

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 1. Автоматизированная выкладка лент (ATL)**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-51-61

Статья посвящена актуальной в настоящее время проблеме автоматизации процесса выкладки заготовок композитных деталей. Одной из основных технологий, которая используется для производства конструкций из термореактивных или термопластичных композиционных материалов, является автоматизированная выкладка лент (automated tape laying – ATL). В первой части статьи рассмотрена технология выкладки лент для больших простых плоских деталей, а также дано описание процесса и оборудования, представленного на рынке от известных компаний.

Ключевые слова: автоматизированная выкладка лент (automated tape laying – ATL), 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 1. Automated Tape Laying (ATL)**

The article is devoted to the currently topical problem of automating the process of lay-up tapes of composite parts. One of the main technologies used for the production of structures from thermosetting or thermoplastic composites is the Automated Tape Laying (ATL). In the first part of the article, the technology of laying-up the tapes for large simple flat parts is considered, as well as the process and equipment from well-known companies on the market is described.

Keywords: automated tape laying (ATL), 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

Композиционные материалы используются во многих отраслях промышленности, поэтому необходимо оптимизировать стоимость и совершенствовать организацию производства композитов, так как эти материалы должны быть более рентабельными по сравнению с их металлическими аналогами [1–5]. Автоматизация процесса – один из путей достижения конкурентоспособности композиционных материалов.

Автоматизированная выкладка лент (automated tape laying – ATL) и автоматизированная выкладка волокон (automated fiber placement – AFP) – две основные технологии, которые в настоящее время используются для производства современных композиционных материалов из однонаправленных препрегов [6]. Широкие однонаправленные

ленты укладывают на форму детали с помощью системы нагруженных роликов с различной степенью шарнирного сочленения в зависимости от сложности изготавливаемой детали [7]. Продолжительность простоя (когда меняют ленту) и выкладки, температуру и натяжение ленты можно контролировать во время остановки процесса [6]. Технология ATL имеет точный контроль начала подачи ленты, ее обрезки и ориентации, что позволяет реализовывать более сложное армирование, чем просто наращивание слоев полимерного композиционного материала (ПКМ) [7].

Установка ATL укладывает волокна в виде предварительно натянутых однопосланных лент или непрерывных полос ткани, а не отдельных жгутов. Выкладка ленты является универсальным процессом, что позволяет легко изменять направление ориентации волокон при выкладке. Технология ATL используется для выкладки терморезактивных и термопластичных материалов. Как правило, в обоих процессах материал наносят с помощью роботизированной головки, которая может весить до нескольких сотен килограммов в зависимости от области применения. Головка содержит множество механизмов, необходимых для размещения материала [8].

За последнее десятилетие достижения в области программного и аппаратного обеспечения, связанные с критически важными процессами производства композитов, позволили производить большие конструкции, армированные углеродным волокном, которые ранее было просто невозможно получить.

Однако, как и во многих отраслях промышленности композитов, автоматизированная выкладка, несмотря на технический прогресс последних нескольких лет, все еще претерпевают огромные изменения. В настоящее время перед специалистами стоит вопрос, как будет развиваться эта технология и куда эта эволюция приведет индустрию по изготовлению композитов.

Описание технологии ATL

Технологию ATL можно интерпретировать как форму аддитивного производства, поскольку деталь создается путем добавления материала, а не его удаления во время обработки [9].

Головка машины включает катушки с лентой, намоточное устройство, направляющие устройства для намотки, уплотнитель, датчик положения и резак для ленты. В любом случае головка может быть расположена на конце многоосевого шарнирно-сочлененного робота, перемещающегося вокруг формы, на которую наносится материал, или головка может быть расположена на раме, подвешенной над формой. В качестве альтернативы форму можно перемещать или вращать, чтобы обеспечить доступ головки к различным местам. Ленту или волокно накладывают на форму в один ряд любой длины под любым углом. Несколько рядов ленты можно выложить вместе по шаблону или без него, траектории укладки контролируют с помощью программного обеспечения, разработанного в результате проектирования и анализа детали [8]. Головка машины ATL работает с лентой препрега, которая обычно имеет ширину 75, 150 или 300 мм и поставляется на бумажной подложке [6], аналогичной препрегу, используемому для ручной выкладки. Однако препрег можно модифицировать для автоматизированной выкладки путем изменения бумажной подложки или степени пропитки. В большинстве имеющихся в продаже установок материал препрега хранится непосредственно в укладочной головке. Из-за большой массы головки и материала, а также размера производимых деталей, установки ATL обычно монтируются на горизонтальных (рис. 1) [10] или вертикальных рамах (рис. 2).

