

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 3. Сравнение технологий ATL и AFP.****Гибридная технология ATL/AFP***

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-43-50

Автоматизированная выкладка лент (automated tape laying – ATL) применяется при производстве простых по форме деталей: обшивок крыла и закрылков, панелей вертикального и горизонтального оперения. Для выкладки используются ленты шириной 75; 150 и 300 мм. Автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP) применяется при производстве сложных конструкций большой кривизны: фюзеляжа и других контурных конструкций. Для выкладки используются жгуты шириной 3,2; 6,35 и 12,7 мм. Представлено сравнение технологий ATL и AFP, а также специализированное оборудование, в том числе роботизированные гибридные ATL/AFP-машины.

Ключевые слова: автоматизированная выкладка лент (ATL), автоматизированная выкладка волокон (AFP), автоматизированная выкладка, оборудование, ПКМ, 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 3. Comparison of ATL and AFP technologies.****Hybrid technology of ATL/AFP**

Automated tape laying (ATL) has found application in the production of simple parts: wing skins and flaps, vertical and horizontal tail panels. For laying out, tapes with a width of 75; 150 and 300 mm are used. Automated fiber placement (AFP) is used to produce complex structures with great visuals: fuselage and other contour structures. For laying, bundles with a width of 3,2; 6,35 and 12,7 mm are used. Presents a comparison of ATL and AFP equipment, including robotic hybrids ATL/AFP-machines.

Keywords: automated tape laying (ATL), automated fiber placement (AFP), automated layout, equipment, PCM, prepreg, additive technology.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Автоматизированная выкладка лент (automated tape laying – ATL) – одна из наиболее широко применяемых автоматизированных технологий производства композитов [1–6]. Однонаправленные ленты шириной 75; 150 и 300 мм выкладывают на форму для детали с помощью нагруженной роликовой системы с различной степенью шарнирного сочленения в зависимости от сложности изготавливаемой детали. Технология

* Часть 1 – см. «Авиационные материалы и технологии», № 2 (63), 2021, часть 2 – № 3 (64), 2021.

ATL, по существу, повторяет технологию нанесения однонаправленной ленты вручную, но выкладка происходит при более высоких скоростях, на более крупных деталях и с большим контролем процесса. Современные системы ATL имеют точный контроль начала процесса, обрезки и ориентации ленты, что позволяет добавлять более сложное армирование, чем просто выкладку дополнительных слоев полимерного композиционного материала (ПКМ) [7].

Автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP) – это гибридная технология намотки волокна и технологии ATL, в которой несколько параллельных полос композитного препрега или ленты с прорезями (обычно шириной 3,2; 6,35 и 12,7 мм) слой за слоем размещаются и уплотняются на форме для детали. Как и станок для намотки волокна, намоточный узел машины для процесса AFP вращается, чтобы создать тело вращения. Как и в машине для процесса ATL, в напорной головке используется давление для нанесения материала даже на вогнутые поверхности. Жгуты обычно соединены по 12–32 шт. для создания полосы шириной 10–40 см. Каждый из жгутов обрезается по отдельности, что позволяет выкладывать их на поверхности с высокой степенью сложности и кривизны. Для того чтобы направляющие механизмы не склеивались смолой, в большинстве машин для выкладки имеется бортовой шпулярник (холодильник с буксировочной катушкой). На головке машины установлена система обогрева для обеспечения требуемой липкости жгутов. Машины для процесса AFP обычно имеют различные траектории движения, включая поперечную подачу, перемещение, наклон, вращение [8].

Процессы AFP и ATL функционально схожи, но каждый из них применяется по-разному для достижения конкретных целей при изготовлении конструкции, чтобы обеспечить в изделии прочность или жесткость там, где это необходимо. В обоих процессах используется пропитанное смолой непрерывное волокно. Однако у этих двух процессов есть некоторые различия.

