

УДК 678.8

*П.Н. Тимошков¹, В.А. Гончаров¹, Л.Н. Григорьева¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹***РОБОТИЗИРОВАННАЯ ВЫКЛАДКА ПРЕПРЕГА
КАК АЛЬТЕРНАТИВА ТЕХНОЛОГИЯМ ATL И AFP (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-87-98

В связи с более широким внедрением композиционных материалов в автоматизированное производство деталей с использованием препрега интерес к ним повышается. Существует две основные технологии автоматизации выкладки препрега: автоматизированная выкладка ленты и автоматизированная выкладка волокон. Обе технологии не всегда являются рентабельными для всех типов деталей, и ручной труд, как правило, используется для изготовления сложных деталей при небольших объемах производства. В качестве альтернативы двум доминирующим решениям автоматизации предлагаются четыре варианта автоматизированной выкладки с помощью манипуляторов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, автоматизированная выкладка ленты, автоматизированная выкладка волокон, препрег, манипулятор.

*P.N. Timoshkov¹, V.A. Goncharov¹, L.N. Grigoreva¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Hrulkov¹***ROBOTIC LAYING OUT OF PREPREGS AS AN ALTERNATIVE
TO TECHNOLOGY TO ATL AND AFP (review)**

With the growing use of composite materials, the automated production of parts using prepreg is gaining increasing interest. There are two main types of prepreg laying automation: Automated Tape Laying (ATL) and Automated Fiber placement (AFP). Both of these technologies are not always cost effective for all types of parts, and manual labor tends to be used to make complex parts with low production volumes. As an alternative to these two dominant automation solutions, there are 4 options for automated laying with manipulators.

Keywords: polymeric composite materials, automated tape laying (ATL), automated fiber placement (AFP), prepreg, manipulator.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в автоматизированном производстве деталей становится все шире [1, 2]. Так, во ФГУП «ВИАМ» разработан план разработки и исследований новых материалов с требуемыми характеристиками по прочности и стойкости к воздействию повышенной температуры, влажности и агрессивных сред до 2030 г. [3, 4]. При внедрении таких технологий изготовления деталей из ПКМ применяют различные объемные армирующие наполнители, а также автоматизированные процессы выкладки деталей [5–7]. С увеличением использования пластика, армированного углеродным волокном, следует выбрать более рациональный производственный процесс.

В промышленности распространенной формой материала для изготовления композитных структур является препрег, т. е. волокна, предварительно пропитанные

термореактивной смолой. В производстве композиционных материалов с использованием препрега преобладают две технологии автоматизации выкладки: автоматизированная выкладка ленты (automated tape laying – ATL), при которой широкая лента препрега выкладывается на форму, и автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP), при которой одновременно укладывается несколько более узких лент. В связи с этим необходимо использовать материалы в виде лент: для процесса ATL – шириной 150–300 мм, а для процесса AFP – шириной 6,35 мм [8].

Однако в аэрокосмической отрасли многие детали (нервюры, лонжероны и кронштейны) слишком малы или имеют достаточно сложную форму, чтобы можно было их эффективно производить с использованием технологий ATL или AFP [9]. Такие геометрические особенности, как двойная кривизна, узкие углы и крутые пандусы, являются сложными для автоматизированной выкладки, поэтому для мелких деталей трудно реализовать данный процесс из-за минимальной длины участка [10, 11]. Для проведения процессов ATL и AFP требуются дорогостоящие капитальное оборудование и материалы [12], а возможная производительность машины во многом зависит от размера и сложности производимой детали. Мелкие детали требуют частого запуска и остановки машины, что приводит к низкой производительности [13].

В качестве альтернативы технологиям ATL и AFP предложены автоматизированные системы, с помощью которых препрег захватывается вакуумными присосками и перемещается на форму. Эти системы собирают слои препрега, вырезанные из широкого рулона материала, и размещают их на плоских поверхностях или формах. Несмотря на меньшие затраты, необходимые для внедрения таких систем (меньшие, чем для AFP и ATL), до сих пор этот процесс в промышленности не внедрен, а также нет коммерчески доступных альтернатив технологиям ATL и AFP для автоматизированного производства композитов [14]. Причина отсутствия промышленного внедрения изучена недостаточно, но опубликованные в научно-технической литературе результаты в области автоматизированной обработки препрега показывают, что проекты направлены на автоматизацию выкладки на профильные объемные формы (выкладка препрега на такую форму слишком сложна для автоматизации с использованием существующих технологий, поэтому проблему необходимо решать так, чтобы создать действительно эффективные системы) [14–17]. В результате пока используются ручные методы производства для изготовления изделий сложной формы и с небольшими объемами выпуска. При ручных операциях 40–60% производственных затрат может быть связано с резкой и обработкой слоев препрега [18]. Вместо выкладки слоев непосредственно на форму в некоторых случаях возможно разделить размещение и формование на два этапа: сначала плоский препрег укладывается, а уже затем формируется с использованием методов вакуумного формообразования, горячего или последовательного формования. Данное разделение упрощает процесс выкладки и разработку автоматизированного решения и в то же время сокращает значительный объем ручного труда, который в противном случае был бы необходим.

