

## Управление РТС для формообразования оптимальных конструкций из армированных реактопластов

*Д.Н.Андреев, Г.И.Прокофьев*

*(каф. РАПС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», [mitiaand84@gmail.com](mailto:mitiaand84@gmail.com), [GIProkofiev@mail.eltech.ru](mailto:GIProkofiev@mail.eltech.ru))*

Композиционные материалы состоят из двух или более компонентов и обладают специфическими свойствами, отличными от суммарных свойств составляющих их компонентов. Их использование становится все более широким, что вызвано возможностью оптимизации свойств конструкции посредством выбора компонентов и задания структуры армирования анизотропных конструкций из волокнистых материалов. Наибольшее применение несущие различные физические нагрузки конструкции находят в аэрокосмической отрасли, судостроении, автомобилестроении, в специальных изделиях, то есть там, где эксплуатируются их уникальные свойства, например, удельная прочность, радиопрозрачность и др.[5].

Композиционные материалы, в зависимости от вида армирующего компонента композиты делятся на две основные группы: дисперсно-упорядоченные (армирующими компонентами являются тонкодисперсные порошкообразные частицы) и волокнистые (ВКМ). Они различаются структурой и механизмами образования прочности. В нагруженных дисперсно-упорядоченных композитах всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью множества частиц порошка создается структура, эффективно сопротивляющаяся пластической деформации. В ВКМ высокопрочные волокна воспринимают основные напряжения и обеспечивают жесткость и прочность композиции в направлении ориентации волокна. Податливая матрица (связующий материал – СМ), заполняющая межволоконное пространство, обеспечивает совместную работу отдельных волокон за счет собственной жесткости и взаимодействия, существующего на границе раздела матрица - волокно. Механические свойства волокнистого композита определяются тремя основными параметрами: прочностью армирующих волокон, жесткостью матрицы и прочностью связи на границе матрица - волокно. Соотношение этих параметров характеризует весь комплекс механических свойств материала и механизмы его разрушения. Отличительной особенностью волокнистых композитов является возможность преимущественного расположения волокон в том или ином направлении (задания структуры армирования) и, как следствие, создание конструкций с анизотропными свойствами [1].

Наиболее полно возможности ВКМ могут быть использованы в том случае, если их применение осуществляется на начальном этапе разработки, так как конструкционный материал и конструкция при использовании композита создаются одновременно. Это требует создания адекватных систем автоматизации проектирования, технологической подготовки производства и самого процесса изготовления конструкций.

При проектировании конструкций необходима разработка не только их внешней формы, но и внутренней структуры. Последний вопрос решает новое направление механики деформируемого тела - оптимальное проектирование конструкций. Работы по данному направлению велись уже давно и можно констатировать, что вопрос автоматизированного проектирования оптимальных конструкций сложной формы в целом близок к решению [2]. Конструкторы конечных изделий могут предоставить производству исходную схему армирования (ИСА), обеспечивающую выполнение их требований к изделию, либо иным способом описать внутреннюю структуру изделия.

Проблемой является автоматизация процессов формообразования конструкций с поверхностями ненулевой гауссовой кривизны с произвольными траекториями армирования, в общем случае до последнего времени нерешенная. Известные методы, технологии и программное обеспечение обеспечивают изготовление конструкций преимущественно с поверхностями одинарной кривизны (развертывающимися на плоскость) [3]. Производство сложных конструкций из ВКМ в части выкладки полос армирующего материала ведется фактически вручную, что приводит к его удорожанию, зависимости производства от наличия высококвалифицированной рабочей силы и непостоянства качества продукции, большому количеству трудно утилизируемых отходов. Существенно, что формообразование ручной укладкой не позволяет осуществить требуемую геометрическую форму или/и схему армирования с заданной точностью [1].

В настоящее время создана технологическая база, обеспечивающая возможность физического формообразования конструкций с поверхностями ненулевой гауссовой кривизны с произвольными траекториями армирования с помощью гибких производственных модулей (ГПМ), входящих в состав робототехнической системы (РТС). В составе ГПМ анизотропных конструкций из ВКМ можно выделить аппаратуру и программные средства, которые могут быть территориально распределены и связаны между собой материальными и информационными интерфейсами.