Сравнение технологий AFP и ATL

Принято считать, что технология AFP наиболее эффективна при размещении материала на изогнутой или рельефной поверхности, поскольку жгуты более узкие и ними легче манипулировать, чем лентой. Однако этот метод ограничен допустимым количеством волокон, их общей шириной и длиной. Считается также, что метод ATL наиболее эффективен при размещении больших количеств материала на относительно большой плоской или минимально очерченной поверхности и обеспечивает высокую скорость выкладки в такой среде. Однако большая плоская поверхность, даже если она позволяет использовать большие отрезки непрерывной ленты, почти всегда требует размещения более коротких полос ленты или волокна в различных местах [9]. Технологию ATL применяют для изготовления крупногабаритных простых по форме панелей крыльев, которые можно быстро выложить широкими лентами.

С другой стороны, методом AFP выкладывают несколько полос шириной от 3,25 до 12,5 мм, поэтому его можно применять для изготовления фюзеляжа и других более контурных конструкций, требующих максимальной гибкости. При изготовлении ПКМ этим методом снижаются скорость и объем выкладки [10].

На практике предполагалось, что метод ATL из двух процессов будет более быстрым, если детали имеют небольшие сложности или неровности поверхности. Ранее необходимой была надежность, но в последнее время основное внимание уделяется производительности. Предполагается, что метод AFP более медленный процесс, который лучше выбирать для изготовления деталей, где дублирование сложных контуров важнее потребности в скорости производства. Однако процесс AFP обеспечивает более высокую точность изготовления, чем оборудование, применяемое при ATL, поэтому он лучше подходит для выкладки короткими лентами и схем, при которых требуется,

чтобы в машине можно было быстро изменять ширину выкладываемой полосы и приспособиться к разнообразию требований по дизайну изделия [9–13].

Однако появились некоторые признаки того, что это мнение может измениться, поскольку новые технологии изготовления материалов, применяемое оборудование и программное обеспечение позволяют использовать волоконно-оптические и ленточные системы с помощью новых и оригинальных способов. В этой постоянно меняющейся среде поставщики разрабатывают системы ATL и AFP, которые доказывают, что происходит быстрая эволюция разрабатываемых технологий [9, 14–16].

С точки зрения сложности размещения коротких волокон, метод AFP превосходит метод ATL, тем не менее существуют возможности для повышения скорости производства. По мере того как выкладываемая полоса становится короче, на машине AFP тратится пропорционально больше времени на выполнение задач, которые напрямую не связаны с размещением волокна на форме: ускорение и замедление на протяжении выкладки, обрезка волокон в конце и разворот перед началом следующего ряда размещения волокон. Другой фактор – остановка машины, когда необходимо изменить ширину слоя волокна (количество жгутов) или тип волокна, тогда теряется ценное время в процессе производства [9].

Продолжительность выкладки полосы длиной 8 м составляет 4 с – для процесса ATL и 2,5 с – для процесса AFP соответственно, включая время на ускорение и замедление. Однако продолжительность до начала выкладки нового слоя (включая обрезку, обработку и изменение положения) составляет 9 с – для процесса ATL и 7 с – для процесса AFP из-за отсутствия операций по резке [17]. Это показывает, что даже при выкладке простых компонентов соотношение между продолжительностями производственного процесса и второстепенных операций распределено не оптимально. Кроме того, ошибки при контроле качества и выкладки приводят к уменьшению производительности.

Для процессов ATL и AFP одной из производственных проблем является определение траекторий последовательной выкладки. Действительно, для этих процессов очень важно, чтобы между соседними рядами лент не было зазоров и нахлестов [18], а это в свою очередь обеспечит максимальную прочность и минимальную массу готовой детали. Другими словами, это означает, что траектории последовательной выкладки должны быть равноудаленными [19].

Продолжительность простоя машин для выкладки из-за повторной загрузки материала, исправления ошибок или их очистки является значительной – до 50 % для метода AFP [20]. Таким образом, дальнейшее увеличение скорости выкладки маловероятно, что, возможно, привело бы к дальнейшему увеличению производительности [17, 21], поскольку текущая производительность уже в значительной степени ограничена конструкцией деталей, вторичными операциями и продолжительностью простоя машин. Устранение любого из этих ограничений должно закономерно привести к увеличению производительности.

Сравнение характеристик двух процессов приведено в таблице [22].

