

УДК 678.8

*П.Н. Тимошков¹, В.А. Гончаров¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹***РАЗВИТИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ:
ОТ ИСТОКОВ ДО НАШИХ ДНЕЙ (обзор)****Часть 2. Автоматизированная выкладка волокон (AFP)***

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-117-127

Автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP) – одна из основных технологий, в настоящее время используемая для производства современных композиционных материалов из узких жгутов препрега шириной 3,2; 6,35 и 12,7 мм, которые обычно укладывают в одной последовательности с помощью специальной головки. Метод AFP позволяет выкладывать детали сложной геометрической формы. Во второй части статьи рассмотрено развитие технологии AFP – от возникновения метода до настоящего времени, дано описание процесса выкладки, а также современного оборудования, представленного на рынке.

Ключевые слова: автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP), полимерные композиционные материалы (ПКМ), оборудование, препрег, аддитивные технологии.

*P.N. Timoshkov¹, V.A. Goncharov¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrulkov¹***THE DEVELOPMENT OF AUTOMATED LAYING:
FROM THE BEGINNING TO OUR DAYS (review)****Part 2. Automated Fiber Placement (AFP)**

Automated Fiber Placement is one of the main technologies used today for manufacturing of modern composite materials from narrow bundles of 3.2; 6.35 and 12.7 mm wide, which are usually stacked in one sequence using a special head. AFP allows you to lay out parts with complex geometry. The second part considers the development of technology from its origination to the present day and provides the description of the laying process and modern equipment on the market.

Keywords: automated fiber placement (AFP), polymer composite materials (PCM), equipment, prepreg, additive technology.

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

Автоматизация производства имеет решающее значение для повышения производительности, снижения затрат, сокращения отходов и увеличения повторяемости. Автоматизация в аэрокосмической промышленности внедряется крупными производителями оригинального оборудования, чтобы удовлетворить растущие потребности использования машин для автоматической выкладки [1–5].

Автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP) похожа на автоматизированную выкладку лент (automated tape laying – ATL), но в технологии AFP используется узкая полоска препрега, которая проходит через основание головки установки [6].

* Часть 1 – см. «Авиационные материалы и технологии», № 2 (63), 2021.

Система AFP автоматически размещает несколько отдельных предварительно пропитанных жгутов на форме с высокой скоростью, используя головку с числовым программным управлением (ЧПУ) для распределения, зажима, обрезки и перезапуска каждого жгута во время его размещения на форме. Минимальная длина реза (самая меньшая длина, которую может укладывать машина) является важным фактором, определяющим форму слоя. Головка для выкладки волокна может быть прикреплена к существующей системе, дооснащена машиной для намотки волокон или поставляется как индивидуальная система [7].

Описание технологии AFP

Системы AFP отличаются от систем ATL шириной укладываемого материала (типичная ширина материала для систем AFP 3,2; 6,35 и 12,7 мм), однако по технологии AFP обычно укладывают несколько жгутов в одной последовательности, называемых полосами. Затем лента движется по определенной последовательной траектории, образуя слой. В настоящее время установка AFP может выполнять до 32 параллельных выкладок (при необходимости 8, 16, 24, 32) с линейной скоростью до 1 м/с (рис. 1) [8]. Система также имеет более высокое ускорение по линейным осям с типичными значениями ~ 2 м/с². Скорости вращения и ускорения зависят от компании-производителя машины, и поэтому не указываются. Однако следует отметить, что скорости вращения и ускорения могут иметь большое влияние на производительность выкладки сложных деталей и, следовательно, более актуальны для системы AFP, чем для системы ATL. Ширина и количество выложенных жгутов в значительной степени зависят от сложности и локальной геометрической формы участка, на который будет укладываться материал, поэтому его ширина и количество жгутов влияют на производительность.

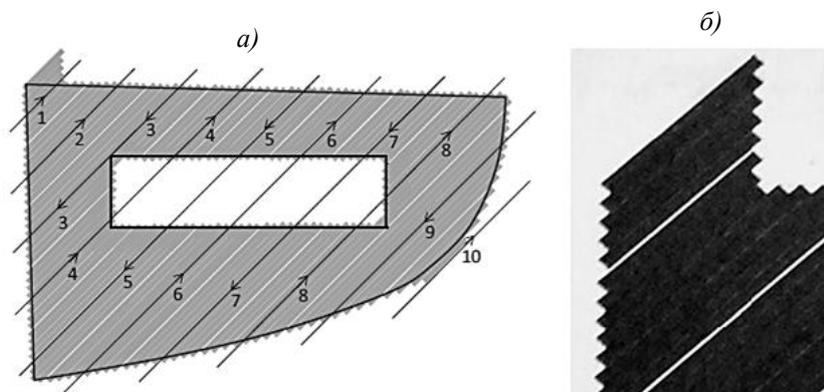


Рис. 1. Пример последовательности выкладки по технологии AFP (а) и типичные схемы резки с минимальной длиной укладки (б) [9]

В системе AFP несколько жгутов подаются из шпуляриков, расположенных на головке установки или рядом с ней. Количество жгутов зависит от требований к ширине детали и может составлять от 1, 2, 8, 16, 24 до одновременно размещенных 32 шт.

