рабочими зонами)

устройств (технологической оснастки):

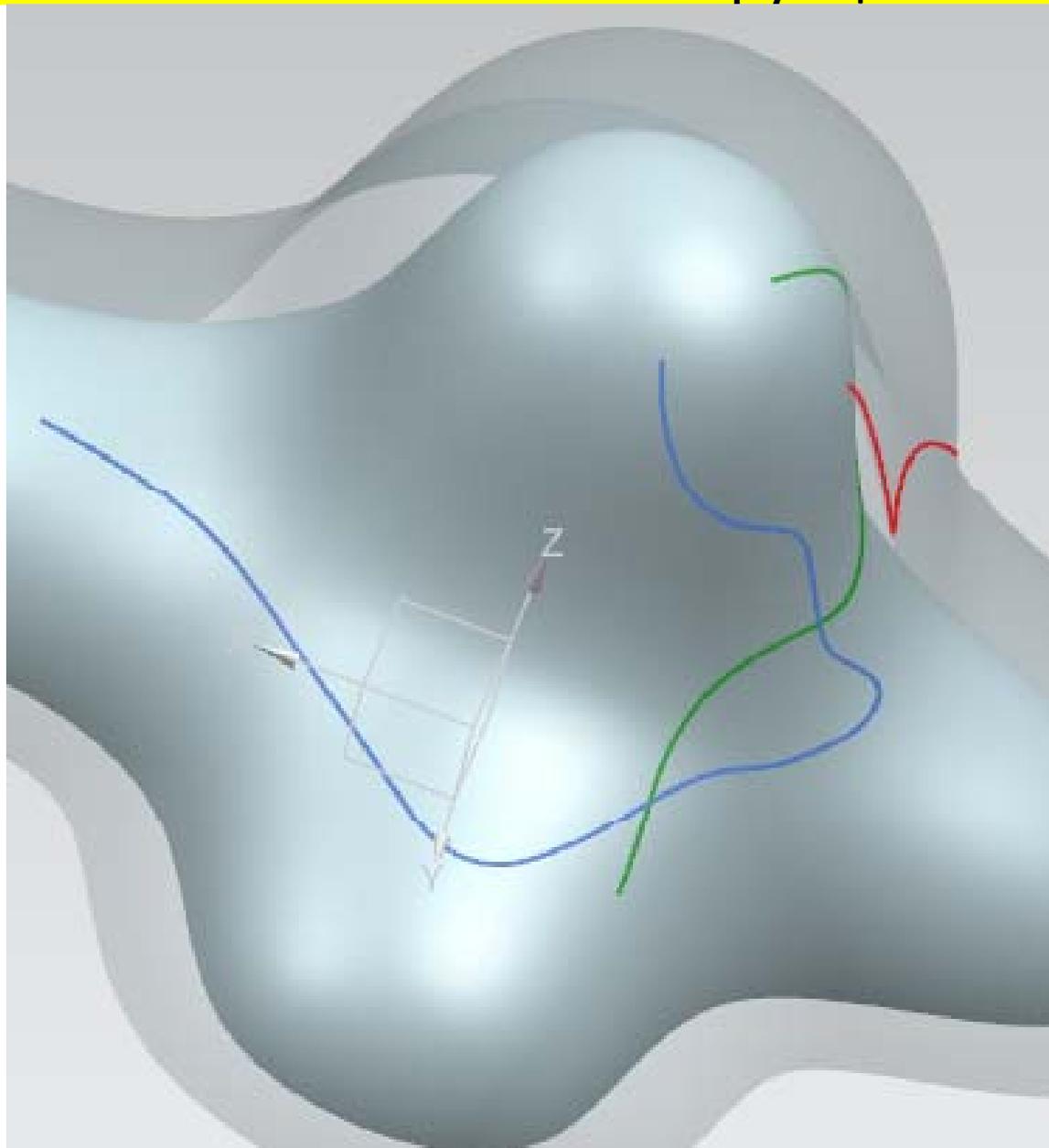
1. **Сменных рабочих органов**
2. **Системы снабжения материалами** процесса формообразования

программ:

- **подготовки геометрических и технологических данных**
- **управления процессом выращивания конструкции**

12. Задачи технологического проектирования направлены на создание моделей процесса формообразования, конструкции рабочих органов, а также программ, автоматизирующих процессы синтеза топологии оптимальной конструкции и управление исполнительной системы формообразования конструкции. Для манипуляции рабочим органом и управления технологическими параметрами процесса укладки при 2.5D-армировании можно использовать автоматические системы программного управления, применяемые в технологии послойной укладки.