Варианты выкладки, альтернативной технологиям ATL и AFP

Представлены четыре варианта технологии для захвата слоев препрега с плоской поверхности и выкладки их на плоскую оснастку, готовую к последующему формованию. Цель каждой технологии – рентабельное производство процесса (рис. 1). При этом автоматизированные альтернативные варианты для выкладки заготовок препрега должны отвечать стандартам качества и обеспечивать такие же скорости выкладки, которые предъявляются при выкладке заготовок вручную. Данные решения разработаны для разных заготовок, используемых при послойной выкладке.

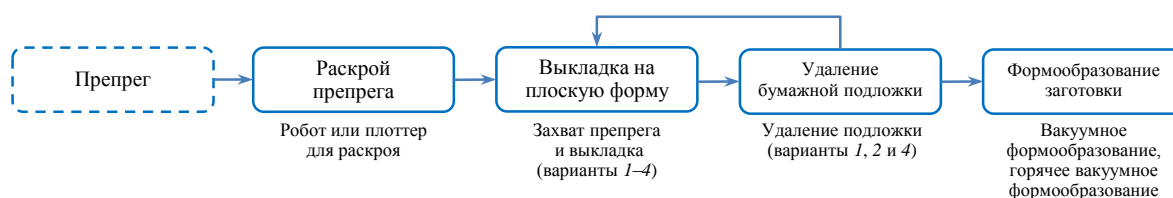


Рис. 1. Схема технологического процесса выкладки препрега

В варианте 1 жесткий концевой манипулятор состоит из небольшого количества деталей и имеет невысокую стоимость, однако при этом возможно лишь ограниченное количество слоев препрега, которые он может захватывать и выкладывать на плоскую оснастку. Если потребуются работа с другой конфигурацией препрега, то необходимо полностью менять конструкцию.

В варианте 2 концевой манипулятор имеет выдвижные зоны захвата, что позволяет обрабатывать большее количество различных по форме слоев препрега. Однако манипулятор имеет больше деталей, а также подвижные компоненты, что делает его более сложным и дорогостоящим, чем в варианте 1. К тому же он должен быть перестроен, чтобы обрабатывать больше слоев.

В варианте 3 реконфигурируемый концевой манипулятор имеет множество подвижных частей и программируемых логических контроллеров, которые управляют захватом различных по конфигурации препрегов. Это увеличивает в определенных пределах возможность обработки разных форм препрега путем перепрограммирования. Однако вместе со сложностью конструкции увеличивается и сложность перепрограммирования.

В варианте 4 применяются очень простые концевые манипуляторы, которые сами по себе имеют очень низкую реконфигурируемость. Однако при использовании робота с двумя руками такое решение имеет преимущества – добавленные степени свободы.

Рассмотрим все четыре варианта решения более подробно [18–25].

Эти решения по автоматизации помогают преодолеть следующие проблемы и трудности:

- непростые свойства препрега. Однонаправленный препрег – анизотропный и имеет низкую структурную жесткость, а липкость препрега является серьезной проблемой;
- требования по качеству выкладки, особенно для систем, предназначенных для аэрокосмической промышленности. Существуют требования по осуществлению процесса выкладки без загрязнения препрега и точности позиционирования укладываемых слоев, а также требования к зазорам и нахлестам, углам волокон, складкам и другим деформациям;
- работа со слоями различных форм и размеров.
- малые и средние объемы производства.

Подобные требования к качеству плоских заготовок из препрега могут незначительно различаться – в зависимости от области применения и потребителя конечного продукта. Тем не менее четыре решения для автоматизированной выкладки препрегов разработаны с учетом следующих требований. Нахлест между соседними слоями не допускается, а максимальный зазор между слоями составляет ~2,5 мм. Допуски на отклонение угла волокна обычно ± 3 градуса на коротких расстояниях и ± 2 градуса – на расстояниях > 300 мм. Неровные морщины не допускаются, но допускается некоторая волнистость толщиной < 1 слоя. В процессе производства непозволительно попадание посторонних предметов в заготовку или загрязнение материала препрега – например, в заготовке нельзя оставлять кусочки бумажной основы.

