

# Программный комплекс проектирования и подготовки производства изделий из композиционных материалов

Перспективы развития авиационно-космической, ракетной, морской и другой сложной наукоемкой техники во многом связаны с внедрением и эффективным применением современных материалов. Среди наиболее важных требований к конструкции современных летальных аппаратов, судов, автотранспорта и т.п. можно назвать такие, как минимальная масса, максимальная жесткость и прочность узлов, высокая надежность, максимальный ресурс работы конструкций с учетом условий эксплуатации. В значительной мере перечисленные требования обеспечиваются выбором материала и совершенством технологии изготовления из него изделия.

В настоящее время наиболее перспективный класс материалов, удовлетворяющих всему комплексу требований к современной высокотехнологичной технике, составляют композиционные материалы (КМ). Компонентами КМ являются разнообразные составляющие, выполняющие роль основы (матрицы) и наполнителя. КМ, в которых матрицей служит полимерный материал, представляют один из самых многочисленных и разнообразных видов материалов, и их применение в различных областях дает значительный экономический эффект.

Конструкции из полимерных КМ используются в разных отраслях мировой промышленности начиная с 50-х годов прошлого столетия. Однако сегодня мы наблюдаем переход на новый технологический уровень, характеризующийся увеличением объемов производства КМ и увеличением доли их применения в различных изделиях. Этот переход стал возможен за счет развития технологий переработки композиционных материалов, удешевления сырья и компонентов и появления новых технических возможностей для производства изделий из КМ, что позволило не только обеспечить требуемые технические характеристики изделий, но и сделать производство изделий из композитов экономически целесообразным.

Важнейшая отличительная особенность КМ заключается в возможности создания из них элементов конструкции с заранее заданными свойствами, наиболее соответствующими условиям эксплуатации. Большой выбор материалов матрицы (полимерные, металлические, углеродные, керамические и др.) и армирующего наполнителя (углеродные, борные, органические, стеклянные и др. волокна), а также схем армирования позволяет управлять значениями прочности, жесткости, уровня

рабочих температур и другими свойствами, подбирая состав, соотношение компонентов и макроструктуру КМ. Можно создавать материалы как с изотропными, так и с анизотропными свойствами, управлять изгибной и крутильной жесткостью материала, варьируя порядок укладки слоев по толщине пакета.

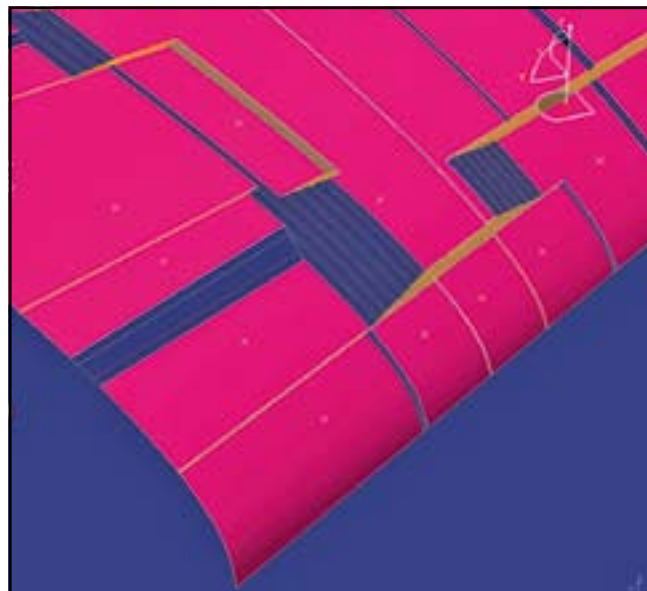


Рис. 1. Определение зон армирования обшивки крыла самолета в среде CATIA V5

В то же время получение заданных характеристик связано с необходимостью учитывать ряд особенностей композиционных материалов. Во-первых, свойства КМ формируются в процессе производства конкретного изделия. Во-вторых, процесс проектирования изделия начинается с конструирования самого материала – выбора его компонентов и проектирования технологии его производства. В-третьих, изделия из КМ обладают высокой степенью интегральности, требуемой как для сокращения стоимости изготовления, так и для повышения жесткости и долговечности конструкции. Эти особенности требуют тщательной проработки конструкции из КМ на этапах проектирования, поскольку ошибки, выявленные в процессе производства, сложно или вовсе невозможно исправить. Поэтому необходимо рассматривать процесс разработки и производства конструкций из КМ как единый взаимосвязанный процесс, в котором каждая