Для большинства аэрокосмических конструкций траектория выкладки пролегает через уклоны и впадины, что приводит к сложной топологии укладки поверхности. Оборудование для ATL – это установки с числовым программным управлением (ЧПУ), которые следуют по заранее заданным траекториям с большой точностью и воспроизводимостью, что позволяет исключить ошибки выкладки, которые могут возникнуть при ручной укладке. Во время выкладки каждого слоя ленты укладываются рядом друг с другом с зазором 0,5–1 мм. Влияние зазоров на механические характеристики минимизировано [11].



Рис. 1. Пример установки ATL на горизонтальной раме [10]



Рис. 2. Пример установки ATL на вертикальной раме для выкладки ленты шириной 300 мм [6]

В начале выкладки к инструменту прикрепляют ленту заданной длины с помощью мягкого силиконового валика [12–16]. Во время выкладки материал прикрепляется к форме с помощью контролируемого инструмента. Это может быть гибкий силиконовый валик, но были также разработаны более сложные методы контроля распределения давления по сложным поверхностям, таким как сегментированный наконечник для выкладки [13, 16].

Головка установки контролирует входное натяжение препрега, для того чтобы избежать разрывов бумажной основы, улучшить выравнивание слоев и сделать возможной выкладку детали с получением изогнутой формы. Для обеспечения требуемой температуры во время выкладки, материал можно нагреть либо перед укладочной головкой, либо непосредственно при выкладке.

В конце выкладки ленты головка установки замедляет движение и автоматически обрезает ленту, используя вращающиеся или режущие лезвия. Расстояние между положением лезвия и точкой контакта ролика называется «минимальной длиной участка» и используется в качестве нижней границы для размеров деталей, которые могут быть изготовлены, – около 100 мм. После обрезки ленты головка перемещается в сторону и выкладывает следующий слой (рис. 3) [17]. Весь этот процесс повторяется слой за слоем до тех пор, пока слой не будет закончен или система не будет остановлена программой, вмешательством пользователя или если автоматическая система обнаружения неисправностей не обнаружит ошибку выкладки [6].

Большинство установок ATL обеспечивают максимальную линейную скорость выкладки 0,83–1 м/с, ускорение $0,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ и обычно создают уплотнение с усилием 445 Н (для термореактивной ленты шириной 75 мм [18]) или 1000 Н (для термореактивной ленты шириной 300 мм), что соответствует давлению 0,1 МПа. Напротив, для выкладки

термопластического материала необходимо давление от 1,4 МПа [19], но не более 3,6 МПа [20].

Технология ATL обычно используется для геометрически простых конструкций, таких как обшивка крыла и закрылки, панели вертикального и горизонтального оперения, плоских ПКМ [17].