Процесс удаления бумажной подложки

Четыре представленных решения предназначены для работы с однонаправленным препрегом аэрокосмического назначения, содержащим углеродные волокна, которые пропитаны эпоксидной смолой и, с одной стороны, защищены жесткой бумажной подложкой, а с другой – не защищены (без подложки). Низкая жесткость однонаправленного препрега, а также его липкость являются особыми проблемами, которые необходимо решить при разработке устройств для автоматизированного процесса выкладки препрега. Сохранение бумажной подложки во время манипуляций повышает жесткость обрабатываемого материала, а также защищает препрег от загрязнения. Поднятие препрега с прикрепленной защитной бумажной подложкой также устраняет контакт с препрегом, обеспечивая отсутствие прилипания к захватам. Однако сохранение бумажной подложки требует использования автоматической системы ее удаления. В приведенных далее случаях бумажную подложку удаляют способом, состоящим из следующих этапов:

- этап 1: отрезанный слой препрега берется с бумажной подложкой;
- этап 2: препрег отделяется от бумажной подложки при сгибании одного угла слоя с помощью внешнего оборудования;
- этап 3: слой препрега перемещается на форму или ранее выложенный препрег и закрепляется так, чтобы он прилипал к поверхности формы или ранее уложенным слоям;
- этап 4: бумажная подложка поднимается за угол, где бумага и препрег разделены на этапе 2. Вакуумный стакан поднимает бумагу, и механический зажим фиксирует ее на месте;
- этап 5: бумажная подложка удаляется отслаивающими движениями.

Второй этап влияет на возможную конструкцию концевых манипуляторов (захватов), используемых для работы со слоями препрега, поскольку для этого требуется доступ к углу каждого слоя. В вариантах 1 и 2 оборудование для захвата бумажной основы интегрировано в концевой манипулятор, используемый во время захвата и транспортировки препрега (рис. 2, а), в то время как в варианте 4 оборудование спроектировано как отдельный концевой манипулятор (рис. 2, б).

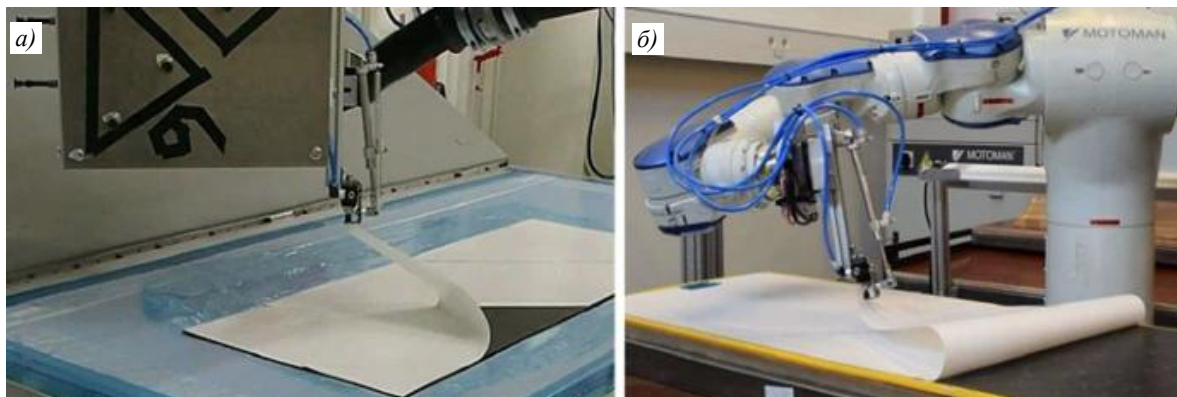


Рис. 2. Концевой захват на манипуляторах с жесткими зонами

Вариант 1

Концевой манипулятор в данном варианте разработан для работы с 27 различными слоями, где наименьший слой приблизительно имеет размер 155×300 мм, а самый большой слой – размер 250×430 мм. На рис. 3 показано, как

формы различных слоев соотносятся друг с другом, если они расположены друг над другом, и представлены все формы слоев, с которыми должен работать концевой манипулятор. Разные цвета контуров слоев показывают разную ориентацию волокон (45, 90 и 135 градусов), а фиолетовые кольца – распределение 14 вакуумных присосок.

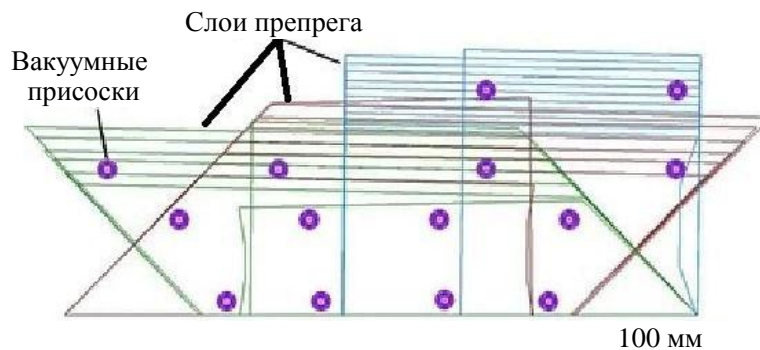


Рис. 3. Формы выкладываемых слоев и 14 вакуумных присосок

Вакуумные присоски разделены на девять зон и ими можно управлять индивидуально. Для того чтобы поднять один слой, включается несколько зон. Распределение вакуумных чашек и разделение на зоны являются компромиссом между минимальным количеством чашек для снижения сложности концевой манипулятора и необходимостью обеспечить достаточно надежный захват и стабильность захвата препрега во время работы.