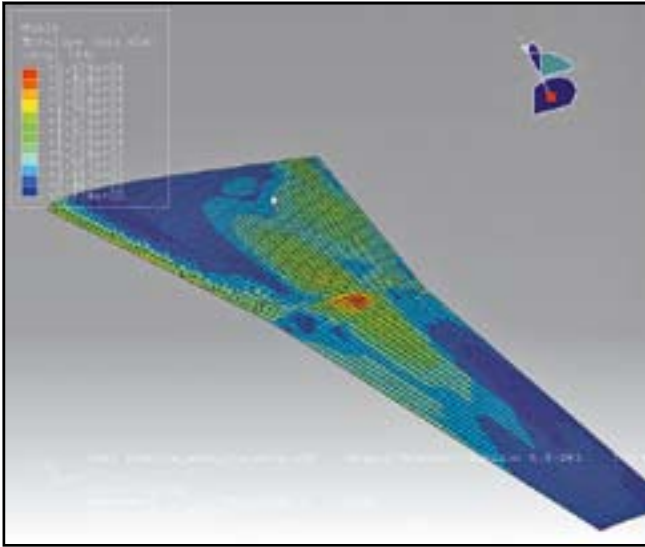


Рис. 2. Результат расчета напряженно-деформированного состояния конструкции из КМ в среде SIMULIA

из составляющих дополняет и определяет другую. Для того чтобы обеспечить интеграцию и автоматизацию этого процесса, включающего в себя такие этапы, как **концептуальная стадия, конструкторская подготовка, инженерный анализ, технологическая подготовка, этап испытаний и сертификации, производство и эксплуатация**, необходимо применение специализированного программного комплекса. Такой комплекс состоит из специализированных программных решений – систем класса CAD/CAM/CAE, объединенных средой управления проектными данными, реализуемой PDM-системой. Рассмотрим более подробно применение CAD/CAM/CAE-решений на таких основных этапах процесса, как конструкторская подготовка, инженерный анализ и технологическая подготовка производства.

На этапе **конструкторской подготовки** происходит детализация структуры конструкции из КМ с помощью CAD-системы. Процесс проектирования начинается с логического описания структуры композита. Исходя из конструктивных особенностей изделия, на базовой геометрии (например внешняя поверхность секции фюзеляжа самолета) определяются зоны армирования (участки, в пределах которых слоевая структура имеет постоянное армирование), направление наращивания слоев, количество и порядок укладки слоев, ориентация волокон в слоях. Далее происходит детализация слоевой структуры, когда определяются переходные зоны между участками разного армирования, исходя из толщин слоев и правил укладки, задаются ступенчатые переходы, так называемые “сбеги”, что необходимо для предотвращения расслаивания композитной структуры, формируются вкладыши и наполнители (например сотовые наполнители) для упрочнения, обеспечения водостойкости, атмосферной и химической стойкости. На рис. 1 показан пример определения зон армирования обшивки крыла самолета в среде системы CATIA V5.

При формировании слоевой структуры конструктор выбирает необходимый материал из структурированного каталога, в котором хранятся параметры, определяющие его физические свойства (модуль Юнга, коэффи-

циент Пуассона, модуль сдвига, величина напряжения растяжения, напряжения сжатия и др.). Свойства материала могут быть заданы для каждого слоя или группы слоев. Таким образом, каждый слой помимо геометрических характеристик имеет такие атрибуты, как ориентация волокон, толщина и материал, включая прочностные характеристики. Важно отметить, что заданные однажды атрибуты могут быть использованы при решении задач на последующих этапах, например для прочностного анализа конструкции в целом, при этом не требуется осуществлять их повторный ввод.