Каждый жгут обычно приводится в движение индивидуально и может быть зажат, разрезан или перезапущен во время производства [8, 10]. Это дает возможность доставлять каждую ленточку с индивидуальной скоростью, позволяя укладывать плотно сложной геометрической формы, когда важным является управление процессом (например, в таких конструкциях, как секции фюзеляжа с прорезями для окон

или обшивки крыльев). Хотя изначально управление процессом было задумано для улучшения выкладки на поверхностях двойной кривизны [11], индивидуальное управление может повысить производительность и снизить уровень потерь материалов [12]. Важным моментом является величина зазора между ленточками, которая намного больше, чем для ATL-технологии, и обычно зависит от управления процессом. Это может отрицательно сказаться на механических характеристиках и часто компенсируется поперечным смещением последующих слоев на половину ширины жгута.

Процесс AFP можно разделить на четыре важных этапа [13]:

- подача образца материала и планирование траектории размещения;
- нагрев материала;
- приложение давления;
- уплотнение материала на поверхности формы.

Производительность процесса AFP меньше, чем у технологии ATL, поскольку технология ATL обычно используется для выкладки более сложных деталей. Например, производительность сборки сложной секции фюзеляжа составляет 8,6 кг/ч, что приблизительно вдвое меньше нынешних показателей процесса ATL. Во время выкладки по технологии AFP натяжение жгутов на головке установки пренебрежимо мало или контролируется на очень низком уровне, чтобы обеспечить выкладку на выпуклые формы и элементы. Композиционный материал для выкладки по AFP-технологии может быть в виде пропитанного жгута или ленты из препрега. Ленты дороже пропитанных жгутов, но потенциально имеют преимущества по производительности, надежности и качеству продукции. Лента с прорезями или пропитанные жгуты обычно наматывают на картонные бобины и поставляют с промежуточной пленкой для уменьшения липкости и трения при подаче материала. Небольшой диаметр бобины может дополнительно обеспечить точный контроль натяжения во время разматывания [6].

В настоящее время доступны четыре различных конфигурации машины для AFP-технологии [14]:

1. Конфигурация намоточной платформы. Это исходная конфигурация машины, которая пользуется наибольшим спросом в настоящее время и идеальна для изготовления изделий в виде тел вращения без резкого изменения размера сечения.

2. Конфигурация с подвижной стойкой. Эта конфигурация машины стала популярной в последние годы, имеет обычно очень большой размер, что делает эту машину идеальной для изготовления крупных деталей с постепенным изменением кривизны, таких как обшивка крыльев.

3. Конфигурация высокой рамы с рельсами, в которой используется та же конфигурация, что и в машинах для ATL-технологии с головкой для процесса AFP, прикрепленной к оси Z машины, а шпулярник для материала устанавливается либо на раме, либо на самой головке установки (рис. 2, а, в).

4. Конфигурация роботизированного устройства, в котором используется коммерчески доступная шарнирная роботизированная рука в качестве системы выкладки волокон. Этот тип системы AFP часто включает шпиндель инструмента с вращательным и/или линейным приводом. Большое количество степеней свободы таких систем позволяет производить самые разнообразные детали, но это происходит за счет реализации очень высоких требований к системе обратной связи и управления. Этот тип системы быстро внедряется в промышленность благодаря ее гибкости и постоянно снижающейся цене, а также повышающейся надежности промышленной робототехники (рис. 2, б, г).