Все вакуумные присоски установлены на одинаковой высоте и прикреплены к жесткому кронштейну, что обеспечивает очень низкий уровень податливости и отсутствие возможности изменять их положение во время работы. Концевой манипулятор оснащен также дополнительной вакуумной присоской и механическим зажимом, которые прикреплены с одной из сторон (рис. 4). Дополнительный захват используется для удаления бумажной подложки. Общая масса концевой манипулятора составляет 7,3 кг.

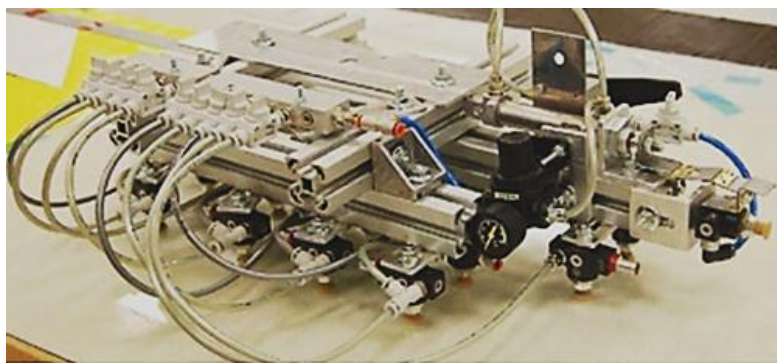


Рис. 4. Концевой манипулятор с механическим зажимом для захвата бумажной подложки

Вариант 2

В данном варианте робот для выкладки препрега (с углами волокон 0, 45, 90 и 135 градусов) также используется для предшествующего раскрытия его слоев. Концевой манипулятор и робот, необходимые для захвата и перемещения препрега, показаны на рис. 5.



Рис. 5. Концевой манипулятор и робот для выкладки препрега

Слои имеют размер от 150×80 до 700×300 мм, а захват разработан для обработки 11 различных слоев с углами волокон 45 и 135 градусов. Вакуумные чашки расположены в шести выдвижных зонах и их можно использовать по отдельности или в комбинации для адаптации к текущей форме, чтобы вакуумные чашки не соприкасались с соседним материалом во время захвата и выкладки. Всего на концевом манипуляторе собрано 35 вакуумных чашек, установленных на пружинных выравнивателях. Концевой манипулятор имеет V-образную форму с углом 90 градусов между двумя поверхностями с вакуумными чашками для уменьшения сложности зоны и в связи с необходимостью замены инструмента. Концевой манипулятор состоит из ролика для уплотнения слоев препрега после их размещения и захвата, который используется для удаления бумажной подложки. Масса концевого эффектора составляет ~40 кг.

Вариант 3

Решения, представленные в вариантах 3 и 4, разработаны для обработки одних и тех же слоев, но для этого используются две разные конструкции концевых манипуляторов. В обоих случаях концевые манипуляторы предназначены для работы с 12 различными слоями, охватывающими четыре основных направления волокон: 0, 45, 90 и 135 градусов. Наименьший слой приблизительно имеет размер 300×500 мм, а самый большой слой – размер 400×1100 мм.

В варианте 3 разработан реконфигурируемый концевой манипулятор (рис. 6) с тремя рядами присосок, в каждом из которых располагаются по три вакуумные присоски. Один из рядов имеет фиксированное положение, другой ряд можно убрать, если он не используется, а третий ряд можно перемещать линейно и наклонять под желаемым углом. Ширину подвижного ряда возможно изменить, увеличив расстояние между двумя внешними присосками в ряду. Все девять вакуумных чашек установлены на пружинных выравнивателях.

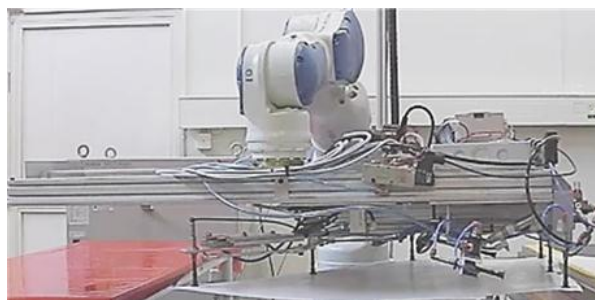


Рис. 6. Реконфигурируемый концевой манипулятор

Концевой манипулятор включает ПЛК (PLC – контроллер с программируемой логикой) и сервоконтроллеры, которые управляют положением подвижных рядов вакуумных чашек, а также включают и выключают их. Масса концевой манипулятора составляет ~13 кг. На рис. 7 представлены виды слоев, которые можно обрабатывать, используя различные положения на концевом эффекторе.