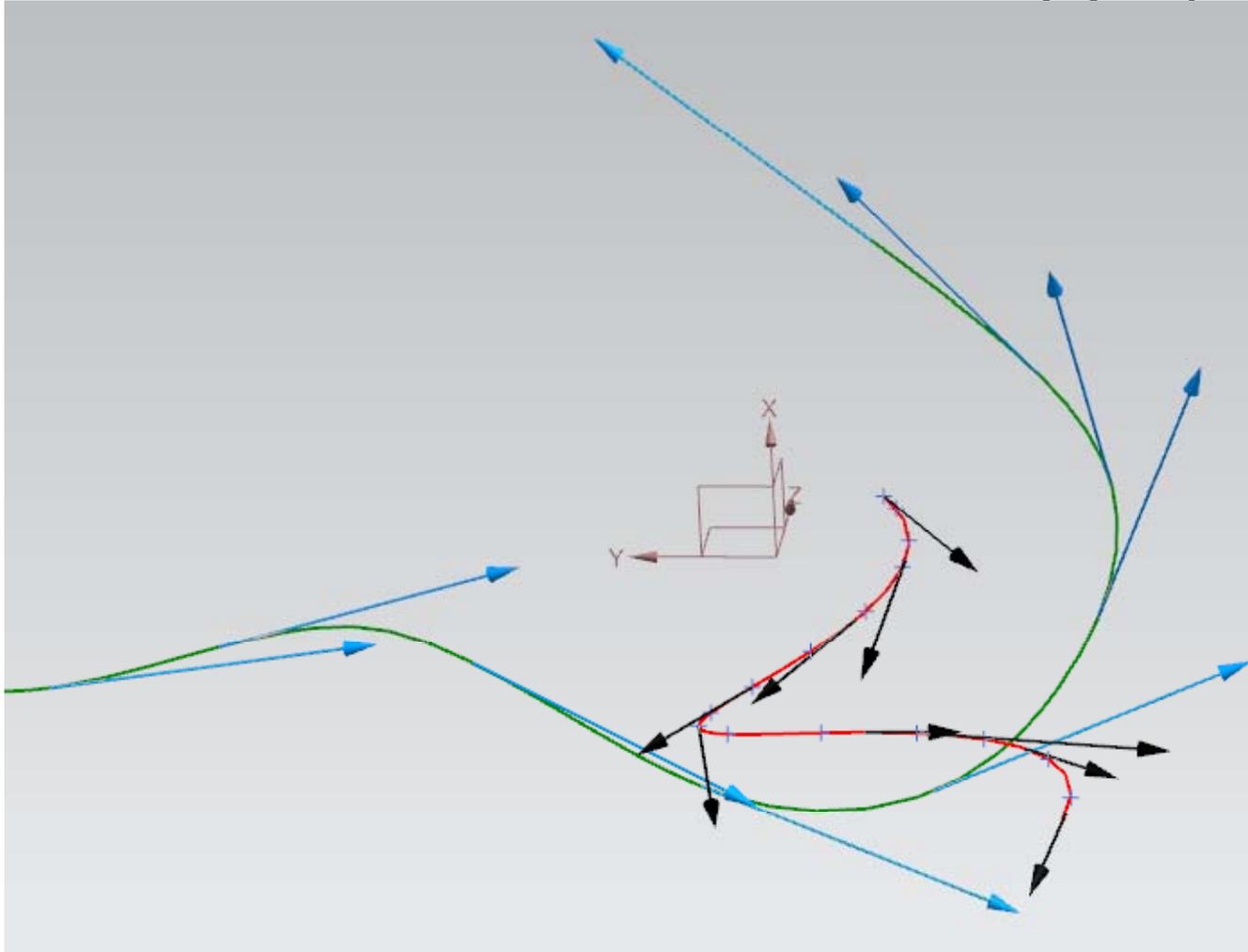
Модели траектории укладки армированных полос в объеме конструкции



13. Требуемая топология (предварительная) может быть задана конструктором геометрическими моделями: поверхностей конструкции, траекторий укладки, полосы армирующего материала, иным способом. Геометрическая модель расположения армированного материала несет полную и однозначную информацию о требуемой топологии армирующего материала и его компонентах. Следует отметить, что заданная таким образом топология армирования оптимальной конструкции может быть не реализуема с использованием аддитивных технологий (укладки арматуры) в силу имеющихся в них технологических ограничений.