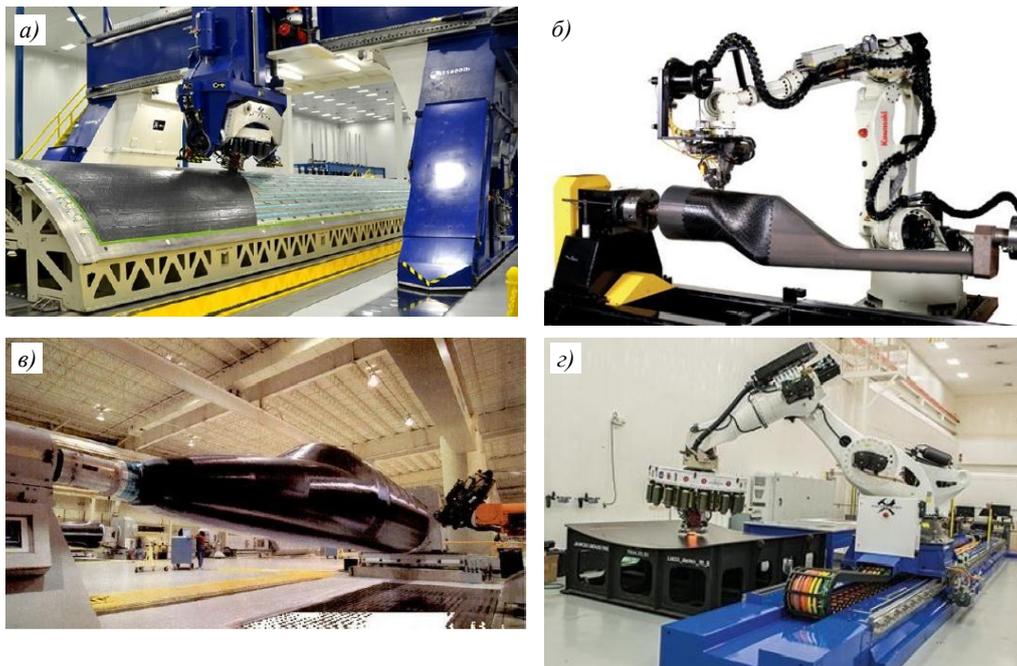


Рис. 2. Типы систем для технологии AFP: *а* – вертикальная с рамой [15]; *б* – роботизированная рука со съемной головкой [16]; *в* – горизонтальная с рамой [17]; *г* – роботизированная рука со съемной головкой на рельсах [18]

Метод AFP используется для изготовления изделий гораздо более сложной геометрической формы, что связано с укладыванием узких жгутов, которые можно направлять по резко изогнутым поверхностям, тогда как более широкие ленты невозможно размещать таким образом без изгиба некоторых волокон. При использовании установки с вращающимся инструментом или оправкой технология AFP больше напоминает намотку нитей, хотя использование жгутов, как правило, делает этот процесс более быстрым. В AFP-технологии некоторое количество жгутов препрега или лент с узкими прорезями подают в укладочные головки, которые выкладывают их для формирования непрерывного слоя препрега. Головка установки AFP может быть помещена на многоосный шарнирный рычаг, который перемещается вокруг формы, или может переноситься на раме. Жгуты могут быть уложены в любых заранее запрограммированных ориентациях и положениях, так что полимерный композиционный материал (ПКМ) может быть адаптирован для обеспечения параметров прочности и жесткости, требующихся проектировщикам в различных частях конструкции, при этом волокна выравниваются с учетом воздействия адгезионных сил. Материал выкладывается без натяжения и складок с точно определенным давлением. Головки установки могут выполнять все необходимые операции по резке и повторному запуску, а также уплотнение с помощью уплотнительных роликов. Контроль в установке AFP имеет много общего с компьютерным ЧПУ. Выполнение нескольких синхронных функций на высокой скорости требует точного программирования станка, чтобы гарантировать координацию резки, укладки и управления высокодинамичным реверсивным движением [19].

Первоначальные разработки технологии AFP

В патенте [11] описывается система ATL, где подчеркивается проблема выкладки ленты на изогнутую поверхность, для решения которой создана система AFP (рис. 3), в которой укладочная головка имела возможность разрезать широкую ленту на кусочки шириной 3,2 мм, а затем выкладывать их с индивидуальной скоростью,

удерживая подающийся материал на головке. В действительности это привело бы к техническим ограничениям материала, времени простоя, и не ясно, были ли решены эти проблемы, но дальнейшее развитие этого процесса проследить не удалось.