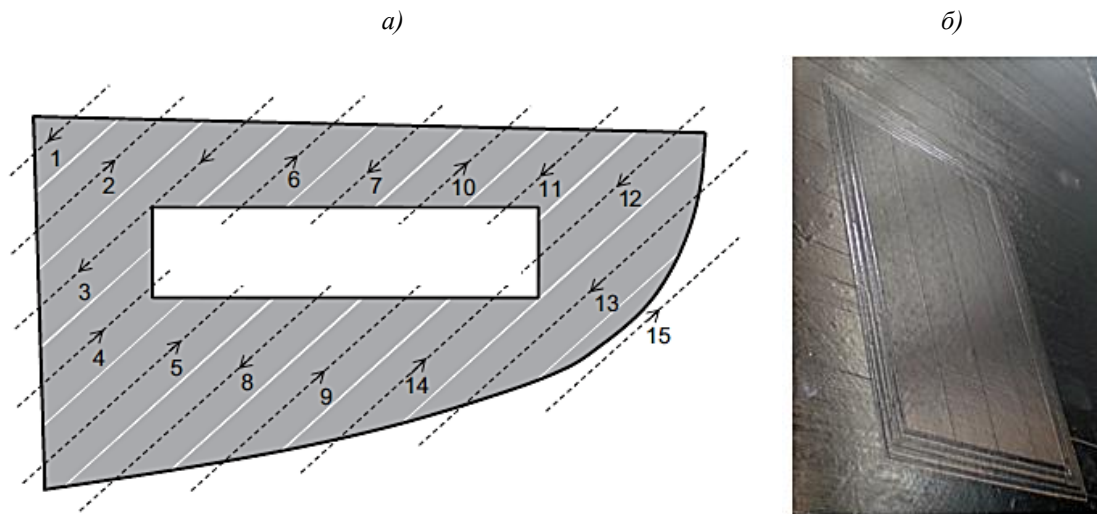


Рис. 3. Пример последовательности нанесения слоев с помощью головки ATL (а) и композитная структура, состоящая из нескольких слоев препрега, выложенного по технологии ATL (б) [17]

Первоначальные разработки технологии ATL

Самое раннее известное упоминание о технологии ATL – это патент 1971 г. [21], в котором описан метод наслаивания композитной ленты на вращающуюся опорную плиту с использованием программного управления.

В 1974 г. в патенте [22] описана автоматизированная выкладка ленты шириной 76 мм на изогнутую поверхность сложной детали, на которой с помощью вращающегося ролика удерживают материал. В авиакосмической промышленности и большинстве исследовательских институтов начали использовать метод ATL еще в 1975 г. [23]. Следует отметить, что при использовании этого процесса можно уменьшить количество ошибок при выкладке материалов и снизить количество отходов. Таким образом, это дает возможность более эффективного использования материала.

Например, в 2001 г. подсчитали потери материалов при создании деталей с помощью установки ATL в зависимости от их размера: для мелких деталей – до 30 %, для более крупных – потери экспоненциально уменьшаются до 2–4 % [24]. Технология ATL получила более широкое распространение – стала общедоступной на мировом рынке. Так, для решения проблемы высоких скоростей выкладки была создана система укладки с облегченной головкой, распределяющей ленту по изогнутой поверхности со скоростью до 60 м/мин [25, 26].

Для того чтобы окончательно устранить ограничение по выкладке только плоской поверхности, в 1984 г. была представлена коммерческая технология ATL [27], с помощью которой возможно выкладывать ленту на поверхность с кривизной до 15 градусов с применением ультразвуковой системы отслеживания выкладки по поверхности формы. Однако по-прежнему оставалось несколько технических проблем, в том числе скорость выкладки, точность выкладки деталей сложной геометрической формы и улучшение надежности и качества изделий. В середине 80-х годов прошлого века роботизированные установки были ограничены в скорости выкладки (менее 60 м/мин), что

стало проблемой для возможности автономного программирования [28]. Для решения этой проблемы большинство установок ATL оборудовали рамами с рельсами, которые оказались тяжелыми и жесткими конструкциями с ухудшенными механическими и динамическими характеристиками [29].

В 1986 г. была представлена система, на основе которой сформирована база для всех современных коммерческих установок ATL [30]. Непосредственный контроль давления уплотнения выкладки, а также рабочее состояние прилегания головки машины на криволинейных поверхностях стали возможными благодаря замене предыдущей ультразвуковой системы слежения на систему с силовым управлением по поворотным осям A и Z [12]. Однако оставшиеся проблемы были в основном связаны с надежностью выкладки в зависимости от продолжительности жизненного цикла препрега и первого слоя, который обычно должен прилипнуть к форме с покрытием или к антиадгезионной ткани. Затем был запатентован метод завершения выкладки ленты, которую отрезают под острым углом с помощью гибкого резака [13]. Этот метод был усовершенствован [14] не только для узла обрезки ленты, но и для выкладки первого слоя – в частности, для преодоления технических трудностей при прилипании первого слоя. Однако выкладка препрегов по-прежнему ограничивалась довольно простыми соединениями, а надежность выкладки все же зависела от липкости каждого слоя, которая ухудшалась с увеличением продолжительности выкладки [31]. Для решения первой проблемы [32] ввели систему укладки, которую контролировали с применением программного обеспечения, чтобы выполнять выкладку по криволинейным поверхностям вдоль траектории, по которой будет проходить лента по поверхности без трения.