Сравнение процессов ATL, AFP и ручной выкладки

Характеристика	ATL	AFP	Ручная выкладка
Потери материала	Низкие	Низкие	Высокие
Оплата труда	Низкая	Низкая	Высокая
Повторяемость	Высокая	Высокая	Низкая
Точность	Высокая	Высокая	Низкая
Производительность	Высокая	Высокая	Низкая
Рентабельность	Есть	Есть	Нет
Тип выкладываемого материала	Широкие ленты	Узкие ленты	Широкие ленты
Скорость укладки	Очень высокая	Относительно высокая	Очень высокая
Геометрическая форма детали	Большие, простые	Изогнутые	Большие

Для того чтобы повысить способность существующих программных подходов, необходимо лучше понимать сложность выкладываемой детали. Вероятно, что небольшие геометрические элементы существенно влияют на продолжительность процесса. Это можно решить только на этапе проектирования, чтобы добиться более высокой производительности [23].

В компании Forest-Liné (Франция), производящей машины для процессов ATL и AFP, считают, что существует несколько факторов, которые в настоящее время работают в пользу технологии ATL: выкладывать один кусок ленты проще, чем 32 пучка волокна; жгуты волокна ломаются легче, чем лента; системы размещения волокон, как правило, не так надежны, как ленточные системы. Однако если эти преимущества технологии ATL будут достигнуты в технологии AFP, то процесс AFP получит большее распространение. Кроме того, на машине для выкладки волокон можно сделать любую деталь, которую можно создать из слоя ленты, но с помощью слоя ленты невозможно построить деталь, которую можно получить на машине для выкладки волокон [9].

Роботизированные гибридные машины для технологии ATL/AFP

Системы автоматизированной выкладки разработаны для обработки деталей разнообразных размеров и форм, которые имеют тенденцию становиться большими, сложными и дорогими. Но параллельно возник спрос на автоматизированные технологии, которые позволяют сделать серийным производство большого количества деталей, идентичных или похожих по размеру и форме. Несколько поставщиков оборудования разработали так называемые системы частичного назначения, т. е. более простые машины, предназначенные для изготовления очень ограниченного набора деталей. В отличие от более сложной машины, на которой можно изготавливать многие типы деталей, эта система обеспечивает более доступное автоматизированное решение для относительно простых композитных конструкций малого и среднего размера. Первыми поставщиками в этой области являются американские компании Accudyne Systems Inc. и Automated Dynamics [24].

При производстве горизонтально ориентированная форма обшивки крыла занимает много полезного места в заводском цехе. Машины для процессов AFP и ATL, действующие по отдельности и последовательно, по своей сути неэффективны. Технология претерпела два основных изменения в производственной стратегии автоматизированной выкладки: форму для выкладки переместили из горизонтального положения в вертикальное, а манипуляторы сняли с рам и поместили на многоосные роботы, увеличив их количество. Именно это увеличение числа гибридных машин системы AFP/ATL является наиболее перспективным направлением для ускорения процесса выкладки, повышения его эффективности и, следовательно, экономичности изготовления панелей крыльев и ячеек обшивки крыла. Каждый блок включает гибридную головку системы AFP/ATL, многоосевой робот и шпулярник, где размещены ленты или жгуты из углеродного волокна. Использование нескольких роботов означает, что ленты и жгуты различного количества и ширины могут быть развернуты одновременно, что увеличивает производственные возможности и вариативность процесса. Однако установка нескольких роботов создает препятствия, которые до сих пор не встречались при производстве композитов. Так, необходимо, чтобы каждый робот знал, где он находится в пространстве относительно других роботов (и оснастки для изготовления детали), чтобы избежать столкновений. Каждый робот также должен работать совместно с другими, чтобы разместить нужный материал (ленты или волокна) в нужном месте в нужное время. Поэтому разработали алгоритм, который распределяет выкладку между несколькими роботизированными установками на одной направляющей и оптимизирует планирование процесса [25, 26].