В общем случае [1], ГПМ в своем составе должен иметь следующие аппаратные подсистемы:

- манипуляционную систему, обеспечивающую контурное перемещение и ориентацию рабочих органов (РО) в пространстве относительно формообразующей поверхности (ФП) с заданной производительностью при соответствующих силовых нагрузках и точности;
- магазин сменных РО и инструментов, обеспечивающих выполнение всех технологических процессов стадий изготовления конструкции;
- автоматизированные средства перезарядки сменных блоков в РО процесса формообразования и расходных материалов в сменных блоках;
- устройства числового программного управления контурной манипуляционной системой;
- устройства программно-логического управления цикловыми и позиционными подсистемами;
- вычислительный комплекс, обеспечивающий технологическое проектирование конструкции, управление процессом ее изготовления, ведение «портрета» оборудования и процесса изготовления, а также их отображение.

Работа, ведущаяся на кафедре РАПС СПбГЭТУ "ЛЭТИ", имеет своей целью создание методов и обеспечивающего их программного обеспечения, позволяющих выполнять технологическую подготовку процессов создания оптимальных конструкций помощью вышеописанной РТС.

Проблему технологической подготовки можно свести к созданию осуществимой в используемой РТС детализованной схемы армирования (ДСА), основываясь на базе исходной схемы армирования (ИСА), задаваемой конструктором, с выполнением ограничений.

Детализация проблемы разбивает ее на следующие задачи:

- формирования набора данных, необходимых для моделирования внутренней структуры изделия, процесса его создания и формирования управляющей программы РТС;
- создания поисковых методов, обеспечивающих построение ДСА при удовлетворении заданным конструктором требованиям;
- генерации выполнимой управляющей программы РТС на основе сформированной ДСА;
- создания алгоритма, обеспечивающего быструю работу поисковых методов при оперативном перепланировании работы РТС (в случае возникновения неполадок в РТС);
- оптимизации управляющей программы РТС;
- увязки всех созданных методов в единый алгоритм, предоставляющий возможность автоматизированного производства произвольных конструкций из волокнистых композиционных материалов.

Формализованное описание набора исходных данных, с использованием которого в дальнейшем будут решаться отмеченные задачи, приведено далее.

Исходные данные подразделяются на следующие группы:

1. Требования, описывающие внешнюю геометрическую форму и внутреннюю структуру конструкции. Они состоят из:

1.1. Множества групп векторов, описывающих внутреннюю структуру объекта:

$$Tp = \{\bar{x}_i, \bar{v}_i, \bar{a}_i\},$$

где  $\bar{x}_i$  - вектор координат точки,  $\bar{v}_i$  - вектор укладки АМ,  $\bar{a}_i$  - вектор, описывающий характеристики АМ в точке.

1.2. Множества уравнений поверхностей, описывающих внешнюю геометрическую форму объекта:

$$P\sigma = \{f_k, \{\bar{v}_l\}\},$$

где  $f_k$  - уравнение поверхности,  $\{\bar{v}_l\}$  - множество уравнений кривых/прямых, ограничивающих поверхность.

В определенных случаях ФП и/или внешняя геометрическая форма объекта может быть представлена в виде множества точек:

$$P\sigma = \{y_k\}$$

В том случае, если описание внутренней структуры (1.1) полностью определяет внешние формы поверхности объекта, то отдельное описание ФП/внешней формы объекта не нужно.

2. Ограничения - технологические и исполнительной системы. Существуют следующие ограничения:

2.1. Технологическое - по времени жизни связующего материала - время от начала момента полимеризации СМ до окончательного соединения полосы со всеми связанными с ней полосами ( $T_{ij}$ ) не должно превышать времени жизни связующего материала (Тж.с.м.).