Поскольку сложная выкладка становилась более совершенной, в конце 1980-х гг. возникла проблема выравнивания слоев по ширине. Мягкие ролики, используемые для выкладки изделий сложной геометрической формы, приводили к неравномерному давлению при выкладке и натяжению ленты на головке установки. Оба эти фактора приводили к действию сжимающей силы на ленту, находящуюся между роликом и источником ленты, что в свою очередь допускало поперечное перемещение слоя ленты перед укладкой. Для того чтобы предотвратить эти проблемы, головку установок оснащали узлом для контролируемого натяжения ленты в сочетании с жестко контролируемым давлением отрыва для обеспечения правильного выравнивания слоя. Одна из таких систем, в которой сочетаются средства для натяжения слоев с усилием выкладки, показана в патенте [33].

Затем была продемонстрирована технология ATL, имеющая сегментированный наконечник, соединенный с камерой давления, что обеспечивало точное значение давления при выкладке и улучшенное выравнивание слоев по контурным поверхностям [15]. В 1995 г. этот подход был распространен на несколько элементов выкладки, работающих независимо от головки [16]. Другой целью использования контроля давления при выкладке было уменьшение продолжительности операций по резке, так как это отрицательно сказывалось на производительности установки. Например, в работе [34] утверждалось, что эффективное давление, передаваемое с головки установки на препрег, зависит от скорости выкладки и должно быть больше, чем при вакуумировании, так как на материал оказывалось кратковременное давление. Давление зависит от мощности установки, геометрической формы и материала ролика, а также от геометрических параметров формы, на которую наносится материал.

Все исследовательские работы были направлены на повышение производственной возможности оборудования для технологии ATL, но проблемы жизнеспособности материала и изменения липкости так и остались нерешенными. Кроме того, технология давала возможность точного контроля давления во время выкладки, но было неясно,

каким должен быть желательный уровень давления или от чего он зависит. К сожалению, фактическая скорость выкладки осталась без изменений, по сравнению с ранее достигнутой величиной скорости 10–20 м/мин. Особой проблемой, оставшейся в этот период времени, была также стоимость оборудования для укладки.

В 2000 г. систему ATL оценили в 3,5 млн долларов США [35]. Это означало, что технология ATL должна быть высокопроизводительной для компенсации первоначальных капитальных затрат, что делает ее внедрение в коммерческое авиастроение достаточно продолжительным процессом. Экономические оценки для различных производственных методов, доступных в конце 1980-х гг. с точки зрения производительности и стоимости, показали [36–38], что автоматическая выкладка не дает заметного увеличения производительности по сравнению с ручной формовкой. С учетом дополнительных капиталовложений в систему укладки, стоимость серийных деталей увеличилась для автоматизированной выкладки, однако авторы этих статей пришли к выводу, что автоматизация все же желательна из-за эффектов, которые не были учтены в их исследованиях, в том числе повышение надежности, стабильности свойств и снижение потерь материала.

Развитие технологии ATL с 1990-х гг. по настоящее время

Обогрев ленты в установках ATL введен в 1990-х гг. для решения проблем, возникающих при сложной укладке, что также позволяет контролировать липкость при выкладке крупных деталей [39]. В работе [40] обсуждается разработка совместной компоновки системы, в которой к оборудованию ATL добавлена система воздушного кондиционирования, позволяющая выкладывать ленту на формы со сложными контурами. Дальнейшие изменения в технологии ATL, включая уменьшение диаметра ролика для укладки со 150 до 50 мм, произведены для повышения маневренности оборудования при нанесении ленты на контуры деталей с кривизной более 30 градусов. Для обеспечения возможности выкладки на сложные геометрические формы, требовалось некоторое натяжение ленты, чтобы слои оставались ровными. Отмечено, что эффективная скорость выкладки составляла 13 м/мин и не изменилась по сравнению с самыми ранними сведениями, опубликованными в 1981 г.

