

УДК 678.8

П.Н. Тимошков¹, В.А. Гончаров¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКЕ ПРЕПРЕГОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-46-55

К основным технологическим факторам при использовании технологий автоматизированной выкладки лент (ATL) и волокон (AFP) относятся температура материала, скорость выкладки, давление прикатки и отсутствие отклонений от требуемой траектории выкладки. Рассмотрено влияние указанных технологических факторов на некоторые характеристики полимерных композиционных материалов. Оптимальная температура выкладки должна обеспечить требуемую адгезию, скорость выкладки – нагрев материала без потери его технологических свойств, а давление прикатки при выкладке – оптимальную пористость и толщину материала.

Ключевые слова: технологические параметры, автоматизированная выкладка, препрег, полимерные композиционные материалы, дефекты, автоматизированная выкладка лент (ATL), автоматизированная выкладка волокон (AFP).

P.N. Timoshkov¹, V.A. Goncharov¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrulkov¹

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN AUTOMATED LAYUP OF PREPREGS (review)

The main technological factors when using ATL and AFP technologies are material temperature, laying speed, rolling pressure and no deviation from the required laying trajectory. The article discusses the influence of technological factors on some characteristics of polymer composite materials. The optimum laying temperature should provide the required adhesion. The rate of laying should provide heating of the material without its technological properties. The rolling pressure during laying should ensure optimal porosity and thickness of the material.

Keywords: technological parameters, automated layout, prepreg, polymer composite materials, defects, automated tape laying (ATL), automated fiber placement (AFP).

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

Наряду с коммерциализацией углеродных волокон в 1966 г. [1] предприняты попытки автоматизировать процесс укладки с целью повышения его производительности по сравнению с ручной выкладкой [2–5]. Поэтому новые автоматизированные технологии, такие как намотка волокон [6], пултрузия, автоматизированная выкладка ленты (Automated Tape Laying – ATL) [7, 8] и волокон (Automated Fiber Placement – AFP), внедрены для преодоления многих ограничений (например, низкой производительности), которые повлияли на традиционные методы ручной укладки и вакуумной упаковки. Перед намоткой на вращающуюся оправку волокна смачиваются смолой. Этот

процесс подходит для труб и сосудов под давлением [9], но не для открытых конструкций. Однако при наличии машины с достаточным количеством степеней свободы можно производить более сложные и менее симметричные формы. Кроме того, сложно использовать намотку волокон для получения детали с равномерно распределенными волокнами и содержанием смолы по всей толщине полимерного композиционного материала (ПКМ) [9, 10]. Технология намотки нити автоматизирована и имеет высокую повторяемость, что делает ее рентабельной. Данный метод позволяет производить конструкции с относительно высокой прочностью при сохранении объемной доли волокна на уровне 60 %. Этот процесс имеет дополнительное преимущество в обеспечении повышенной прочности при скручивании при испытании валов благодаря размещению волокон в осевом направлении [10].

Технология ATL является наиболее эффективным методом размещения широких лент на больших плоских или минимально изогнутых поверхностях. В начале 1970-х гг. значительная часть машин, используемых при ATL, была разработана авиакосмическими производителями и исследовательскими институтами. Одно из основных ограничений этих систем – низкая скорость выкладки, в связи с чем их производительность была ограниченной [7]. В 1980-х гг. технология ATL стала более распространенной, поскольку ограничения в скорости и производительности были преодолены, и впоследствии данный метод стал использоваться для изготовления изделий и конструкций более сложных геометрических форм. Однако в конце 1980-х гг. задача выравнивания слоев становится более острой [8]. Далее, в 1990-х гг., введено нагревание ленты для решения проблем при выкладке сложных ПКМ, а также для контроля липкости при выкладке крупногабаритных деталей [11, 12]. С середины 1990-х гг. до настоящего времени разработки технологии ATL в основном ограничивались требованиями к производительности. Тем не менее иногда более медленный процесс является лучшим выбором для изготовления деталей, так как дублирование сложных контуров может иметь более важное значение, чем высокая производительность [8]. Технология AFP – это гибридный процесс, который имеет преимущества технологии намотки волокон и технологии ATL и который применяют для изготовления как плоских, так и цилиндрических конструкций. В технологии AFP можно использовать несколько жгутов с небольшой шириной. Кроме того, длина выкладываемых лент может быть короче, поэтому ими легко манипулировать, особенно при размещении их на контурных или криволинейных поверхностях. Это существенно упрощает изготовление жесткого ПКМ благодаря размещению волокон в разных направлениях. Технология AFP менее чем за два десятилетия произвела революцию в производстве композитных конструкций для авиакосмической промышленности благодаря улучшенному качеству выкладываемого ПКМ, точности и высокой производительности данного метода [13], что также значительно снизило затраты на материалы и рабочую силу [14].