Иные способы задания расположения арматуры (схемы армирования) дают не полную информацию о топологии арматуры. Их применяют для задания направления арматуры в слое слоистых конструкций, поверхности которых близки к развертывающимся на плоскость поверхностям. Они обычно задают углы между координатной линией на поверхности укладки (осью декартовой системы координат) и касательной к траектории укладки арматуры слоев, взаимное расположение слоев, их количество и материал. Такой способ задания топологии армирования трудно использовать для конструкций с поверхностями двойной кривизны, вследствие того, что координатные линии поверхности укладки являются кривыми линиями, а сама поверхность укладки заранее неизвестна: формируется в процессе укладки. Возникает проблема синтеза универсального способа задания топологии армирования, позволяющей спроектировать близкую к оптимальной конструкцию и изготовить ее с использованием аддитивных технологий.

Траектории укладки и касательные к ним в объеме конструкции

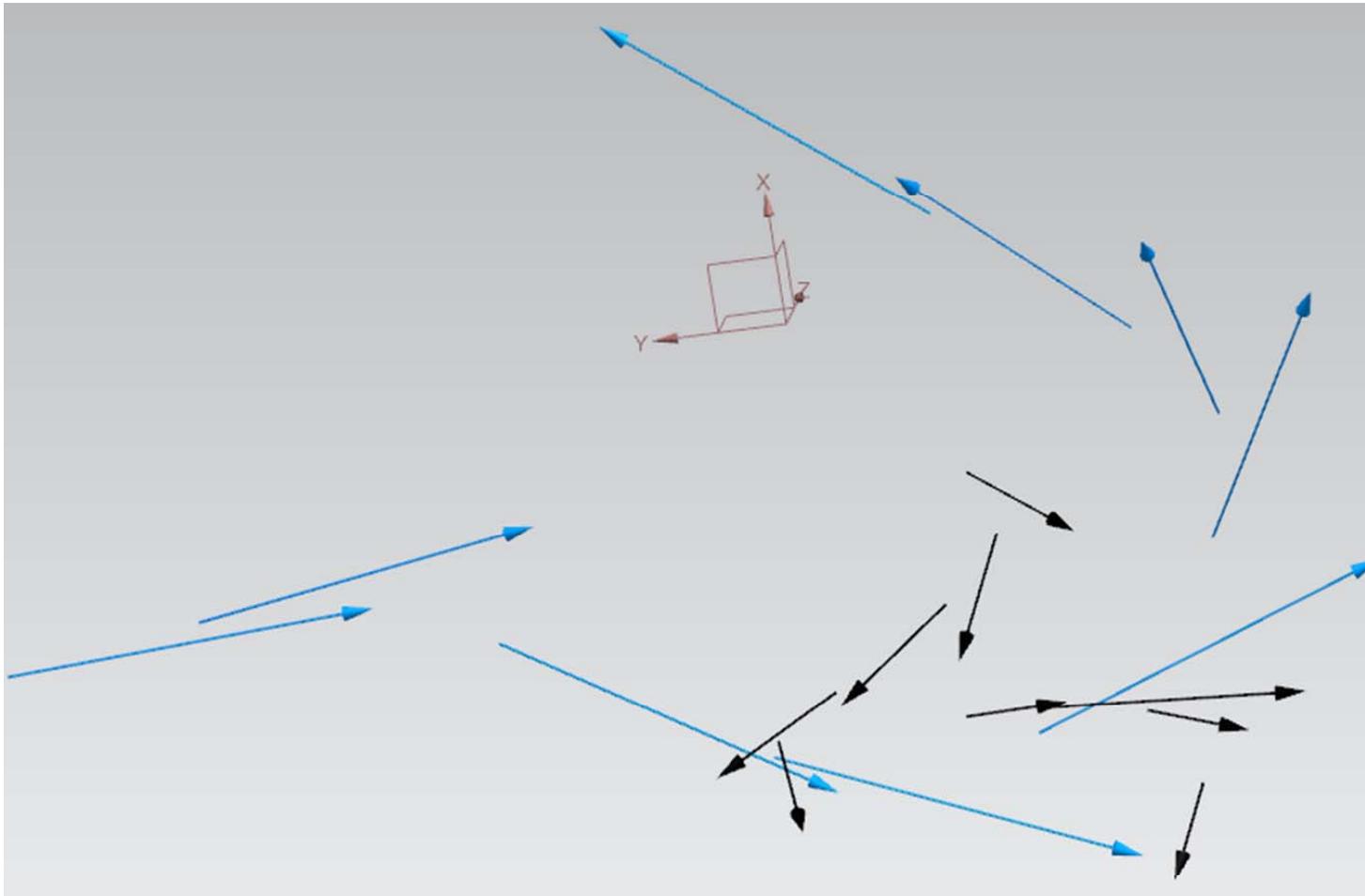


14. Идея предлагаемого способа задания топологии армирования заключается в использовании лишь части информации о полно и однозначно заданной топологии арматуры (геометрической модели конструкции). В геометрических моделях уложенных армирующих полос («деталях» конструкции) можно выделить траектории их укладки (вдоль которых уложены полосы материала), принадлежащие поверхностям укладки полос АМ и расположенные внутри объема конструкции.

На каждой непрерывной траектории укладки можно выделить конечное множество точек и касательных векторов в них. Очевидно, что траекторию укладки можно восстановить с некоторой погрешностью, используя выделенное конечное множество касательных векторов к ней. Чем гуще на траектории расположены касательные векторы, тем больше данных о траектории укладки они несут и тем точнее можно восстановить траекторию.

В разных местах (объемах) конструкции «густоту» касательных векторов можно определять в соответствии с важностью этих объемов для формирования требуемой в них топологии арматуры.

Векторы армирования



15. Так, для использования технологической системой, можно сформировать исходную схему армирования - конечное множество векторов, касательных к синтезируемым траекториям укладки, расположенных в объеме материала конструкции.

Исходную схему армирования можно задать также исходя из других соображений, например, из анализа результатов напряженно-деформированного состояния конструкции и ее оптимизации.

В результате получим универсальный способ задания требований к армированию конструкции.