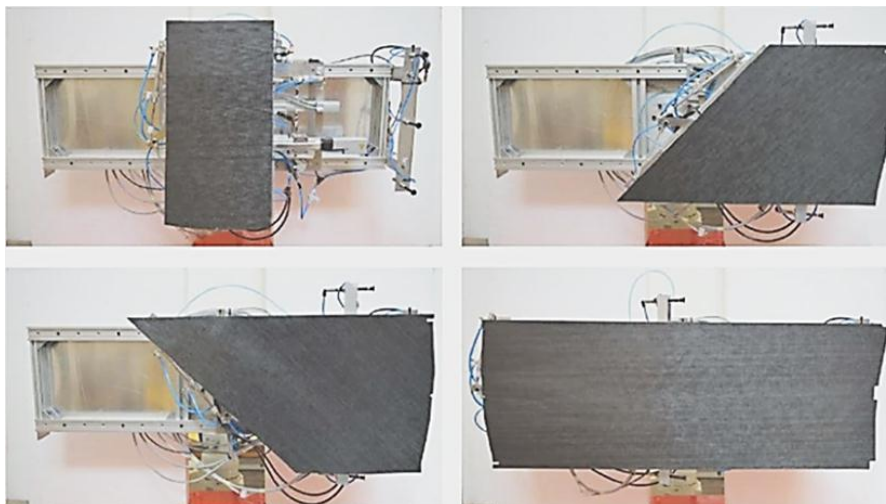


Рис. 7. Виды слоев на реконфигурируемом концевом манипуляторе

Вариант 4

В данном варианте использовали двурукий робот Motoman SDA10 компании Yaskawa Electric (Япония) для обработки тех же слоев препрега, которые описаны в варианте 3 [25]. В производственной ячейке двурукий робот применяется как для выкладки препрега, так и для последовательного формирования Ω -образной балки. Для работы с препрегом два манипулятора оснащены концевыми захватами одного типа с вакуумными чашками для удержания слоев препрега (рис. 8). Они также включают ролики для уплотнения. Три вакуумные чашки установлены на пружинных выравнителях и их положение на концевом манипуляторе является фиксированным. Возможная полезная нагрузка робота составляет 10 кг на одну руку, а масса каждого концевой манипулятора составляет ~3 кг.

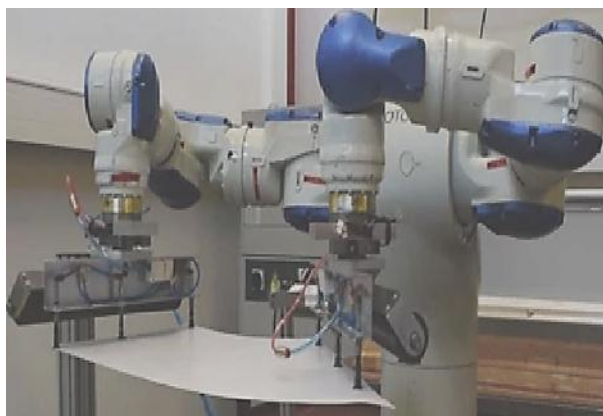


Рис. 8. Концевые манипуляторы двурукого робота Motoman SDA10

Решение предназначено для захвата слоев за внешние края, а переключение между различными геометрическими формами слоев осуществляется путем изменения

относительного положения и позы между двумя роботизированными руками с использованием стандартного программирования роботов. Большинство движений робота являются скоординированными (одна рука следует за другой), однако для последовательной выкладки и для некоторых операций подъема руки перемещаются отдельно. Для удаления бумажной подложки на одном из рычагов устанавливается захват, использующий ту же конструкцию с вакуумным колпачком и механическим зажимом, что и в предыдущих случаях.

Особенности рассмотренных вариантов

В четырех рассмотренных вариантах используются разные подходы к решению проблемы двумерной реконфигурируемости. В варианте 1 в конечном манипуляторе во время работы невозможно изменить положение вакуумных колпачков. Переключение между слоями различной формы осуществляется путем включения и выключения вакуумных колпачков. В варианте 2 вакуумные чашки, не соответствующие текущему слою, выключаются и убираются, что позволяет захватывать слой, не касаясь соседнего материала, и в то же время упрощает доступ к одному углу слоя, чтобы отделить бумажную подложку от препрега с помощью внешнего оборудования. В вариантах 3 и 4 точки захвата перемещаются таким образом, чтобы соответствовать геометрической форме слоя. В варианте 3 также можно убрать ряд вакуумных чашек во избежание контакта с соседним материалом. Это является преимуществом, поскольку контакт с соседним материалом во время захвата слоя создает риск влияния на положение соседнего материала и, соответственно, риск позиционных ошибок данного материала после его выкладки.