Для того чтобы эффективно уменьшить последующее отверждение термореактивной ленты в процессе выкладки, был рассмотрен вопрос об оптимальных условиях обработки. Так, в работе [35] предложена система выкладки, в которой термореактивная лента нагревается до 150 °С и укладывается со скоростью 0,06 м/мин. Отмечено, что термореактивный материал достигает лишь ограниченной степени отверждения и последующее доотверждение все равно необходимо. При этом давление выкладки не зависело от количества слоев и незначительно зависело от диаметра головки и ориентации слоев. Наконец, авторы работы [35] пришли к выводу, что высокое избыточное давление может привести к расслоению препрега во время выкладки, так как слои ленты раздвигаются и разрываются перед и за прикатывающим роликом, прижимающим материал к форме, однако в представленном исследовании не рассматривалась липкость, которая могла бы предотвратить такие разрывы.

В работе [41] предложена модель лазерного нагрева термопластической ленты для обеспечения прямой выкладки и консолидации термопластических материалов, однако достаточно скоро выкладку таких материалов стали осуществлять по технологии AFP. Таким образом, с середины 1990-х гг. до настоящего времени дальнейшее развитие процесса ATL было довольно ограниченным, поскольку стали преобладать требования к производительности.

В патенте [42] представлена система, которая объединяет по крайней мере два рулона материала шириной 75, 150 или 300 мм в одной головке установки АТЛ, чтобы потенциально улучшить как производительность, так и скорость выкладки, хотя этот вариант можно рассматривать как систему выкладки по технологии АФР.

В патентах [43, 44] разработана технология раскроя для укладки лент по АТЛ-технологии для повышения производительности при обработке больших деталей с мелкими частями. Небольшие накладки из препрега предварительно нарезают с применением отдельной операции, хранят на подложке и заново наматывают на рулон. В этой системе используют две отдельные стороны головки установки для нанесения либо непрерывного слоя, либо небольших предварительно нарезанных участков препрега. Этот процесс часто называют двухфазной выкладкой, тогда как обычная выкладка является однофазной.

В настоящее время оборудование для АТЛ стало более разнообразным – разрабатываются машины, которые могут решать конкретные проблемы с выкладкой, а также обеспечивать очень высокую производительность. Технологию АТЛ можно считать высокопроизводительным процессом выкладки препрега, который широко используется, в частности, в аэрокосмической отрасли и в отраслях возобновляемой энергетики. Преимуществами такого процесса являются высокая скорость выкладки и механические свойства за счет использования препрега, возможность изготавливать крупные детали и обрабатывать материалы с большой поверхностной плотностью, а также упрощенное автономное программирование установок. К недостаткам можно отнести высокие начальные капитальные затраты, ограниченную геометрическую сложность изготавливаемых деталей и более высокий уровень потерь материала, чем у технологии АФР. Несмотря на потенциальные ограничения и сложности производства, к технологии АТЛ недавно возобновился интерес из-за ее высокой производительности, необходимой для производства плоских слоистых листов из ПКМ [45]. После укладки плоским слоистым листам из ПКМ можно придать желаемую форму путем горячего формования [46], используя конкурентоспособный по стоимости способ производства крупных композитных компонентов и материалов с высокой поверхностной плотностью препрега. Однако формование может отрицательно сказаться на механических характеристиках конструкции, например из-за сморщивания волокон, зазоров и нахлестов [6, 11].

Оборудование для технологии АТЛ

Технология АТЛ используется для изготовления множества деталей, таких как хвостовые плоскости, обшивка крыла [47, 48] и кесон центрального крыла [48, 49]. Основными производителями аэрокосмического оборудования для систем АТЛ являются компании MAGCincinnati (США), MTorres (Испания) и Forest-Liné (Франция), хотя последняя недавно приобретена компанией MAGCincinnati. Компании GFM (Германия), Mikrosam (Македония), Entec (США) и АТК (США) поставляют системы АТЛ, а компания Ingersoll (США) в настоящее время поставляет только системы АФР, но ранее поставляла и системы АТЛ.