Положения концепции синтеза топологии АМ (при технологическом проектировании)

1. Исходная схема армирования (ИСА) содержит:

- геометрические модели поверхностей конструкции;
- конечное множество векторов армирования, начала которых расположены на расстоянии, кратном толщине армирующего материала (АМ) от формообразующей поверхности (ФП). В тех областях (объемах) конструкции, где ориентация арматуры может быть произвольной, векторы армирования вырождаются в точки.
- компонентный состав материала (атрибуты вектора армирования)

2. Уложить АМ можно на поверхность укладки (ПУ)

3. Синтезируемая траектория укладки принадлежит ПУ и проходит через начала векторов армирования касательно им

4. При синтезе траекторий укладки следует учитывать технологические требования к ним (стабильность положения натянутого АМ на траекториях укладки или/и деформационные свойства АМ)

5. ПУ изменяется в результате укладки АМ вдоль траектории укладки

16. В основе синтеза топологии арматуры лежат принципы, обусловленные исходной схемой армирования, а также изменением геометрии конструкции (ее «рост») в процессе укладки армированного материала и самим процессом укладки.

Общий алгоритм синтеза траекторий укладки и выращивания конструкции

Начальное состояние - поверхностью укладки (ПУ) является ФП (ни одна полоса не уложена);

- 1. Претендентами на включение начала векторов армирования в траекторию укладки** полосы АМ являются векторы из набора набор векторов, начала которых принадлежат ПУ, у которых одинаковы значения атрибута «материал». Из этого набора выбираются векторы, через начальные точки которых можно построить траекторию укладки, удовлетворяющую требованиям к ней.
- 2. На ПУ синтезируется траектория укладки в пространстве конструкции**, предназначенном для заполнения материалом.
- 3. Строится геометрическая модель полосы АМ**, уложенной вдоль синтезированной траектории на ПВ.
- 4. Векторы, использованные при синтезе предыдущей траектории укладки исключаются из исходной схемы армирования (ИСА).**
- 5. Объединяются предыдущая ПУ и свободная поверхность уложенной полосы.** В результате выполнения пунктов 3 и 4 получается новая ИСА и очередная ПУ.
- 6. Для очередной ПУ формируется очередной набор векторов армирования**, начала которых лежат на очередной ПУ. С их использованием синтезируется очередная траектория укладки, строится модель очередной полосы уложенного на нее материала.
- 7. Процесс синтеза траекторий укладки и полос на ПУ повторяется пока очередной набор векторов армирования в ИСА не пуст.**
- 8. Полосы, выступающие за поверхности конструкции, обрезаются этими поверхностями.**