Компания Affordable Automation Team (США) представила новую роботизированную установку AFP/ATL-0510, в которой размещено множество технологических головок, включая термореактивные и термопластичные на установках AFP и ATL. Примеры использования новой установки для изготовления различных деталей включают коммерческие и военные винтокрылые летательные аппараты и самолеты с неподвижным крылом, такие как конструкции хвостовой балки, элементы захвата несущего винта, горизонтальные и вертикальные хвостовые оперения, стабилизаторы, а также части реактивных двигателей. Эту установку также можно использовать для обработки таких материалов, как термореактивные и термопластичные матричные препреги. Согласно данным компании Automated Dynamics (США), этот робот обладает универсальностью и занимает небольшую площадь на рабочем месте. Робот имеет стандартную рабочую зону размером $3 \times 1,5$ м и вращающиеся части размером 1,2 м со шпинделем. Он предназначен для выкладки сложных структур малого и среднего размера, которые обычно укладываются вручную. Максимальную длину детали можно увеличить, установив робот на раму [27–29].

Компании MТorres (Испания) и Electroimpact (США) выпустили двухпроцессорных роботов, которые намного компактнее, чем системы AFP/ATL, и их можно установить на большинстве существующих заводов без значительной модификации оборудования перед установкой. Двухпроцессорные роботы состоят из роботизированной машины для выкладки, которая перемещается по рельсам параллельно форме для выкладки. Стол для выкладки в основном используется для изготовления плоских ПКМ, которые затем разрезают на отдельные части и подвергают горячей штамповке для достижения окончательной формы. Когда требуется выкладка детали более сложной формы, робот поворачивается к той стороне рабочей ячейки, где в переднюю/заднюю бабку загружен инструмент для процесса AFP. Благодаря возможности быстрой смены головки роботы могут использовать отдельную головку для процесса AFP с контролем волокон для выкладки деталей сложной формы и при желании заменять головку компактного размера для процесса ATL и для выкладки плоских ПКМ небольшой сложности [30].

Технология, которая все еще находится на ранней стадии разработки в компании German Aerospace Centre (Германия), в настоящее время называется Flarrybot – гибкий автономный робот. Эта технология совмещает оборудование и функциональные возможности системы ATL/AFP в модульном трехроликовом самоуправляемом программируемом беспроводном роботе, который перемещается по форме, где размещается волокно или лента при изготовлении композиционного материала. Робот движется на трех роликах с независимым приводом и вмещает достаточное количество мотков ленты из углеродного волокна или жгутов для ширины выкладки 200 мм (см. рисунок) [25].



Робот Flarrybot для автоматизированной выкладки препрега [25]

Компания Mikrosam (Северная Македония) разработала установку, которая может объединять головки AFP (для терморектопласта) и ATL (для выкладки термопластичного препрега) в единую роботизированную ячейку для индивидуальной разработки конструкционных композитов. Такая установка может способствовать внедрению новой технологии в производство композитных деталей для авиационной и космической отраслей, а также для автомобильной, морской, газовой и нефтяной промышленности. Робот-машина системы AFP/ATL позволяет быстро перейти от автоматизированного размещения волокон к автоматизированной выкладке ленты и наоборот, путем замены головки. С помощью новой технологии возможно варьировать разработку высококачественных готовых композитных деталей сложной формы, одновременно экономя время на настройку нескольких машин, что означает значительно более быстрое выполнение работ по изготовлению композитных деталей. На автоматизированных установках с компьютерным управлением можно изготавливать как плоские, так и сложные контурные детали малого и среднего размера, с размещением углеродной (или стеклянной) однонаправленной ленты, пропитанной эпоксидным связующим, и ленты из термопластичного препрега. Контроль температуры термопластичного материала осуществляют с помощью лазера на поверхности уплотнения (температура нагрева – до 400 °С), встроенного в головку ATL, и метода инфракрасного нагрева (нагрев поверхности – до 100 °С) с функцией управления, предусмотренной для терморегулятора [31].

Заключения

Автоматизированные системы выкладки, которые функционируют в последнее время, разработаны производителями промышленного оборудования, не имеющими опыта работы с композиционными материалами. В настоящее время эти компании накопили опыт в области применения композитов и стремятся найти инвестиции для устранения ограничений в производственной системе. Поставщики материалов исторически работали с пользователями композитов, использующими ручную выкладку, и обладали ограниченным опытом или не имели вообще никакого опыта в области промышленного машиностроения, поэтому им необходимо разработать модифицированное оборудование для устранения возникших ограничений. Подходы к проектированию и пакеты программного обеспечения, используемые конечными пользователями для разработки компонентов, часто являются производными от ручной выкладки и (или) недостаточно интегрированы с оборудованием, что приводит к нежелательным ограничениям на установки и их возможности.