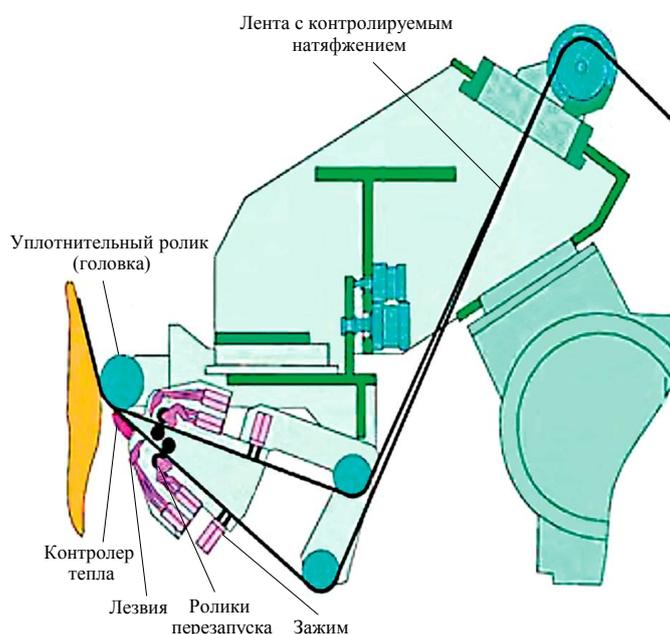


Рис. 3. Схематическое изображение машины для технологии AFP [20]

Развитие технологии AFP в 1990-х гг.

Системы AFP были коммерчески внедрены в конце 1980-х гг. и описаны в виде логической комбинации установки ATL и намотки волокон [21]. Некоторые разработки, примененные для технологии ATL, такие как конструкция роликов и направляющие устройства для подачи материала, включили в системы AFP, и они сразу стали доступны для коммерческой поставки.

В работе [22] преодолены ограничения, установленные в патенте [11], – сохранена лента с разрезами на отдельных бобиных, которые также приводились в действие индивидуально. Далее в работе [23] продемонстрирован другой тип машины AFP вместе с системой автономного программирования, которое необходимо для повышения производительности установки AFP, поскольку эта система напрямую влияет на продолжительность процесса производства. Система машины AFP контролировала скорость выкладки, давление, температуру и натяжение ленты. Показано также, что при скорости выкладки 7 м/мин производительность составляет 5 кг/ч, что сопоставимо с аналогичной характеристикой для установки ATL.

В работе [24] продемонстрирована система AFP, в которой использованы охлаждаемые шпулярники для уменьшения липкости препрега [25], что обеспечивало беспрепятственное удаление шпудей и повышенную надежность выкладки. Кроме того, оценена прочность на сжатие после удара пластиков, произведенных по технологии AFP и ручным формованием, и показано, что механические свойства этих пластиков сопоставимы.

Технические вопросы, которые оставались к тому времени нерешенными, – это величина натяжения жгутов, а также надежность, производительность и точность выкладки. Обычно жгуты доставлялись к головке по очень сложному пути, что могло увеличить их натяжение и повлиять на надежность выкладки. Точность выкладки очень

важна для технологии AFP, поскольку применение узкой полосы жгутов может привести к образованию зазоров между материалом, что повлияет на механические характеристики полученного пластика. Однако этот вопрос тогда не был изучен подробно, хотя более поздние исследования показали значительное влияние точности выкладки на механические характеристики [26–28].

Для повышения производительности разработали систему AFP [29], которая может выполнять до 24 движений за один прием, далее [30] повысили надежность, например, заменив материал и ширину волокон. Более надежная выкладка изделий со сложной геометрической формой достигается за счет выкладки волокон по криволинейной траектории. Вскоре стало понятно, что возможность выкладывать материал с изогнутыми волокнами дает дополнительную свободу при проектировании и позволяет потенциально улучшить механические характеристики пластиков. Из-за меньшей ширины отдельных волокон, которые использовались для систем AFP, можно было добиться меньших радиусов поворота, чем для систем ATL.

Некоторые очень интересные результаты для промышленного применения показаны в работе [31], где сообщалось о процессе разработки детали сложной конструкции, которая изначально изготавливалась с помощью ручной выкладки, но ее производство с использованием систем AFP дало возможность снизить потери материала с 62 до 6 %, а производительность повысить на 450 % при выкладке одной полосы шириной 12,7 мм. Однако, чтобы улучшить выкладку материала, поверхностная плотность была увеличена в 2 раза, что привело к сокращению времени простоя и дальнейшему повышению производительности. Этот результат был подтвержден в работе [32], в которой сообщалось о снижении затрат на 43 % по сравнению с ручной выкладкой.

Хотя преимущества установок AFP для сложных укладок были успешно продемонстрированы, процесс все еще был недостаточно продуктивным, чтобы быстро компенсировать первоначальный капитальный взнос. Ограничениями теперь стали доступность, надежность процесса и производительность. Кроме того, разработка систем AFP в этот период совпала с появлением термопластичных композитов для применения в аэрокосмических конструкциях, и значительные исследовательские усилия были направлены на разработку систем AFP для выкладки термопластов. Это было вызвано необходимостью изготовления больших космических кораблей и подводных лодок, диаметр деталей для которых превышал диаметр большинства автоклавов, и требовалась термообработка на месте их изготовления для снижения термических остаточных напряжений [33]. Обсуждался также вопрос о том, что основным ограничивающим фактором для выкладки термопласта была продолжительность, необходимая для нагрева материала выше его точки плавления [34]. Таким образом, максимальная скорость выкладки была ограничена, при этом сообщалось о скоростях от 3,6 [35] до 5 м/мин [36], что приводило к значительно более низкой производительности выкладки, чем у терморактивных материалов.