17. В рамках концепции синтеза топологии армированной конструкции могут быть предложены несколько алгоритмов синтеза траекторий укладки и процесса выращивания конструкции, отличающихся выбором решения частных задач из возможного множества решений. Но все они укладываются в общий алгоритм процесса формообразования армированной конструкции.

При синтезе процесса выращивания конструкции можно получить несколько вариантов результатов. Близость свойств вариантов конструкции к заданным (оптимальным) свойствам можно оценить в результате выполнения синтеза топологии арматуры для каждого из вариантов траекторий армирования конструкции, а также последующего анализа их свойств.

Экспериментальная оценка критического угла

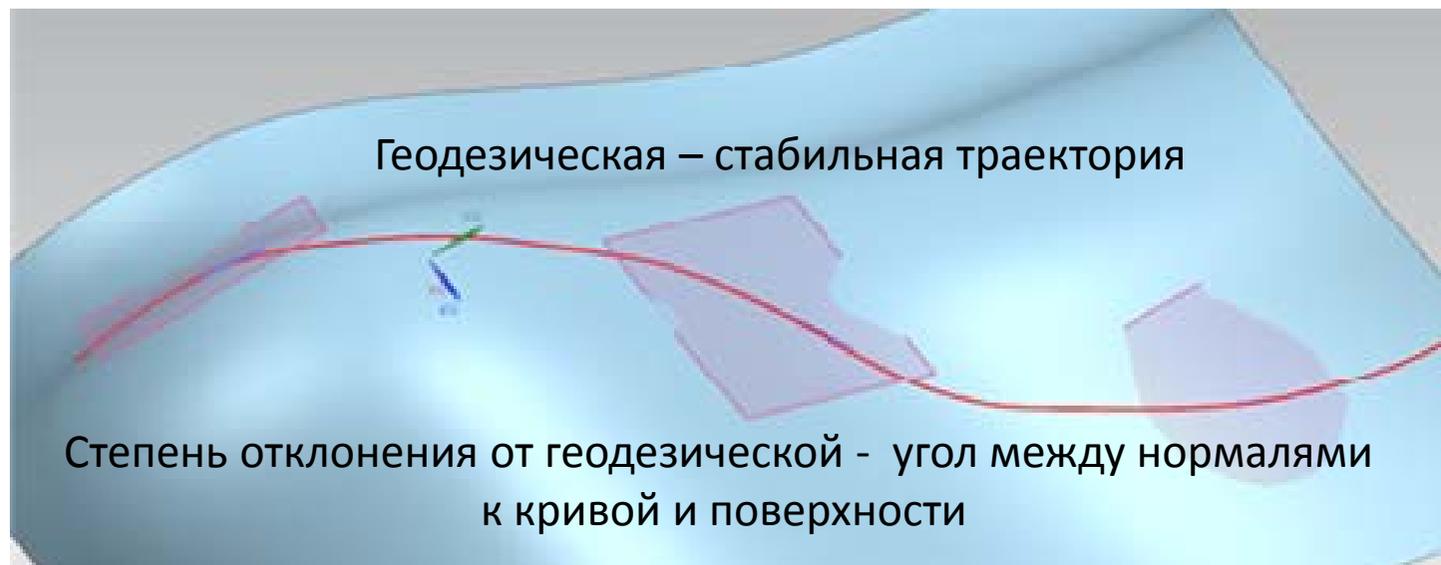


18. Приведу несколько иллюстраций к модели процесса синтеза топологии армирования конструкции.

Жестким технологическим ограничением является требование стабильности траектории укладки. Абсолютно стабильными являются геодезические траектории.

Оценить стабильность траектории укладки конкретного армированного материала на конкретную поверхность по конкретной технологии укладки можно посредством экспериментального определения степени отклонения от геодезической траектории, при котором теряется стабильность – критическим углом.