Оборудование для технологии АТЛ чаще конструируют с горизонтальной балкой, с помощью которой можно выкладывать большие и легкие по форме изделия (рис. 1 и 2). Его, как правило, конструируют с рамой и роботизированной рукой с большим количеством степеней свободы, а также с вращающимся инструментом или их комбинацией [50].

Компания MAGCincinnati предлагает установку CHARGER, которая наносит слои из однонаправленной пропитанной ленты шириной 75, 150 или 300 мм. Слои ленты выкладывают по контурам и элементам с острыми углами – до 25 градусов.

Десятиосевая порталная система с ЧПУ автоматически накладывает, разрезает и удаляет ленту. В технологии используется уникальная конструкция головки с боковой загрузкой, которая обеспечивает быструю и простую замену рулонов ленты шириной до 300 мм и диаметром бобины 650 мм [8, 51].

Технология ATL компании Forest-Liné является уникальной для отрасли. Машина ATLAS с двумя головками выкладывает ленту шириной 305 мм через основную головку и ленту шириной 152,5 мм через вторичную головку, подаваемую кассетой, которая удерживает ленту с предварительно обрезанными краями [8, 52]. Предварительно нарезанную ленту подготавливают автономно на отрезном станке (Access) и хранят в кассете, что позволяет избежать простоев для резки и удаления обрезков. Нарезку ленты производят двумя ультразвуковыми ножами. Предварительно нарезанные ленты позволяют изготавливать любые детали для удовлетворения различных требований дизайна. Одна головка выкладывает ленту шириной от 76 до 305 мм, а другая – от 76 до 152,5 мм при скорости выкладки 60 м/мин с оптимизированным ускорением или замедлением. Четыре машины ATLAS и две машины Access компании Forest-Liné используются для сборки самых крупных деталей – крыльев самолета Boeing 787, производимых Mitsubishi Heavy Industries (МНН, Нагоя, Япония).

Установка ATLAS One от этой же компании является усовершенствованной машиной для резки и укладки лент на поверхность двойной кривизны, предназначенной для выкладки композитных деталей для гражданских или военных самолетов и ветряной энергетики. Компания предлагает высочайшую производительность при минимальном обслуживании. Машина содержит непрерывную шестиосевую головку с высокими динамическими характеристиками, два ультразвуковых резака, двухтактная функция которых позволяет выполнять резку нескольких сегментов. Система позволяет автоматически регулировать высоту резака и очищать его, а также проверять нахлесты и зазоры в процессе выкладки [53].

Технология компании North Thin Ply Technology (Ренан, Швейцария), известная своими ультратонкими мультиаксиальными препрегами марки ThinPreg, изготовленными для автоматизированного процесса, включающего запатентованное распределение волокон в сочетании с технологией автоматической выкладки ленты, позволяет производить ленты с поверхностной плотностью до 17 г/м². Ленты этой компании использовались для создания крыльев самолета Solar Impulse, который совершил кругосветный перелет на элементах, работающих на солнечной энергии. Компания также предлагает оборудование для выкладки лент [54].

Компания MТorres (Торрес-де-Элорз, Наварра, Испания) предлагает установку TORRESLAYUP – одиннадцатисосевую порталную высокоскоростную систему ATL, изначально разработанную для производства армированных углеродным волокном композитных аэроструктур. Каждое устройство разработано в виде модульной системы, спроектировано и построено в соответствии с требованиями заказчика с использованием имеющегося в продаже ЧПУ. Система обеспечивает максимально возможную уплотняющую способность в процессе выкладки, устраняя необходимость в частых циклах вакуумного уплотнения для достижения оптимального уплотнения ПКМ [8, 10]. Компания также представила новую увеличенную автоматизированную головку для системы ATL для массового производства плоских (2D) или слегка изогнутых деталей со скоростью 250 м²/ч. Предназначенная для снижения затрат на материалы и уменьшения продолжительности цикла, головка имеет запатентованную конструкцию с несколькими лентами, которая вмещает четыре ленты шириной 150 мм, создавая полосу шириной 600 мм [54].

