



УДК: 621.7.04 + 621.7.06

М. В. Щемелев, Г. И. Прокофьев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Техническое и информационное обеспечение процессов формообразования оптимальных конструкций из полимерных композитов

Рассматривается современное состояние технологии формообразования конструкций посредством укладки роботом армированных волокнистых материалов на поверхность. Обосновывается актуальность проектирования оптимальных эффективных конструкций. Предлагается новый подход к техническому и информационному обеспечению процессов формообразования оптимальных конструкций, выделяются значимые проблемы.

Волокнистый композиционный материал, схема армирования, эффективная оптимальная конструкция, параметр оптимизации, устойчивая траектория укладки, автоматизированная укладка, рабочий орган робота

Несущие нагрузку армированные конструкции из композиционных материалов находят все большее применение в различных отраслях. Ответственные конструкции, технологии их проектирования и изготовления [1] непрерывно совершенствуются в направлении применения лучших геометрических форм, компонентов композита, схем армирования.

Особый интерес представляют универсальные технологии автоматизированной укладки лент-препрегов и отдельных волокон. Последняя разновидность укладки – автоматизированная укладка волокна (Automated Fibre Placement – AFP), в последнее десятилетие постепенно вытесняет более раннюю технологию укладки ленты (Automated Tape Layup – ATL) вследствие большей гибкости AFP, а также пониженной стоимости при использовании роботов манипуляторов вместо обычных для ATL крупногабаритных порталных комплексов укладки. Нерешенными остаются проблемы, связанные с управлением процессом укладки волокна и низкой по сравнению с ATL производительностью [2].

Актуальными остаются вопросы оптимального проектирования композитных структур. При этом вопросам использования структур с про-

странственным армированием уделяется значительно меньше внимания [3] по сравнению с вопросами проектирования и изготовления слоистых конструкций. Такая ситуация связана со сложностью технологической реализации таких конструкций как на этапе изготовления, так и на этапе проектирования – товарных решений подобного рода на сегодняшний день не существует, а средства автоматизированного проектирования композитных конструкций рассчитаны на технологию послойной укладки.

Совершенствуются также исполнительные системы укладки лент из пропитанного связующим армирующего материала, на поверхность укладки. При этом для оптимальных ответственных конструкций с ненулевой гауссовой кривизмой приоритет имеют технологии укладки лент с однонаправленным армированием и механически не связанными компонентами (нитеями, жгутами) [2]. Для оптимальных конструкций наблюдается смещение акцента со слоистых к пространственно армированным конструкциям с использованием различных компонентов композита в одной конструкции [3], [4]. К перспективным направлениям относятся эффективные оптимальные кон-

струкции, в которых компоненты изделия (детали) сведены в единую конструкцию в процессе ее проектирования и изготовления [5].

Совершенствование процессов создания конструкций не может быть осуществлено без согласования их функциональности и обеспечения заданного диапазона изменения параметров оптимизации конструкции всеми процессами цикла ее создания. К основным параметрам оптимизации конструкции в процессах формообразования относятся: геометрическая форма, схема (структура) армирования, компонентный состав и параметры технологических режимов процессов формообразования [5].

Далее рассмотрены некоторые проблемы разработки технологий синтеза схем (структур) армирования и исполнительных систем формообразования эффективных оптимальных конструкций.

Информационное обеспечение процесса формообразования. Современный подход к описанию и моделированию композитных конструкций, получаемых путем укладки волокон, подразумевает использование заранее определенного закона армирования в пределах рассматриваемой конструкции. Один из методов задания схемы армирования для выкладываемых конструкций предполагает разбиение модели формирующей поверхности оснастки на ограниченные области, в которых производится укладка материала встык по фиксированному набору углов (-45° , 0° , 45° , 90°) относительно заранее выбранного реперного направления [1].

Такой подход к заданию схем армирования подходит для описания ограниченного класса конструкций, однако для работы с оптимальными эффективными конструкциями их недостаточно, в особенности при рассмотрении неслоистых конструкций с произвольной внутренней структурой. Для решения задачи управления структурой и компонентным составом конструкции необходим новый подход, который позволит однозначно описать особенности конструкции и выработать оптимальную стратегию ее формирования.