Существует несколько видов машин, используемых при AFP, в зависимости от конкретных потребностей – размера будущей детали, ее геометрической формы и типа материала. Установка для применения AFP состоит из укладочной головки и роботизированной руки, которые управляются компьютером с помощью передовых пакетов программного обеспечения [15, 16]. Несколько этапов производства, включая укладку, отверждение или плавление и уплотнение волокон, объединяются в укладочной головке, тем самым повышая производительность этого метода [17]. При выполнении укладки укладочная головка выкладывает узкие жгуты препрега при воздействии температуры и давления. Уплотняющий ролик создает давление, которое выдавливает воздух из композитной структуры. В качестве источника температуры для плавления или отверждения

препрегов используют горячий газ или лазерную систему. Ввиду универсальности управления технология AFP имеет более широкий спектр применения, а также новые уровни производительности в аэрокосмической промышленности и в производстве лопаток турбин для ветроэнергетики. Применение ПКМ в автомобилестроении, ветроэнергетике, авиакосмической и нефтегазовой промышленности, сосудах высокого давления, медицинских и спортивных товарах расширяется благодаря такому присущему им преимуществу, как низкая плотность [18–21]. В частности, самолеты, в которых используется большое количество легких композитных материалов, потребляют меньше топлива, его экономия составляет до 18 % [9, 22, 23]. Технология AFP широко применяется для изготовления высокоточных конструкций, таких как обшивка крыльев, носовые конусы фюзеляжа и топливные баки, в космических аппаратах будущего [24]. Значительная часть машин, используемых при AFP, предназначена для изготовления больших конструкций, таких, например, как цельные панели фюзеляжа или обшивки крыла. Однако в настоящее время внимание уделяется разработке инструментов и методов обработки мелких, крупных и сложных деталей [24].

Технология AFP сопряжена с рядом проблем, связанных с технологическим процессом и материалами, которые необходимо учитывать при производстве компонентов и обработке материала. Задача данного метода состоит в том, чтобы полностью уложить препреги с заданной ориентацией волокон без дефектов. Успешное размещение волокон без дефектов зависит от многих параметров – геометрических размеров пресс-формы, ширины ленты и ориентации волокна [6]. На плоских поверхностях процесс размещения часто можно реализовать без зазоров и нахлестов. Однако основная проблема возникает в случае выкладки заготовок конструкций сложной формы.

Как правило, образовавшиеся дефекты приводят к простою в процессе выкладки, из-за чего волокна искажаются на концах и, следовательно, снижаются механические свойства ПКМ [25].

Общие проблемы в производстве на основе технологии AFP

Несмотря на то, что технология AFP повысила производительность крупномасштабного производства композитов, где необходимы эффективность и точность выкладки препрегов, однако, как и в случае с другими технологиями, получение бездефектных композиционных материалов является проблемой, которую необходимо решать. Автоматизированная выкладка волокон – это сложный нелинейный многомерный процесс, требующий определения большого количества параметров, от правильного выбора которых зависят качество и целостность конструкции. Некоторые параметры, такие как скорость подачи материала, температура отверждения или плавления, давление и скорость выкладки, могут влиять на три различные стадии – на начало процесса, саму выкладку и окончание процесса (рис. 1), а также на качество производимого материала. Следовательно, правильный выбор этих переменных параметров и их влияния приведет к повышению качества и оптимизации производственного процесса [26].

Скорость выкладки, температура отверждения или плавления и давление, прикладываемое при выкладке материала на подложку, являются тремя основными параметрами, которые необходимо оптимизировать для надежного производства ПКМ с использованием технологии AFP [27–29]. Неправильный выбор данных параметров может привести к расслоению или появлению пор в ПКМ. Поддержание низкого уровня пор в ПКМ имеет решающее значение для многих промышленных конструкций. Наличие таких дефектов приводит к внезапной потере несущей способности конструкции в связи с изменением момента инерции в зоне дефекта [30, 31].