Для расширения возможностей четырех концевых манипуляторов обрабатывать больше форм слоев требуются различные уровни доработки. Добавление новых форм слоев, которые не соответствуют существующим зонам вакуумных чашек, в вариантах 1 и 2 потребует переделки концевой манипулятора. Учитывая функцию втягивания в варианте 2, данный концевой манипулятор будет сложнее перестроить, чем в варианте 1. В варианте 3 концевой манипулятор можно запрограммировать так, чтобы он позволял использовать новые слои, однако способность работать с другой геометрической формой слоев ограничена, так как манипулятор может перемещать только один ряд присосок в линейном направлении и изменять ширину только одного ряда. Добавление слоев с геометрическими формами или размерами, далекими от тех, для которых концевой манипулятор первоначально разработан, потребует существенной его переделки. В варианте 3 расширение возможностей концевой манипулятора по управлению большим количеством слоев разной геометрической формы приведет к более сложной его конструкции. Наиболее универсальным решением с точки зрения возможности двумерной реконфигурируемости является система с двумя рычагами, где используются простые концевые манипуляторы, относительное положение которых перепрограммировано для захвата разных слоев.

Ни одно из четырех решений не было специально разработано для трехмерной компоновки. Однако осуществление независимого перемещения двух манипуляторов робота в варианте 4 позволяет адаптировать решение к различным трехмерным геометрическим формам и делает возможной последовательную выкладку (рис. 9).

Последовательная выкладка, когда одна сторона выкладывается раньше другой, снижает риск захвата воздуха между двумя слоями препрега, особенно при работе с длинными слоями.

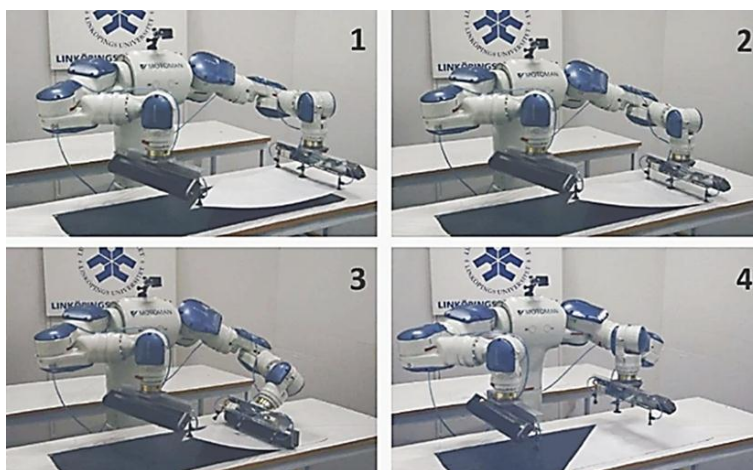


Рис. 9. Последовательность выкладки с помощью концевых манипуляторов

Последовательное движение также можно использовать при захвате материала. Во время испытаний концевой манипулятора в варианте 2 трудно удалить слой препрега после резки, потому что его липкая поверхность образует прочную связь с поверхностью стола для резки. Такое же явление замечено в ячейке, использованной для вариантов 3 и 4, где препрег удерживается на месте на вакуумном столе во время удаления бумажной основы. Препрег прилипает к поверхности вакуумного стола и его трудно удалить. Подъем слоев препрега, которые прикреплены к поверхности вертикально, является ненадежным подходом. В варианте 2 концевой манипулятор перемещался прямо вверх (перпендикулярно) от режущей поверхности с низкой скоростью и с короткими паузами между движениями, чтобы слой препрега постепенно отделялся от поверхности. Это оказалось ненадежным подходом, так как он требует одновременного преодоления адгезии по всей поверхности слоя. Некоторые слои препрега (в основном большие) не отделялись от поверхности. Альтернативный подход протестирован с использованием робота с двумя руками, одна из которых поднимает один конец препрега отрывным движением, преодолевая адгезию между препрегом и вакуумным столом. Показано, что данный подход к удалению прилипшего к поверхности препрега является более эффективным.