На этапе проектирования конструкции непосредственно при определении схемы армирования можно выделить два основных условия (аспекта), определяющих схему армирования. Первое – соответствие конструкции требуемым характеристикам (например, силовым), что оказывает влияние на выбираемые комбинации ориентаций арматуры в критических зонах кон-

струкции. Второе – соответствие требованиям по геометрической форме и количественным характеристикам, например массе, что определяется компонентным составом и количеством используемого материала.

Для задания конструкций с произвольной внутренней структурой предлагается вынести описанные аспекты схемы армирования на два рассматриваемых независимо логических уровня.

Первый – каркасный (или скелетный) уровень будет определять элементы схемы армирования, основная цель которых – удовлетворение требований нагружения к конструкции. На этом уровне описывается армирование участков конструкции, несущих основную нагрузку. На этапе проектирования конструкции необходимо выявить такие участки и определить для них подходящий компонентный состав, а также оптимальное размещение волокон. На уровне модели такие участки можно задавать точками, в окрестности которых армирующие волокна должны быть ориентированы в соответствии с заданными для точек касательными.

Второй – «геометрический» уровень схемы армирования. Основная функция этого уровня – это дополнение каркасного уровня таким образом, чтобы синтезированная по двум уровням схемы армирования модель конструкции соответствовала изначальным требованиям по геометрической форме и массе. Данный уровень сам по себе не накладывает ограничений по ориентации армирующих волокон, и, в зависимости от конструкторского решения, может вообще отсутствовать.

Предложенный подход к описанию схемы армирования конструкции требует создания набора средств, обеспечивающих подготовку технологической информации для процесса формирования конструкции на базе заданной схемы армирования.

Частный случай технологической информации – это информация о траекториях укладки, дискретных технологических операциях, производимых во время укладки, – обрезке материала, начале или завершении траектории, – и технологические параметры работы подсистемы пропитки. Эта информация транслируется в программу для роботов-исполнителей и должна соответствовать ряду требований и ограничений, предъявляемых физическим уровнем процесса укладки волокон.

Основное требование к траекториям – их фактическая выполнимость для исполнительной системы. Очевидное требование – синтезируемые

траектории должны располагаться в пределах рабочей зоны манипулятора и не вызывать коллизий при укладке материала по этим траекториям.

Синтез траекторий связан также с требованием максимальной производительности процесса укладки. Особое значение производительность приобретает при использовании реактопластичных материалов, для которых характерны необратимые процессы полимеризации. Большие задержки процесса укладки таких материалов могут привести к существенному снижению качества материала конструкции, необходимости производить дополнительную механообработку поверхности укладки и, в свою очередь, к еще большему снижению производительности процесса формования в целом.

Максимальная производительность укладки достигается при непрерывной укладке по траекториям с минимальным холостым ходом манипулятора и минимальным использованием дискретных технологических операций. Это означает, что обрезка материала должна производиться как можно реже, и, следовательно, имеет смысл синтезировать как можно более длинные траектории, покрывающие одновременно несколько участков на схеме армирования. Также необходимо по возможности сократить использование устройств, обеспечивающих фиксацию материала в начале траектории. Последнее порождает проблему устойчивости материала на расчетной траектории армирования [6].

Важный шаг процесса подготовки технологических данных, следующий за синтезом траекторий армирования – это определение очередности укладки. Способ определения очереди укладки влияет не только на производительность процесса, но и на конечную внутреннюю структуру изготавливаемой конструкции.

Особую сложность представляет собой реализация информационной системы, способной обеспечивать при выкладке параллельную работу комплекса более чем с одним исполнительным устройством. Укладка материала с помощью нескольких роботов позволяет существенно повысить производительность процесса формования конструкции, однако порождает дополнительные задачи, связанные с синтезом траекторий и планированием укладки с учетом одновременной работы нескольких манипуляторов и возможным пересечением их рабочих зон. Такая система должна быть устойчива к отказам оборудования и обладать способностью оперативного перепланирования и перепоручения работ между исполнительными устройствами.

Таким образом, информационное обеспечение процесса изготовления оптимальных эффективных конструкций должно решать комплекс взаимосвязанных задач.

Техническое обеспечение процесса формообразования. Процесс формообразования должен обеспечиваться техническими средствами робототехнической системы, среди которых обращает на себя внимание рабочий орган робота, укладывающий материал вдоль синтезированных траекторий армирования.