Синтез траектории на ФП

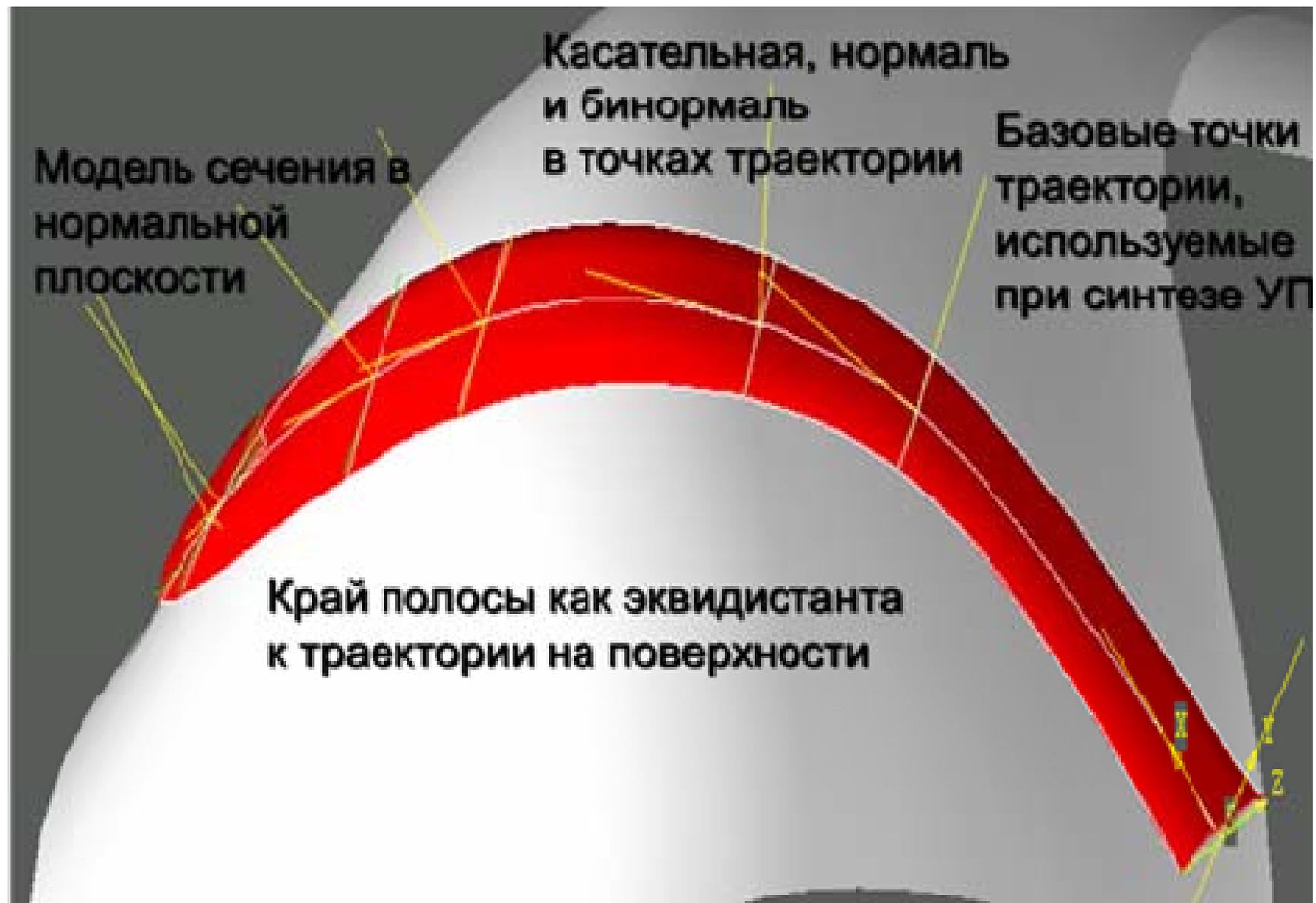


19. Сверху – векторы армирования на поверхности укладки, выбранные для синтеза траектории укладки.

Снизу - гладкая траектория укладки, принадлежащая поверхности укладки проходящая через начала векторов армирования и касательная к ним.

Синтезированные траектории укладки должны быть стабильными: угол между нормальными к траектории укладки и поверхности укладки в любой точке траектории укладки не должен быть больше критического угла.