Тем не менее сформированная на этапе конструкторской проработки структура композита является предварительной и требует уточнения по результатам выполнения расчетов, в частности методами конечных элементов (КЭ), поэтому следующим этапом является **инженерный анализ** изделия. На данном этапе проводится полный спектр расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции из композиционных материалов, их динамического поведения в условиях нестационарного нагружения, устойчивости (в линейной и нелинейной постановках) и решение задач теплопередачи (рис. 2). На основе этих расчетов



ОТ ИДЕИ ДО ВОПЛОЩЕНИЯ



[WWW.BEE-PITRON.COM](http://WWW.BEE-PITRON.COM)

Россия, страны СНГ и Балтии  
 +7 (812) 273 3004, +7 (495) 580 6190  
 all@bee-pitron.com

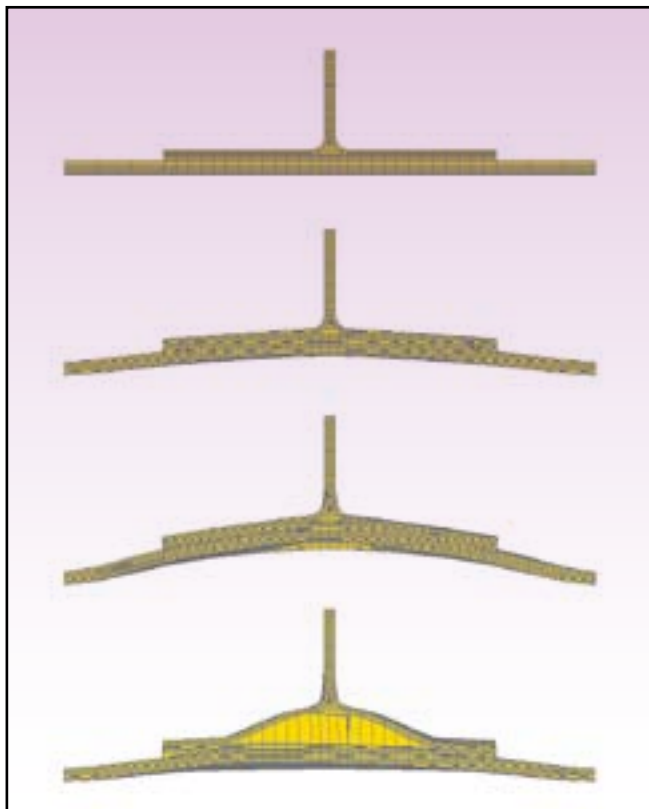


Рис. 3. Моделирование разрушения (расслаивания) Т-образного стрингера под воздействием вертикальной нагрузки

определяются параметры НДС для каждого слоя композиционного пакета.

Реализованные в системах инженерного анализа алгоритмы, основанные на линейной и нелинейной механике разрушения и теории повреждения, позволяют моделировать процессы разрушения композиционных материалов (в том числе расслаивание). С применением этих алгоритмов можно включать в конечно-элементную модель так называемые когезионные элементы, позволяющие описывать свойства клеевой основы между слоями пакета (рис. 3). Это позволяет оценить такие параметры, как допустимое повреждение, живучесть конструкции и т.п. На основе результатов анализа можно предсказать, какие изменения необходимо внести в конструкцию или технологический процесс, чтобы предупредить нежелательные явления при изготовлении или эксплуатации конструкции.

С точки зрения сокращения времени и стоимости разработки нового изделия, а также повышения его эксплуатационных характеристик, необходимым функционалом применяемого расчетного комплекса является так называемая многодисциплинарная оптимизация. С помощью подобного функционала разработчик может варьировать различные параметры (геометрические размеры и форму композитной конструкции, количество слоев и их ориентацию в пакете, материалы и их свойства) для достижения заданных характеристик.

Этапы проектирования и технологической подготовки производства конструкции из КМ носят итеративный характер, при этом каждая последующая

итерация формирует новые данные, которые могут повлиять на результаты предыдущего этапа. Вследствие этого исключительно важной и необходимой особенностью применяемого программного комплекса является ассоциативность создаваемой геометрии. Ассоциативность позволяет на любом этапе модифицировать геометрию изделия, производить уточнение структуры (взаимного расположения слоев, границ зон, направления волокон и т.п.), в том числе на основе данных, полученных в результате расчетов методом конечных элементов, с сохранением результатов предыдущих этапов работы.