Несмотря на огромные успехи, достигнутые при внедрении технологий ATL и AFP за последнее десятилетие, стало ясно, что у этих высокоскоростных машин еще есть резервы, чтобы соответствовать растущим требованиям, предъявляемым к высокопроизводительным установкам. Вероятно, в ближайшие пять лет технологии AFP и ATL будут модифицироваться, а также будут создаваться новые типы машин с предпочтительной технологией.

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. 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.
7. Crosky A., Grant C., Kelly D. et al. Fibre placement processes for composites manufacture // *Advances in Composites Manufacturing and Process Design* / ed. Ph. Boisse. Woodhead Publishing, 2015. P. 79–92.
8. Mccarville D.A. Intellectual property, patents and innovation in aeronautics // *Innovation in Aeronautics* / ed. M.Y. Trevor, M. Hirst. Woodhead Publishing, 2012. P. 263–304.
9. ATL and AFP: Signs of evolution in machine process control. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-signs-of-evolution-in-machine-process-control> (дата обращения: 09.10.2020).
10. Narrow UD tapes to bridge the ATL-AFP gap. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/narrow-ud-tapes-to-bridge-the-atl-afp-gap> (дата обращения: 12.10.2020).
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Stone K.L. Automation in composite processing // 29th National SAMPE symposium. Reno, 1984. P. 1489–1498.
16. Albus J.S. Research issues in robotics // 16th National SAMPE technical conference. Albuquerque, 1984. P. 65–93.
17. Lukaszewicz D.H.-J.A. Optimisation of high-speed automated layup of thermoset carbon-fibre preimpregnates: PhD Thesis. Bristol: University of Bristol, 2011. 215 p.
18. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Влияние зазоров и нахлестов при выкладке препрега 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.
19. Lemaire E., Zein S., Bruyneel M. Optimization of composite structures with curved fiber trajectories // *Composite Structures*. 2015. Vol. 311. P. 895–904.
20. Huber J. Automated lamination of production advanced composite aircraft structures // *SAE Transactions*. 1981. Vol. 90. P. 1794–1803.
21. Lukaszewicz D.H.-J.A., Potter K.D. The internal structure and conformation of prepreg with respect to reliable automated processing // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011. Vol. 42. P. 283–292.
22. Oromiehie E., Prusty B.G., Compston P., Rajan G. Automated fibre placement based composite structures: Review on the defects, impacts and inspections techniques // *Composite Structures*. 2019. Vol. 224. P. 1–14.
23. 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.

24. ATL and AFP: Defining the megatrends in composite aerostructures. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-defining-the-megatrends-in-composite-aerostructures> (дата обращения: 06.10.2020).
25. Modular, mobile, multiple robotics poised to change the AFP/ATL paradigm. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/modular-mobile-multiple-robotics-poised-to-change-the-afpatl-paradigm> (дата обращения: 13.10.2020).
26. Measom R., Sewell K. Fiber placement low-cost production for complex composite structures // Proceedings. Annual Forum of the American Helicopter Society. Alexandria: AHS International, 1996. P. 611–622.
27. Saveriano J.W. Automated contour tape laying of composite materials // 16th National SAMPE technical conference. Albuquerque, 1984. P. 126–139.
28. Automated dynamics: Automation Equipment. URL: <http://www.automateddynamics.com/automation-equipment> (дата обращения: 15.10.2020).
29. AFP/ATL evolution: Dual-process workcells. URL: <https://www.compositesworld.com/columns/afpatl-evolution-dual-process-workcells> (дата обращения: 14.10.2020).
30. TORRESLAYUP: Productivity and flexibility together in a perfect solution. URL: <https://www.mtorres.es/en/aeronautics/products/carbon-fiber/torreslayup> (дата обращения: 02.11.2020).
31. Mikrosam: AFP/ATL Robotic Cell. URL: <https://mikrosam.com/new/article/en/afpatl-robotic-cell> (дата обращения: 15.10.2020).