Используемые для слоистой выкладки рабочие органы выкладочных машин и роботов позволяют [7]:

- вытягивать из инерционного накопителя большой емкости предварительно пропитанный («сухой») армирующий материал (ленту, жгут или нити) и транспортировать его в зону укладки;
- нагревать укладываемый и уложенный материал в зоне их контакта;
- формовать укладываемый материал с использованием вращающихся роликов (компакторов) в начале траектории укладки и на ее протяжении;
- обрезать укладываемый материал (ленту или ее компоненты) в процессе укладки;
- поставлять в зону формования для укладки ленту или ее компоненты.

В робототехнических системах, изготавливающих эффективные оптимальные конструкции с отмеченными параметрами рабочие органы дополнительно должны [8]:

- нести в себе накопители компонентов композиции;
- формировать и пропитывать укладываемый армированный материал в процессе укладки при произвольной ориентации в пространстве («мокрая выкладка»);
- управлять соотношением компонентов композиции в укладываемой ленте;
- управлять технологическими параметрами процесса выкладки;
- быть способными работать с разными исходными компонентами композиции;
- автоматически заменяться рабочим органом выкладки с заполненными накопителями с тем или иным составом компонентов композиции или другой стадии технологического процесса изготовления (полимеризации, измерения, механической обработки, отделки);
- транспортироваться и обслуживаться системой автоматической замены рабочих органов с отработанными накопителями материалов.

Робототехнические комплексы, предназначенные для изготовления эффективных оптимальных несущих нагрузки армированных конструкций из полимерных композиционных материалов, имеют специфику информационного обеспечения и управления (по отношению к «близким» им по функциональным возможностям технологическим комплексам с контурным управлением, например дуговой сварки и механообработки). Она заключа-

ется в анализе предложенных схем армирования и диапазона изменения параметров оптимизации конструкции, проектировании процессов технологической подготовки, планировании работы комплекса, генерации управляющих программ для всего оборудования. При этом критерием качества процессов организации работы комплекса, может служить максимальная производительность процесса формообразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Strong B. Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications. 2 ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2007. 640 p.
2. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future / H.-J. Dirk, A. Lukasiewicz, C. Ward, K. D. Potter // Composites. Part B: Engineering. 2012. Vol. 43, № 3. P. 997–1009.
3. Особенности постановки и решения задач оптимизации структуры и состава пространственно армированных углерод-углеродных и углеродкерамических композитных конструкций ракетной техники / А. А. Смердов, С. В. Тащилов, К. А. Пономарев, А. Н. Миронихин // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. № 8. С. 137–147.
4. Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite structures / G. Dell'Anno, I. K. Partridge, D. D. R. Cartié, A. Hamlyn, E. Chehura, S. W. James,

R. P. Tatam // Int. J. of Structural Integrity. 2012. Vol. 3, Iss. 1. P. 22–40.

5. Прокофьев Г. И. Технология формообразования эффективных, несущих нагрузки, оптимальных, анизотропных конструкций из ВКМ // Композитный мир. 2013. № 6. С. 70–75.

6. Прокофьев Г. И., Щемелев М. В. Синтез траекторий армирования анизотропных конструкций из композитов // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 8. С. 22–30.

7. Hamlyn A., Hardy Y. Fiber Application Machine. Coriolis Composites, assignee. Pat. CA2812988 A1. 2006. Sept. 8.

8. А. с. 1392751 СССР, МПК В 29 С 41/32. Устройство для выкладки ленточного материала / Г. И. Прокофьев, А. И. Исупов, А. К. Горчаков, А. В. Кадесников (СССР) – приоритет 30.09.85; зарегистрировано 3.01.88. С. 5.

M. V. Shchemelev, G. I. Prokofiev
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

TECHNICAL AND INFORMATION SUPPORT OF THE OPTIMAL COMPOSITE STRUCTURES FABRICATION

Reviews the current state of the fiber-reinforced composite structures manufacturing technologies such as tape layup and fiber placement. Relevance of finding new methods for optimal and effective structures engineering is justified. An approach for handling such structures on the pre-manufacturing and manufacturing stages is proposed, with potential technical and informational problems highlighted.

Fiber-reinforced composite, reinforcement scheme, effective optimal structure, optimization parameter, stable layup path, layup automation, layup robot