Благодаря ассоциативности уже на ранних этапах проектирования изделия возможно начинать **технологическую подготовку производства** (ТПП). Помимо традиционных задач ТПП по проектированию технологической оснастки, подготовки управляющих программ для металлообрабатывающего оборудования и т.п., решаемых в CAD/CAM-системах, уникальными для подготовки производства композиционных деталей являются такие задачи, как проверка на корректность облегания оснастки материалом (тканевых выкроек, лент) и проектирование технологического процесса выкладки слоев.

Проверка на корректность облегания оснастки материалом выполняется для определения образования складок и растяжений при ручной укладке материала на технологическую оснастку. При этом учитывается значение предельно допустимых угловых деформаций материала каждого слоя (эта информация заимствуется из каталога материалов и автоматически вводится при выборе конструктором на начальном этапе). Если системой определены зоны недопустимых деформаций, можно воспользоваться функциями, позволяющими выполнить надрезы укладываемой ткани или разделить деформированный слой на участки и повторить расчет. На рис. 4 красным цветом показаны зоны с превышением предельных угловых деформаций укладываемого материала.



Рис. 4. Определение зон превышения предельных угловых деформаций укладываемого материала

После проведения необходимой корректировки структуры можно приступать к созданию рабочей документации. Для этого используется как твердотельное представление композитной детали (габаритные размеры), так и поверхностное – для представления слоевой структуры изделия и описания последовательности армирования. Документация для ручной укладки материала на формообразующую оснастку формируется в автоматическом режиме, при котором выполняется развертка слоев на плоскости с указанием ориентации и позиционирования в пространстве – таким образом получают альбомы выкроек.

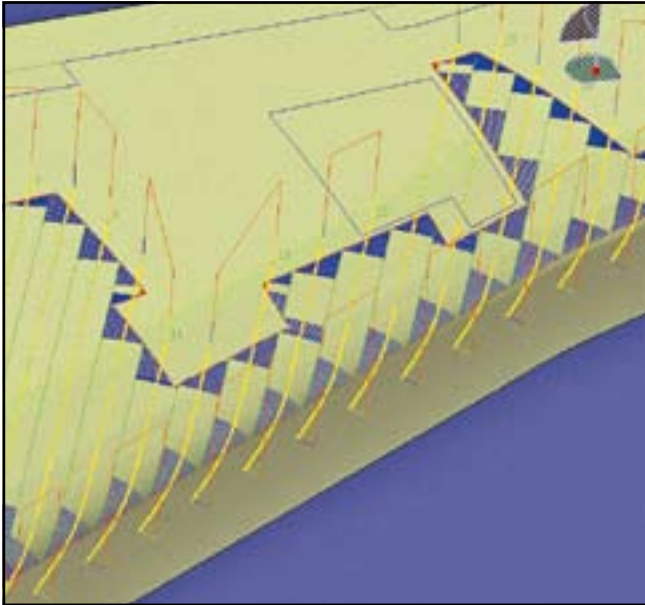


Рис. 5. Траектория движения выкладочной головки станка в среде CATIA V5

Контуры выкроек могут быть переданы в модуль оптимизации раскроя и подготовки управляющих программ для раскройных станков.

При программировании станков с ЧПУ для автоматической выкладки материала необходимо произвести дополнительную подготовку. Одна из задач такой подготовки заключается в разбиении слоев на полосы заданной ширины вдоль направления ориентации волокон в соответствии со стандартными типоразмерами лент слоистого наполнителя, так называемого препрега, используемого для производства конкретного изделия. Несмотря на кажущуюся простоту этой задачи, решение ее сопряжено с рядом нюансов. Например, лента при выкладке может быть обрезана станком только под прямым углом, а минимальная длина отрезка укладываемой ленты ограничена характеристиками применяемого оборудования (выкладочной головки). Поэтому система должна принять в расчет эти параметры и рассчитать возможные перебеги и наложения соседних отрезков ленты и сформировать траекторию движения выкладочной головки станка (рис. 5).