2.2. Ограничения РО:

2.2.1. По натяжению – выкладка возможна только с натяжением. Поэтому траектория выкладки должна выбираться такой, чтобы осуществить натяжение АМ.

2.2.2. По производительности пропитки  $V_{пр.max}$ . – скорость укладки ограничена ею.

2.2.3. По возможностям резака: резак, в зависимости от конструкции, может резать ленту поперек или под углом к краю ленты.

2.3. Ограничения по возможности прижима ленты на поверхности выкладки (по рельефу). В начале выкладки детали необходимо прижимать все нити ленты. Как следствие,

рельеф точки прижима и ее окрестностей нужно проверять на возможность прижима всех нитей ленты.

3. Критерии - ограничения, используемые при выборе между возможными с точки зрения следования требованиям и ограничениям путями решения задачи.

При построении модели процесса и модели итоговой конструкции необходимо исходить из необходимости достижения следующих критериев:

3.1. Критерий производительности: требуется оптимизировать процесс таким образом, чтобы время изготовления  $T_{изг} \rightarrow \min$ . Данный критерий связан с технологическим ограничением по времени жизни связующего материала 2.1.1 и ограничениями РО 2.2.2 и 2.2.4.

3.2. Критерий качества: необходимо оптимизировать процесс таким образом, чтобы отклонения значений  $\Delta = \{\Delta x_i, \Delta v_i, \Delta \bar{a}_i\}$ , описывающих полученную внутреннюю структуру  $Стр = \{\bar{x}_i, \bar{v}_i, \bar{a}_i\}$ , от требований п. 1.1, не превышали определенных значений, задаваемых в виде множества векторов:

$$\Delta_{допустимое} = \{\Delta_{доп}x_i, \Delta_{доп}v_i, \Delta_{доп}\bar{a}_i\},$$

где  $\Delta_{доп}x_i$  - допустимое абсолютное отклонение от требуемых координат точки,  $\Delta_{доп}v_i$  - допустимое абсолютное отклонение от требуемого вектора укладки АМ в точке,  $\Delta_{доп}\bar{a}_i$  - допустимое отклонение вектора, описывающего внутреннюю структуру АМ в точке от требуемого.

3.3. Иные критерии, выдвигаемые конструктором.

Основной задачей в настоящее время является создание методов построения ДСА и модели процесса создания ДСА, основываясь на заданных требованиях и ограничениях, а также удовлетворяя заданный критерий. Анализируя готовую ДСА, можно проверить верность выбранного подхода к ее созданию с точки зрения удовлетворения требований (задаваемых ИСА) и связанным с качеством изделия критериям. Анализ модели построения ДСА даст возможность проверить подход с точки зрения ограничений и критериев, связанных с производительностью.

Вопрос управление РТС при формообразовании конструкций с поверхностями ненулевой гауссовой кривизны с произвольными траекториями армирования требует для своего решения большой работы. Был произведен анализ встающих при этом проблем и сформулированы задачи, последовательное решение которых приведет к ее разрешению. Формализовано описан набор исходных данных, требуемых для решения задачи управления РТС. Ведутся работы по созданию методов построения ДСА и модели процесса

изготовления конструкции, дающих возможность сформировать управляющую программу для РТС.

1. Прокофьев Г.И. «Автоматизированная технология формообразования анизотропных конструкций из волокнистых композиционных материалов», докторская дисс., СПб, 1998.
2. Mark Walker, Ryan Smith. A methodology to design fibre reinforced laminated composite structures for maximum strength. *Composites Part B: Engineering*, Том 34, Вып 2, Март 2003, с. 209-214.
3. Susan C. Mantell, George S. Springer. Filament winding process models. *Composite Structures*, Том 27, Вып 1-2, 1994, с. 141-147.
4. Liyang Zhao, Susan C. Mantell, David Cohen and Reed McPeak. Finite element modeling of the filament winding process. *Composite Structures*, Том 52, Вып. 3-4, Май-Июнь 2001, с. 499-510.
5. Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. "Композитные материалы. Механика и технология". Техносфера, 2004.