Модель армированной полосы на ФП

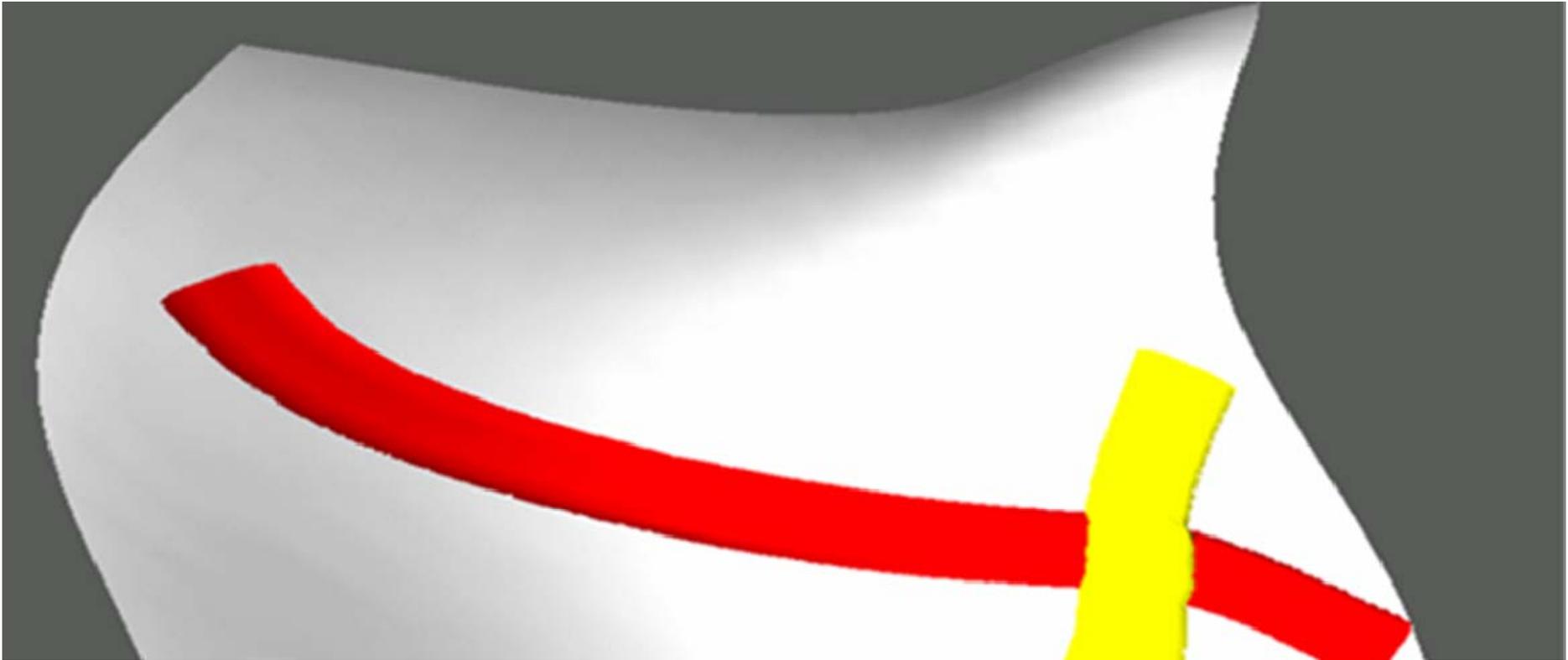


20. Вдоль траектории укладки укладывается полоса армированного материала.

Траектория укладки содержит в себе необходимую информацию для генерации управляющих программ исполнительной системы.