Развитие технологии AFP с 2000-х гг. по настоящее время

На надежности технологического процесса отрицательно сказываются ошибки при сращивании концов жгутов на конце бобины, а также оборвавшиеся жгуты и замена материала, что приводит к незапланированным простоям и снижению производительности. В патенте [37] представлена автоматизированная система для соединения жгутов, что повышает производительность за счет сокращения времени простоя при заправке материала. В работе [38] также показана автоматизированная система для обнаружения ошибок выкладки, которая повышает производительность за счет сокращения времени на контроль качества после выкладки слоя. Для повышения уровня

липкости и дальнейшей минимизации ошибок выкладки введен инфракрасный нагрев терморезактивной ленты [39], чтобы обеспечить более быстрый нагрев и более высокие температуры выкладки. Кроме того, в патенте [40] представлена система для быстрой замены укладочных головок и инструментов с поддержанием второй укладочной головки, готовой к непосредственной выкладке, что привело к сокращению времени простоя системы. Выкладка материала также улучшена благодаря использованию систем, которые либо уменьшают длину подачи, либо сводят к минимуму количество перенаправлений и скручиваний с использованием соответствующих направляющих систем [41].

Несмотря на повышение производительности и надежности, некоторые технические проблемы остались: капитальные затраты были все еще высокими по сравнению с другими методами производства, а автономное программирование все еще не было оптимизировано, хотя выкладка изогнутых лент на форму и контроль выкладки по технологии AFP в настоящее время являются областью актуальных исследований [42]. Возможность автоматизированного производства несимметричных слоистых ПКМ, которые могут иметь локально изменяющуюся ориентацию волокон, делает метод AFP ведущей технологией для будущих разработок в области интеллектуальных и специализированных структур и их применения.

Наконец, метод AFP в настоящее время разработан для препрегов с малой поверхностной плотностью, что ограничивает его использование в аэрокосмической сфере. Поскольку препреги в отраслях возобновляемой энергетики и др., как правило, имеют более высокую поверхностную плотность – до 1600 г/м^2 и более, будущие системы AFP должны иметь возможность выкладывать эти материалы. Для решения этой проблемы требуются новые методы резки – возможно, будет применяться лазерная резка.

Оборудование для технологии AFP

Основными производителями систем AFP являются компании Automated Dynamics (США), Accudyne (США), MAGCincinnati (США), Coriolis Composites (Франция), ElectroImpact (США), Foster Miller (США), Ingersoll (США), Mikrosam (Северная Македония) и MTorres (Испания). Компании Automated Dynamics, Accudyne, Coriolis Composites и ElectroImpact поставляют свои системы для промышленных роботов. Компании Cincinnati, Foster Miller, Ingersoll, Mikrosam и MTorres используют рамы колонного или горизонтального типа. Для роботизированных систем выкладки обычно требуются меньшие начальные капитальные вложения, и они могут лучше адаптироваться для конкретных приложений. Такие системы выкладки обеспечивают повышенную общую производительность и надежность за счет обработки большего количества ленточек в головной части установки.

Компания Coriolis Composites производит машины для автоматизированной выкладки, которые легко адаптируются к выкладке деталей различной геометрической формы. Они позволяют производить сложные детали и подходят для промышленного применения, а также для исследовательских центров. Надежная конструкция отвечает требованиям серийного технического обслуживания, а высокий уровень производства обеспечивается высокими скоростями перемещения. Точность и однородность материала – основные критерии для авиационного рынка – гарантируются легкой маневренной головкой. Компания Coriolis Composites предлагает оборудование по доступной цене, которое сочетает качество, производительность и надежность. Машины поставляются с роботами Kuka Quantec или Comau последних поколений. Эти стандартные роботы обладают хорошей жесткостью и точностью в сочетании с высокой динамикой движения. Машина для размещения волокон состоит из размещающей головки, шейки и трубки для подачи волокон. Крепление обеспечивает все необходимые функции для

разматывания бобин на высокой скорости с низким натяжением и быстрые эргономичные загрузку и разгрузку бобин. Гибкие трубки индивидуально подают каждое волокно на форму, избегая при этом всех рисков скручивания или повреждения волокна при сохранении низкого напряжения [43].