Заключения

Автоматизированная выкладка находит все более широкое распространение в ряде отраслей благодаря потенциальной надежности и экономическим усовершенствованиям. Технология ATL разрабатывалась с 1970-х гг. как автоматизированная версия ручной выкладки ленты, которая обеспечивала бы высокую производительность и надежность для простых или несложных конструкций. Эта технология особенно эффективна для больших плоских деталей, с ее помощью, проведя небольшие модификации, можно изготавливать из препрегов заготовки композитных конструкций большой площади. Дальнейшие разработки в области изготовления изделий для возобновляемых источников энергии (например, производство лопастей ротора), вероятно, будут сделаны с помощью технологии ATL из недорогого препрега. В целом потенциальный прирост производительности для ATL-технологии ограничен из-за достаточной продолжительности усовершенствования установок.

В Российской Федерации разработкой, проектированием и изготовлением опытных автоматизированных установок для намотки и выкладки препрегов для заготовок деталей из ПКМ в течение 10 лет занимается ООО «НПП ВИАУС». Во ФГУП «ВИАМ» разработан материал (в виде препрега), пригодный для автоматизированной выкладки лент по технологии ATL. Испытания материала прошли успешно на одном из предприятий, которое занимается изготовлением конструкций из ПКМ.

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. Crosky A., Grant C., Kelly D., Legrand X., Pearce G. Fibre placement processes for composites manufacture // Advances in Composites Manufacturing and Process Design / ed. Ph. Boisse. Woodhead Publishing, 2015. P. 79–92.
8. Compositesworld: 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: 31.10.2020).
9. Gutowski T.G. Advanced composites manufacturing. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1997. 600 с.
10. 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).
11. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., 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.

12. Composite tape laying machine with pivoting presser member: pat. US4627886A; filed 30.05.85; publ. 09.12.86.
13. Composite tape laying machine and method: pat. US4557783A; filed 05.12.83; publ. 10.12.85.
14. Tete enrubanneuse pour l'application de bande en materiau composite: pat. EP1097799A1; filed 08.11.00; publ 09.05.01.
15. Machine for applying composite and presser assembly therefor: pat. EP0371289B1; filed 08.11.89; publ. 06.06.90.
16. Method and apparatus for laying composite material: pat. EP0644040A1; filed 08.11.94; publ. 22.03.95.
17. Lengsfeld H., Wolff-Fabris F., Krämer J., Lacalle J., Altstädt V. Composite Technology: Prepregs and Monolithic Part Fabrication Technologies. Hanser Publications, 2015. 223 p.
18. Land I.B. Design and manufacture of advanced composite aircraft structures using automated tow placement: master thesis. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996. 91 p.
19. Colton J.S., Baxter J., Behlendorf J., Tabassum H. et al. The automation of the lay-up and consolidation of PEEK/graphite fiber composites // *Advanced Manufacturing Processes*. 1987. Vol. 2 (1). P. 1–22.
20. Lamontia M.A., Gruber M.B., Waibel B.J. Conformable compaction system used in automated fiber placement of large composite aerospace structures // *Proceedings of the 23rd Sampe conference*. Paris, 2002. P. 745–756.
21. Apparatus for making laminated structural shapes by the controlled detrusive placement and polymerization of tectonic filamentous tapes: pat. US3574040A; filed 29.06.61; publ. 06.04.71.
22. Geodesic path length compensator for composite-tape placement method: pat. US3810805A; filed 14.04.72; publ. 14.05.74.
23. Huber J. Automated lamination of production advanced composite aircraft structures // *SAE Transactions*. 1981. Vol. 90. P. 1794–1803.
24. Grimshaw M.N. Automated tape laying // *Composites*. 2001. Vol. 21. P. 480–485.
25. Eaton H.L. Cost effective tape laying // 29th National SAMPE symposium. Reno, 1984. P. 34–42.
26. Saveriano J.W. Automated contour tape laying of composite materials // 16th National SAMPE technical conference. Albuquerque, 1984. P. 126–139.
27. Stone K.L. Automation in composite processing // 29th National SAMPE symposium. Reno, 1984. P. 1489–1498.
28. Albus J.S. Research issues in robotics // 16th National SAMPE technical conference. Albuquerque, 1984. P. 1–16.
29. Wang E.L., Gutowski T. Laps and gaps in thermoplastic composites processing // *Composites Manufacturing*. 1991. Vol. 2 (2). P. 69–78.
30. Meier R.A. An advanced control system for composite material placement // 31st International SAMPE symposium. Covina, 1986. P. 536–549.
31. 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.
32. Composite tape placement apparatus with natural path generation means: pat. US4696707A; filed 21.10.85; publ. 29.09.87.
33. Head for applying composite strips: pat. FR2713213A1; filed 30.11.93; publ. 09.06.95.
34. Olsen H.B., Craig J.J. Automated composite tape layup using robotic devices // *IEEE international conference on robotics and automation*. Atlanta, 1993. P. 291–297.
35. Sarazin H., Springer G.S. Thermochemical and mechanical aspects of composite tape laying // *Journal of Composite Materials*. 1995. Vol. 29. P. 1908–1943.
36. Krolweski S., Gutowski T. Effect of the automation of advanced composite fabrication processes on part cost // *Sample Journal*. 1987. Vol. 23 (3). P. 21–26.
37. Krolewski S., Gutowski T. Economic comparison of advanced composite fabrication technologies // 34th International SAMPE symposium. Covina: SAMPE, 1989. Vol. 34. P. 329–340.