В четырех вариантах используются два разных подхода к распределению точек захвата. В вариантах 1 и 2 вакуумные чашки распределяются по поверхности обрабатываемого слоя. Бóльшее количество вакуумных чашек обеспечивает более высокую общую подъемную силу для концевой манипуляции. Однако в вариантах 1 и 2 подъемной силы иногда недостаточно для удаления слоев препрега, прилипших по всей поверхности. Причина этого заключается в том, что вакуум, используемый для удержания слоя во время резки, также создает прочную связь между липким слоем и режущей поверхностью, и чем дольше остается слой перед захватом, тем прочнее соединение. В том случае, если концевой манипулятор не может захватывать препрег, который прилипает по всей поверхности, одним из решений является изменение свойств поверхности, используемой во время резки или выкладки, или применение какой-либо функции отсоединения – например, продувки сжатым воздухом. Однако это может нарушить положение слоя. Другое решение – прикрыть сторону, обращенную вниз, во время резки пленкой, но для этого потребуется еще один автоматизированный процесс удаления. Большое количество вакуумных чашек и их распределение по всей поверхности слоя обеспечивают его хорошую поддержку и фиксацию. В результате концевые манипуляторы вариантов 1 и 2 представляют собой интересные решения для работы с другими типами материалов, такими как препреги на основе ткани, и подложкой такого типа, как пленка, с меньшей жесткостью, чем препрег в сочетании с бумажной подложкой. В вариантах 3 и 4 используется меньше вакуумных чашек, а точки захвата распределены только по двум

краям слоя. Меньшее количество точек захвата позволяет создавать более простые концевые эффекторы с меньшим количеством деталей и меньшей массой. Данные решения обеспечивают меньшую подъемную силу, однако испытания показали, что захвата для работы со слоями достаточно в том случае, если они не прилипли к поверхности препрега. Решение в варианте 4 можно использовать для подъема слоев препрега, которые прилипли к его поверхности, потому что робот с двумя руками может выполнять отрывное движение, в результате которого постепенно (по частям) преодолевается адгезионная связь между препрегом и поверхностью.

Концевые манипуляторы в вариантах 3 и 4, где используется только несколько точек захвата на внешних краях, демонстрируют важность адаптации положения вакуумных колпачков не только к геометрической форме слоя, но и к направлению волокон. Однонаправленный препрег – жесткий в направлении волокон, однако легко складывается в направлении, перпендикулярном волокнам. Даже несмотря на то, что бумажная подложка делает слой более жестким, угол может легко загнуться за пределами внешней точки захвата (рис. 10), что создает риск сгиба угла препрега во время выкладки.

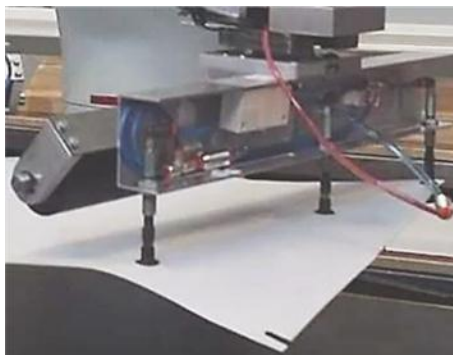


Рис. 10. Прогиб угла препрега

При использовании двойного захвата за края слой препрега слегка провисает между двумя концевыми манипуляторами (рис. 11), что особенно очевидно для длинных слоев. Во избежание провисания, вызывающего проблемы во время выкладки, можно использовать метод последовательной выкладки, который предотвратит прилипание середины слоя к поверхности выкладки перед внешним краем, что может привести к образованию пузырей или морщин.



Рис. 11. Прогиб препрега при захвате его длинного слоя

Решение с использованием двух рук является универсальной системой, однако при его тестировании отмечены некоторые проблемы. Рабочий диапазон системы ограничен необходимостью скоординированных движений, при которых сохраняется относительное положение концевых манипуляторов. Самые большие слои иногда трудно разместить из-за проблем с доступностью. В варианте 2 громоздкий концевой манипулятор ограничивает досягаемость и доступность к препрегу и оснастке. Метод, используемый для отслаивания бумажной подложки с какой-либо одной стороны, требует большей рабочей зоны передвижения захвата робота, так как при захвате за угол слоя манипулятор должен выполнить отрывное движение через весь слой и далеко

за его пределы. Это особенно заметно для длинных слоев. Вместо применения робота с двумя руками (как в варианте 4) можно использовать два робота с одной рукой каждый, работающих вместе для реализации большего рабочего диапазона и, соответственно, обработки больших слоев.

Заключения

В качестве альтернативы технологиям ATL и AFP предлагаются различные решения для переноса слоев препрега с плоской поверхности и выкладки их на плоскую оснастку. Рассмотрены четыре варианта решения, где используются четыре различных типа концевых манипуляторов:

- концевой манипулятор с жесткими зонами;
- концевой манипулятор с выдвижными зонами;
- реконфигурируемый концевой манипулятор;
- концевые манипуляторы для работы робота с двумя руками.

При этом существует два разных подхода к распределению точек захвата и захвату кромок. Решения, в которых точки захвата распределены по поверхности, обеспечивают хорошую поддержку и фиксацию во время работы. Однако меньшее количество точек захвата на внешних краях слоев позволяет создавать более простые конструкции концевых эффекторов с меньшим количеством компонентов и меньшей массой. Поскольку данные решения обеспечивают меньшую поддержку и фиксацию, положение точек захвата должно быть тщательно адаптировано к геометрической форме слоев, а также к углам волокон, кроме того, длинные слои могут провисать между точками захвата. Захваты по краям также упрощают конструкцию систем, которые могут адаптироваться к новым формам слоев, так как необходимо переставлять меньшее количество точек захвата.