Компания MAGCincinnati предлагает отдельное устройство Viper FPS для размещения волокон. Последняя модель Viper 6000 способна обрабатывать детали массой до ~86 тыс. кг. В этой модели предлагается независимое управление подачей, зажимом, обрезкой и запуском до 32 отдельных жгутов или разрезанной ленты. Это позволяет автоматически регулировать ширину полосы волокна, контролировать расположение волокон вокруг изменяющихся контуров деталей и конфигурацию проемов (двери, люки и т. д.). В настоящее время устройство Viper используется для производства секций фюзеляжа, обтекателей, воздухопроводов и конусов сопел, а компанией Vought Aircraft Industries (США) – для задних секций фюзеляжа самолета Boeing 787 [7, 44].

Компания Camozzi Machine Tools (Италия) (до 2003 г. – Ingersoll Machine Tools, США) сосредоточилась исключительно на производстве машин для выкладки волокон и предлагает систему AFP, которая имеет семь основных осей, выкладку волокна до 32 индивидуально направленных жгутов, многоосевое управление с ЧПУ Siemens 840D и систему композитного программирования. Ассортимент продукции компании Camozzi включает вертикальные порталные станки со стационарным инструментом для выкладки и горизонтальные станки с трехмерными деталями, изготовленными на опалубочных инструментах, поддерживаемых между центрами. Другими особенностями установки являются: быстрая замена катушек с волокном, а также модуля головки или шпулярика, ширина ленточек – от 3,18 до 25,4 мм, поддержка инструментов массой до 115 т и собственный интерфейс Composite Work Bench. Машина для выкладки волокна Mongoose H3 с использованием 32 жгутов шириной 12,7 мм может укладывать до 8000 футов²/ч углеродного волокна при скорости 30 м/мин [7, 45].

В основе технологии компании ElectroImpact (США) – анализ волокна и процессы его размещения с оценкой способности быстро и эффективно производить детали. Обнаруженные компанией особенности выкладки волокна позволили сформировать бизнес-план и привели к тому, что она сосредоточила свое внимание исключительно на размещении волокон. Компания создала две машины системы AFP с тремя модульными головками разного размера: 12,7×304,8; 6,35×304,8 и 76,2×101,6 мм. Все они взаимозаменяемы и могут работать на любом из станков с функцией смены инструмента [46].

Компания Mikrosam также разрабатывает оборудование для автоматизированной выкладки с учетом серийности производства, условий использования (в лабораторных условиях или в промышленности) и конфигурации деталей. Оборудование способно работать на простых и сложных поверхностях и может быть оснащено одной или несколькими головками, что позволит выполнять работу с несколькими формами. Дополнительно в систему можно включить модуль обрезки ультразвуком. Система AFP обладает высокой производительностью, обеспечивает производство ровных и достаточно сложных структур большой кривизны [47].

Компания Mikrosam предлагает рабочую камеру для системы AFP с несколькими роботами, которые обеспечивают большую гибкость производства. Роботы могут одновременно выкладывать несколько разных сегментов одной детали или разные детали, увеличивая производительность [47].

Институт производственных технологий и передовых материалов им. Фраунгофера (IFAM, Германия) представил роботизированную систему размещения волокон, получившую название Multi-Material-Head, для автоматической обработки всех стандартных однонаправленных полуфабрикатов из волокнистых композиционных материалов – например, термопластичных лент, термопластов, препрегов, жгутов, сухого волокнистого

ровинга. Сообщается, что модульную головку легко адаптировать к материалу, источники тепла (лазер, горячий воздух или инфракрасный свет) можно легко заменить, а гибкая система предназначена для мелкосерийного производства или НИОКР [48].

Компания Addcomposites (Финляндия) поставляет систему с устройством AFP-XS – легковесную машину для автоматизированной выкладки волокон. Методология «подключи и производи», лежащая в основе устройства AFP-XS, позволяет производить установку, калибровку и производство за один день. Это единственная система AFP, которую можно использовать в течение некоторого периода времени для определенного проекта или непрерывного производства. Система AFP-XS совмещает высокие стандарты традиционных процессов AFP с уменьшенными размерами, удобными для проектов НИОКР, небольших и средних предприятий. Выкладка производится со скоростью до 250 мм/с. Масса машины без материала составляет всего 13 кг [49].

В НАСА для изготовления сложных трехмерных аэрокосмических конструкций также разработали систему AFP [50], в которой обычно используется промышленный робот-манипулятор (шестиосевые роботы). Основными производителями такой робототехники являются компании KUKA (Германия) и ABB (Швейцария) [51].