Рис. 1. Распространенные проблемы во время процесса выкладки волокон при использовании технологии AFP

В работе [27] проведено всестороннее исследование с целью разработки метода определения оптимальных контролируемых параметров процесса для получения максимальной адгезии и минимизации продолжительности производства. Исследовали препрег на основе непрерывного углеродного волокна и термопластичной матрицы. При постоянной силе уплотнения регулировали скорость выкладки и температуру. Качество готового материала охарактеризовано по трем параметрам: степени деструкции полимера, содержанию межслойных пор в ПКМ и изменению размеров волокна в процессе уплотнения. Обнаружено, что деструкция полимера происходит в результате длительного воздействия на препрег экстремально высоких температур при выкладке. Она отрицательно сказывается на свойствах и характеристиках готового ПКМ из-за превышения температуры стеклования полимера.

В статье [32] также проведен качественный анализ содержания пор после разрушающих нагрузок как при комнатной, так и при повышенных температурах. Показано, что поры обычно имеют небольшую глубину, но большой диаметр в плоскости. Содержание пор оказалось самым высоким при комнатной температуре и снижалось с повышением температуры.

Влияние скорости выкладки на свойства ПКМ

В исследовании, проведенном в работе [28], обнаружено, что более низкая скорость выкладки ленты приводит к более высокой прочности при межслойном сдвиге термопластичных препрегов благодаря увеличению продолжительности и интенсивности нагрева, а также диффузии полимера через поверхность раздела фаз, в то время как более высокая температура ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$) приводит к разрушению полимера и, следовательно, к снижению этой прочности.

В статье [27] описано влияние скорости выкладки и количества уложенных друг на друга слоев препрега на адгезию, образование пор, степень разрушения и плотность композитов. Согласно различным исследованиям, адгезия обычно увеличивается с возрастанием количества уложенных слоев при низких скоростях укладки (10 мм/с), достигая максимального значения при скорости 20–30 мм/с, и уменьшается при более высокой скорости выкладки. Для первых нескольких слоев (до четырех) форма является

относительно холодной, поэтому полимер остается неиницированным в течение всего процесса, поскольку его температура ниже температуры плавления связующего. С увеличением количества уложенных друг на друга слоев форма оказывает меньшее влияние на охлаждение слоев препрега и температура препрега становится намного ближе к температуре плавления материала. Однако повышение скорости выкладки сопровождается уменьшением адгезии между слоями и образованием пор. Это связано с недостаточной продолжительностью нагрева для расплавления связующего на границе раздела фаз. С увеличением скорости выкладки уменьшается продолжительность воздействия температуры, что снижает степень деградации материала. Однако с возрастанием числа слоев в них накапливается больше тепла, что приводит к повышению уровня разрушения ПКМ. Кроме того, при увеличении количества выложенных друг на друга слоев аккумулированное тепло внутри ПКМ повышается – таким образом, доля пор уменьшается из-за оптимального уплотнения.

Влияние температуры нагрева выкладываемой ленты на свойства ПКМ

В работе [33] показана взаимосвязь между температурой и порообразованием. В своем эксперименте авторы изучили два квазиизотропных ПКМ ($[0/\pm 45/90]_{3s}$), состоящих из 24 слоев препрегов безавтоклавного отверждения. Сила уплотнения составляла 181,4 Н для обоих материалов, при этом использовали разные значения температуры: 30 и 60 °С. Полученные результаты показывают, что содержание пор увеличивается с 0,05 до 0,56 % при повышении температуры. По мнению авторов работы [33], более высокая температура делает ленту мягче при укладке. Таким образом, при сжатии ширина входящей ленты увеличивается, а следующая лента имеет другую ширину. Это приводит к образованию зазоров и нахлестов между соседними лентами в одном слое и, как следствие, к появлению пор и пустот в ПКМ. В большей части исследований, касающихся использования лазерного нагрева для автоматизированной выкладки, доказано, что диодные лазеры ближнего инфракрасного диапазона обеспечивают лучшие тепловые потоки, чем диодные лазеры дальнего диапазона. Кроме того, лазерные системы могут мгновенно контролировать температуру [34]. Тем не менее в работе [28] указано, что в соответствии с требованиями аэрокосмической отрасли отвержденная с помощью лазера деталь все еще требует дополнительного отверждения в автоклаве для достижения оптимального уровня прочности при межслойном сдвиге.

В исследовании, проведенном в работе [35], показано, что при использовании лазерной автоматизированной выкладки волокон (LAFP) имеет место отверждение более низкого качества, чем при применении традиционных методов. Кроме того, лента разуплотняется в процессе лазерного нагрева и внутри ПКМ образуется высокое содержание пор, что связано с недостаточным количеством смолы для прилипания ленты к ранее уложенному слою. В технологии AFP плотный контакт имеет важное значение в процессе выкладки, отверждения и образования межслойных пор.