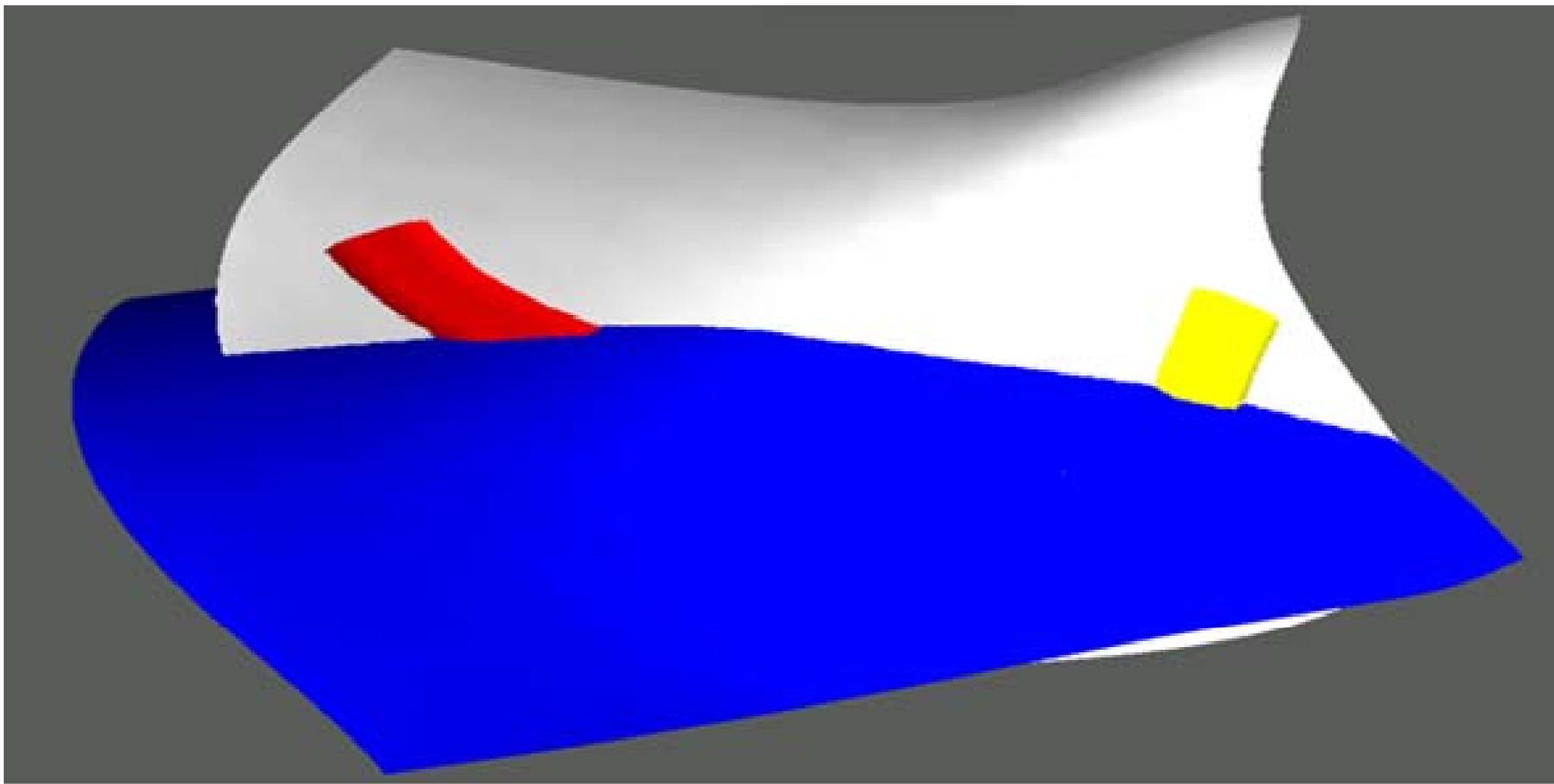
Модель уложенной полосы изменяет поверхность укладки для подлежащей укладки (очередной) полосы.

Очередные поверхности укладки



21. С каждой уложенной армирующей полосой изменяется очередная поверхность укладки

Обрезка полос внешней поверхностью конструкции



22. Полосы, выступающие за внешние поверхности конструкции, обрезаются. Обрезанные части полос удаляются из модели конструкции.

Предлагаемая концепция позволяет построить модель процесса «выращивания» и топологию арматуры «выращенной» конструкции, состоящей из последовательно уложенных полос, т.е. позволяет получить геометрическую модель сборки изготавливаемой конструкции. Модель конструкции, синтезированная с использованием предлагаемой концепции, содержит в себе геометрическую модель расположения армирующих полос в пространстве конструкции («сборку» полос), очередность укладки полос, информацию о материалах полос, необходимые геометрические данные для генерации управляющих программ для ИС укладки полос материала, а также данные для анализа свойств технологически реализуемой конструкции.

Итоги

- 1. Аддитивные технологии 2.5D-армирования пригодны для разработки неслоистых оптимальных конструкций**
- 2. Процессы разработки 2.5D-армированных конструкций тесно связаны**
- 3. Концепция 2.5D-армирования позволяет технологически реализовать топологию конструкции, близкую к заданной**