Заключения

Метод AFP, как улучшенный процесс технологии ATL, позволяет выполнять выкладку более сложных деталей. Кроме того, сокращаются потери материала, а производительность может быть выше благодаря уникальной возможности резки, зажима и перезапуска жгутов. С 1980-х гг. метод AFP стал относительно популярным процессом, который также имеет большой потенциал для модифицирования. Повышения производительности можно ожидать от введения усовершенствованного программирования, сокращения числа второстепенных операций, продолжительности простоя, а также благодаря взаимодействию нескольких роботов. В настоящее время метод AFP кажется более подходящим для типичных аэрокосмических компонентов и материалов, но необходима его модификация, позволяющая выкладывать материалы с большой поверхностной плотностью.

Для реализации процесса автоматизированной выкладки жгутами препрега шириной 6,35 мм во ФГУП «ВИАМ» освоена технология изготовления такого материала. Материал поставляется заказчикам в виде бобин, на которые намотан препрег. Для того чтобы слои препрега не слипались, они разделены антиангезионной пленкой. При выкладке пленку удаляют, а слои препрега собирают в выкладочной головке в ленту и укладывают на оснастку. Этот препрег прошел успешное опробование на двух предприятиях.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
3. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
4. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Усачева М.Н., Пурвин К.Э. Технологические особенности изготовления толстостенных деталей из ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
5. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы для безавтоклавной технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 3 (63). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-37-48.
6. Lukaszewicz D.H.-J.A., Ward C., Potter K.D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future // Composites: Part B. 2012. Vol. 43. P. 997–1009.

7. ATL and AFP: Defining the megatrends in composite aerostructures // *Composites World*. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-defining-the-megatrends-in-composite-aerostructures> (дата обращения: 31.10.2020).
8. Izco L., Isturiz J., Motilva M. High speed tow placement system for complex surfaces with cut /clamp/ & restart capabilities at 85 m/min (3350IPM) // *SAE aerospace manufacturing and automated fastening conference and exhibition*. Toulouse, 2006. P. 31–38.
9. Lengsfeld H., Wolff-Fabris F., Krämer J. et al. *Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies*. Hanser Publications, 2015. 223 p.
10. DeVlieg R., Jeffries K., Vogeli P. High-speed fiber placement on large complex structures. Los Angeles: SAE Aerofast, 2007.
11. Geodesic path length compensator for composite-tape placement method: pat. US 3810805A; filed 14.04.72; publ. 14.05.74.
12. Krolwesi S., Gutowski T. Effect of the automation of advanced composite fabrication processes on part cost // *Sample Journal*. 1987. Vol. 23 (3). P. 21–26.
13. Grant C. Automated processes for composite aircraft structure // *Industrial Robot*. 2006. Vol. 33. No. 2. P. 117–121.
14. Crosky A., Grant C., Kelly D. Fiber placements // *Wiley Encyclopedia of Composites* / eds. N. Nicolais, A. Borzacchiello, S.M. Lee. Second ed. N.J.: Wiley, Hoboken, 2012. P. 945–950.
15. Electroimpact: Composite Manufacturing. URL: <https://www.electroimpact.com/Products/Composites/Overview.aspx> (дата обращения: 12.10.2020).
16. Automation Equipment. Media Galleries // *Automated Dynamics*. URL: <http://www.automateddynamics.com/automation-equipment> (дата обращения: 12.10.2020).
17. Subramanian K.K. Why carbon fiber is preferred for aircraft bodies? URL: <https://www.quora.com/Why-carbon-fiber-is-preferred-for-aircraft-bodies> (дата обращения: 12.10.2020).
18. Dawson D. Automation: Robots taking off in commercial aircraft // *Composites World*. 2016. URL: <http://www.compositesworld.com/articles/automation-robots-taking-off-in-commercial-aircraft> (дата обращения: 12.10.2020).
19. Marsh G. Automating aerospace composites production with fibre placement // *Reinforced Plastics*. 2011. Vol. 55. P. 32–37.
20. Crosky A., Grant C., Kelly D. et al. Fibre placement processes for composites manufacture in *Advances in Composites Manufacturing and Process Design* / ed. Ph. Boisse. Woodhead Publishing, 2015. P. 79–92.
21. Knight B.W. The technique of filament winding // *Composites*. 1970. June. P. 228–233.
22. Evans D.O., Vaniglia M.M., Hopkins P.C. Fiber placement process study // 34th International SAMPE symposium. Covina, 1989. P. 1822–1833.
23. Bullock D.E. Automated prepreg tow placement for composite structures // 35th International SAMPE symposium. Anaheim, 1990. P. 1452–1469.
24. Barth J.R. Fabrication of complex composite structures using advanced fiber placement technology // 35th International SAMPE symposium. Anaheim, 1990. P. 710–720.
25. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Липкость и возможность использования препрегов для автоматизированных технологий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 8 (68). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
26. Blom A.W., Lopes C.S., Kromwijk P.J. et al. A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates // *Journal of Composite Materials*. 2009. Vol. 43. P. 403–425.
27. Croft K., Lessard L., Pasini D. et al. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. P. 484–491.
28. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Влияние зазоров и нахлестов при выкладке препрегов на механические свойства углепластиков (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-71-78.
29. Enders M.L., Hopkins P.C. Developments in the fiber placement process // 36th International SAMPE symposium. San Diego, 1991. P. 778–790.