Решения, в которых возможность реконфигурирования встроена в концевой манипулятор, как и в случае концевых эффекторов с выдвижными зонами и реконфигурируемого концевых манипуляторов, увеличивают сложность и стоимость концевых манипуляторов. В решении с использованием двух рук концевые манипуляторы просты, имеют невысокую стоимость и низкую реконфигурируемость. Вместо этого реконфигурируемость данного решения достигается за счет использования двух манипуляторов, т.е. робота с двумя руками. Такой подход обеспечивает простую конструкцию концевых манипуляторов, однако требует более сложного решения для управления ими. Дополнительные степени свободы в решении с двумя манипуляторами также обеспечивают возможность управления движением захвата и выкладки, делая допустимыми движения отслаивания, что упрощает захват препрега, прилипшего к поверхности резки или выкладки.

Дальнейшее развитие данного направления автоматизации потребует и более тщательного подхода к используемому материалу: должны быть определены оптимальная липкость препрега, степень силиконизации бумажной подложки, температурные режимы переработки при выкладке и другие вопросы, касающиеся технологических особенностей, точности и воспроизводимости процесса.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. №4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. №3. С. 97–105.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

5. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Панина Н.Н. Свойства угле- и стеклопластиков на основе плетеных преформ // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4 (45). С. 54–59. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-54-59.
6. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. №4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
7. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // *Труды ВИАМ*. 2015. №3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
8. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
9. Paton R. Forming technology for thermoset composites // *Composites forming technologies* / ed. A.C. Long. Cambridge: Woodhead Publishing, 2007. 328 p.
10. Lukaszewicz D.H.-J.A., Ward C., Potter K.D. The engineering aspects of automated prepreg layup: history, present and future // *Composites Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43 (3). P. 997–1009.
11. Björnsson A., Jonsson M., Eklund D., Lindbäck J.E., Björkman M. Getting to grips with automated prepreg handling // *Production Engineering*. 2017. Vol. 11 (3). P. 1–9.
12. McIlhagger A., Archer E., McIlhagger R. Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications // *Polymer composites in the aerospace industry* / ed. E.P. Irving, C. Soutis. Cambridge: Elsevier Science, 2014. 688 p.
13. Sloan J. ATL and AFP: signs of evolution in machine process control // *The International Journal of High Performance Computing Applications*. 2008. Vol. 16 (5). P. 1–47.
14. Newell G., Khodabandehloo K. Modelling flexible sheets for automatic handling and lay-up of composite components // *The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B*. 1995. Vol. 209 (6). P. 423–432.
15. Buckingham R.O., Newell G.C. Automating the manufacture of composite broadgoods // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996. Vol. 27 (3). P. 191–200.
16. Szczesny M., Heieck F., Middendorf P., Mezzacasa R., Irastorza X., Sehrschön H., Schneiderbauer M. The advanced ply placement process – an innovative direct 3D placement technology for plies and tapes // *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*. 2017. Vol. 3. P. 2–9.
17. Composites World: Automating the CH-53K's composite flexbeams. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/automating-the-ch-53ks-composite-flexbeams> (дата обращения: 05.11.2020).
18. Curran J.P., Wright E.J., Armstrong P.J. An intelligent vacuum gripper for robotic handling // *Advances in manufacturing technology II*. Springer, 1987. P. 205–209.
19. Campbell F.C. Manufacturing processes for advanced composites. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004. 532 p.
20. Strong A.B. Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications. 2nd ed. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2008. 640 p.
21. Newell G.C., Buckingham R.O., Khodabandehloo K. The automated manufacture of prepreg broadgoods components – a review of literature // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996. Vol. 27 (3). P. 211–217.
22. Potter K. But how can we make something useful out of black string? The development of carbon fibre composites manufacturing (1965–2015) // *The structural integrity of carbon fiber composites: 50 years of progress and achievement of the science, development, and applications*. Springer, 2017. 969 p.
23. Björnsson A., Lindbäck J.E., Johansen K. Automated removal of prepreg backing paper-a sticky problem // *SAE 2013 AeroTech Congress and Exhibition*. 2013. P. 1–9.
24. Björnsson A., Lindbäck J.E., Eklund D., Jonsson M. Low-cost automation for prepreg handling-two cases from the aerospace industry // *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*. 2016. Vol. 9. Is. 1. P. 68–74.
25. Björnsson A., Jonsson M., Lindbäck J.E., Akermo M., Johansen K. Robot-forming of prepreg stacks – development of equipment and methods // *ECCM 2016 – Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials*. 2016. P. 78–85.