38. Foley M.F. Techno-economic analysis of automated composite manufacturing techniques // 22nd International SAMPE technical conference. Boston, 1990. P. 759–773.
39. Control of radiation heating system for thermoplastic composite tape: pat. US5177340A; filed 23.01.89; publ. 05.01.93.
40. Benda B.J., Stump K.H. A case study of contoured tape laying // American Helicopter Society 52nd Annual Forum. Washington, 1996. P. 603–610.
41. Grove S.M. Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre reinforced thermoplastic // Composites. 1988. Vol. 19 (5). P. 367–375.
42. Head for application of carbon-fibre strips and application method: pat. WO2008020094A1; filed 08.08.06; publ. 21.02.08.
43. Device for separating and discharging trimmings cut in a pre-impregnated strip: pat. WO2008/135645A1; filed 02.04.07; publ. 13.11.08.
44. Composite lay-up head with a retractable device for separating a prepreg from its support tape: pat. WO2008/142273A2; filed 04.05.07; publ. 27.11.08.
45. Larberg Y.R., Ekermo M. On the interply friction of different generations of carbon/epoxy prepreg systems // Composite Part A – Applied Science and Manufacturing. 2011. Vol. 42 (9). P. 1067–1074.
46. Gutowski T.G., Dillon G., Chey S., Li H. Laminate wrinkling scaling laws for ideal composites // Composites Manufacturing. 1995. Vol. 6 (3–4). P. 123–134.
47. Evans D.O., Vaniglia M.M., Hopkins P.C. Fiber placement process study // 34th International SAMPE symposium. Covina, 1989. P. 1822–1833.
48. Thomas J. The A380 programme – the big task for Europe’s aerospace industry // Air Space Europe. 2001. Vol. 3 (3/4). P. 35–39.
49. Hinrichsen J., Bautista C. The challenge of reducing both airframe weight and manufacturing cost // Air Space Europe. 2001. Vol. 3 (3/4). P. 119–121.
50. Grimshaw M.N., Grant C.G., Diaz J.M.L. Advanced technology tape laying for affordable manufacturing of large composite structures // 46th International SAMPE symposium. 2001. P. 2484–2494.
51. Fives: Cincinnati CHARGER™ Станок для выкладки композитных лент. URL: <https://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/ru/oborudovanie/kompozity/stanki-dlja-vykladki-kompozitnykh-lent/cincinnati-chargertm.html> (дата обращения: 12.10.2020).
52. Fives: Forest-Liné ATLAS. URL: <https://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/products/composites/tape-layer-systems/forest-line-atlas.html> (дата обращения: 22.10.2020).
53. Fives: Forest-Liné ATLAS One. URL: <https://metal-cutting-composites.fivesgroup.com/products/composites/tape-layer-systems/forest-line-atlas-one.html> (дата обращения: 22.10.2020).
54. Compositesworld: Trends in automation: ATL and AFP technologies increase speed, flexibility. URL: <https://www.compositesworld.com/articles/trends-in-automation-atl-and-afp-technologies-increase-speed-flexibility> (дата обращения: 12.10.2020).