30. Evans D.O. Design considerations for fiber placement // 38th International SAMPE symposium. Anaheim, 1993. P. 170–181.
31. Measom R., Sewell K. Fiber placement low-cost production for complex composite structures // 52nd Annual Forum Proceedings of American Helicopter Society. Washington, 1996. P. 611–622.
32. Pasanen M.J., Martin J.P., Langone R.J., Mondo J.A. Advanced composite fiber placement: process to application. Schenectady, N.Y.: Automated Dynamics Corporation, 1997. P. 1055–1060.
33. Gruber M.B., Lamontia M.A. Automated fabrication processes for large composite aerospace structures: a trade study // 46th International SAMPE symposium. Long Beach, 2001. Vol. 46. P. 1986–1997.
34. Bourban P., Bernet N., Zanetto J., Manson J. Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic composites // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2001. Vol. 32 (8). P. 1045–1057.
35. Hulcher A.B. Processing and testing of thermoplastic composite cylindrical shells fabricated by automated fiber placement // 47th International SAMPE symposium. Long Beach, 2002. P. 1–15.
36. Lamontia M.A., Gruber M.B. Limitations on mechanical properties in thermoplastic laminates fabricated by two processes: automated thermoplastic tape placement and filament winding // 26th SAMPE Europe conference. Paris, 2005. P. 92–97.
37. Faserstreifenverbinder fuer Bandwickler: pat. DE 102008010424B4; filed 22.02.07; publ. 02.10.08.
38. Calawa R., Nancarrow J. Medium wave infrared heater for high-speed fiber placement. Los Angeles: SAE Aerofast, 2007. P. 38–42.
39. Fibre application machine with tool changing system: pat. WO 2008/149004A1; filed 10.05.07; publ. 11.12.08.
40. Fibre application machine with fibre supply flexible tube: pat. WO 2008/122709A1; filed 28.02.07; publ. 16.10.08.
41. Shirinzadeh B., Alici G., Foong C.W., Cassidy G. Fabrication process of open surfaces by robotic fibre placement // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2004. Vol. 20 (1). P. 17–28.
42. Shirinzadeh B., Cassidy G., Oetomo D. et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2007. Vol. 23 (4). P. 380–394.
43. Fiber Placement Machines // Coriolis Composites. URL: <https://www.coriolis-composites.com/fiber-placement-machines> (дата обращения: 09.10.2020).
44. Fives: Cincinnati VIPER™ Fiber Placement Systems. URL: <https://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/products/composites/fiber-placement-systems/cincinnati-viper-fps.html> (дата обращения: 12.10.2020).
45. Camozzi Machine Tools: Moongoose™. URL: <https://en.machinetools.camozzi.com/products/composite-manufacturing/all-products/mongoose.kl> (дата обращения: 12.10.2020).
46. ATL and AFP: Signs of evolution in machine process control // Composites World. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-signs-of-evolution-in-machine-process-control> (дата обращения: 09.10.2020).
47. AFP/ATL Robotic Cell // Mikrosam. URL: <https://mikrosam.com/new/article/en/afpatl-robotic-cell> (дата обращения: 15.10.2020).
48. Trends in automation: ATL and AFP technologies increase speed, flexibility // Composites World. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/trends-in-automation-atl-and-afp-technologies-increase-speed-flexibility> (дата обращения: 12.10.2020).
49. AFP-XS // Addcomposites. URL: <https://www.addcomposites.com/afpxs> (дата обращения: 14.10.2020).
50. Clinton Jr.R.G., Vickers J., McMahon W., Hulcher A. Large composite structures processing technologies for reusable launch vehicles // Proceedings of the 4th Conference on Aerospace Materials, Processes, and Environmental Technology. September, 2000. P. 1–37.
51. Bogue R. The growing use of robots by the aerospace industry // The International Journal of Robotics Research. 2018. Vol. 45. No. 6. P. 705–709.