В результате этих расчетов формируется управляющая программа (УП) для конкретной модели оборудования с ЧПУ. По аналогии с процессом подготовки УП для многокоординатного металлообрабатывающего оборудования залогом безопасности также является применение специальных программных симуляторов, задача которых состоит

в контроле перемещений рабочих органов станка во время работы и предотвращение возможных столкновений с оснасткой и деталью (рис. 6).

Целью данной статьи являлась демонстрация необходимости комплексного подхода к применению программных средств для изготовления деталей из КМ, поэтому за ее рамками осталось множество вопросов, относящихся как к сфере конструкторской, так и технологической подготовки производства, в частности проблемы проливаемости форм при изготовлении деталей методом RTM (инжекция связующего вещества в закрытую форму), применения специального оборудования и материалов для производства размеро- и формостабильных конструкций и др. Авторы планируют осветить эти вопросы, а также детально описать этапы процесса с использованием конкретных программных комплексов в следующих публикациях.

Учитывая интенсивное освоение в нашей стране описанных выше технологий, необходим системный подход к проектам их внедрения, а также обобщение уже накопленного опыта. Группа компаний "Би Питрон", имеющая определенный опыт во внедрении подобных технологий, приглашает к сотрудничеству промышленные предприятия, конструкторские бюро и научно-исследовательские институты, работающие в области разработки и производства конструкций из композиционных материалов. При этом "Би Питрон" ориентируется на использование технологий ведущих мировых фирм, специализирующихся в области производства материалов, оборудования и программного обеспечения.

**И. А. Волков, И. В. Слозцов, М. М. Шальнов,**  
компания "Би Питрон"

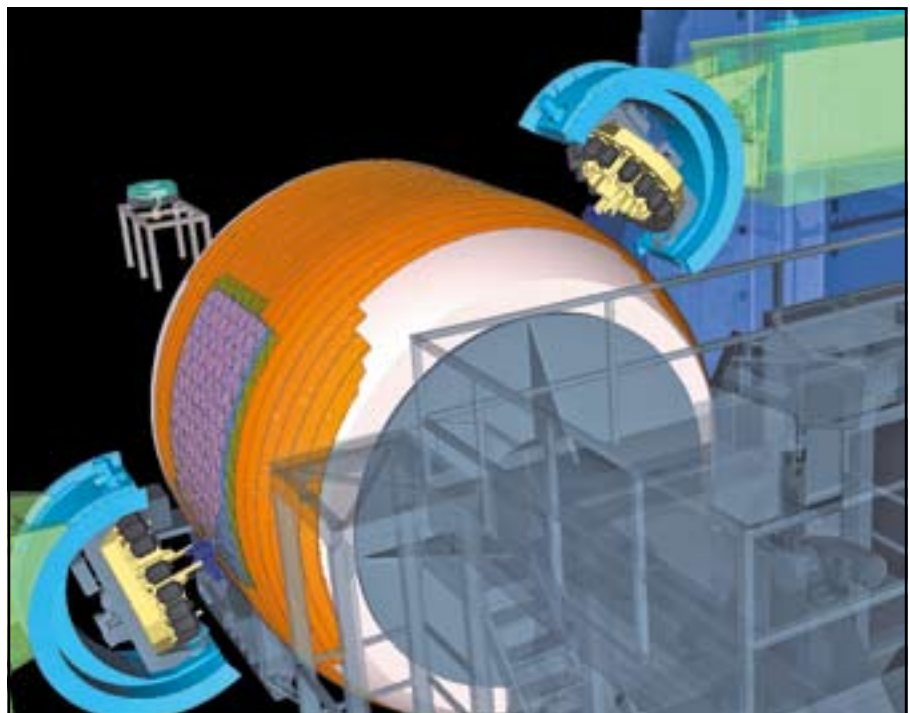


Рис. 6. Моделирование процесса выкладки препрега на оборудовании с ЧПУ в среде VERICUT