Влияние давления на свойства ПКМ

Для определения взаимосвязи между параметрами процесса и прилагаемой силой уплотнения, в работе [29] использовали блок управления и датчик давления для контроля и управления силой уплотнения. Датчик давления Tekscan-5051 помещали на оснастку на расстоянии 30 мм от начальной точки процесса выкладки для измерения фактической силы давления при каждом проходе. В данном эксперименте рассматривались три параметра для серии из 18 проходов: скорость укладки (мм/с), сила уплотнения (Н) и демпфирование (%). Разница между входными параметрами блока управления в машине, используемой при AFP, которые задаются пользователем, по сравнению

с параметрами, зарегистрированными датчиком давления, значительная – до 100 Н: при заданных параметрах 16; 48,5 и 95 Н измеренные составили 100, 300 и 500 Н соответственно.

Влияние силы уплотнения на толщину ПКМ исследовано в статье [27]. Авторы предполагают, что, с одной стороны, для получения требуемой адгезии при размещении нескольких слоев для данной толщины композита необходимо увеличить силу уплотнения. Однако повышенное давление приводит к уменьшению толщины всего ПКМ. С другой стороны, снижение силы уплотнения приводит к более высокому содержанию пор в материале. Предложенный возможный подход для решения этой проблемы заключается в увеличении скорости укладки. В работе [32] исследована плотность отвержденных препрегов. Разработан новый метод, чтобы найти зависимость между поперечным расширением и уплотнением. Образцы, использованные в экспериментах, изготовили из углеродных эпоксидных препрегов толщиной 0,125 и 0,184 мм. Для того чтобы исследовать эту зависимость, использовали три различных варианта укладки слоев: $[90/0]_8$, $[90_4/0_4/90_4/0_4]$ и $[90_2/0_2/90_2/0_2]_2$. Испытания проводили с применением динамического механического анализатора в программе изотермического уплотнения с контролем нагрузки [36]. Эксперименты выявили заметную зависимость толщины материала и продольного расширения после механических нагрузок от силы уплотнения.

Несмотря на то, что образцы с первым вариантом укладки не показали существенного продольного расширения, образцы со вторым и третьим вариантом укладки продемонстрировали значительную текучесть при сжатии. С повышением температуры до 60–70 °С деформации в этих образцах неуклонно возрастали. Образцы, испытанные при более высоких температурах, не показали дальнейшего увеличения ширины. Точно так же предел расширения зависит от образца. Это указывает на то, что вероятной причиной уплотнения и расширения является переход от сжатия (когда смола может выходить из слоя без смещения волокон) к истекающему потоку (когда поток смолы толкает волокна в поперечном направлении, заставляя систему деформироваться не сжимаясь) [32, 36]. Предположение о несжимаемости подразумевает, что приложенные по толщине деформации эквивалентны поперечным деформациям для слоя или блока слоев. Соответственно, при увеличении толщины слоя отношение ширины образца к его толщине снижается, а поперечные деформации увеличиваются, что приводит к большему растеканию образцов со вторым вариантом укладки при данной температуре. Показано также, что уплотнение и расширение не зависят от температуры, которая выше определенной температуры (~70 °С), тогда как уплотнение зависит от температуры, находящейся в диапазоне от 30 до 60 °С [32].

Зависимость между силой уплотнения и наличием пор также является важной проблемой, которую оценивают в работе [33]. В этом исследовании ПКМ из углепластика изготовлены с использованием безавтоклавных препрегов. Применяли три различных по величине силы уплотнения (181,4; 272,2 и 362,9 Н) при постоянной температуре 60 °С. Обнаружено, что с увеличением силы уплотнения содержание пор в слоистых материалах возросло на 0,58; 0,85 и 1,1 % соответственно. Это произошло потому, что при сжатии ширина ленты может увеличиваться, в то время как в последующих слоях она может отличаться от расчетной. Таким образом, между соседними лентами образуются зазоры и нахлесты, что приводит к наличию пустот в отвержденных ПКМ.

Дефекты, вызванные программным управлением при выкладке

С помощью автоматизированной выкладки можно изготавливать детали с переменной жесткостью благодаря размещению волокон при различной ориентации, однако определение траектории поворота – трудная задача вследствие сложной геометрической

формы детали. Это одна из общих проблем при изготовлении цилиндрических конструкций, таких как фюзеляжи самолетов [37] и топливные баки, для будущих ракет-носителей. Согласно исследованию, проведенному в работе [38], рассогласование выкладки и заданной программы происходит, когда угловая ориентация волокон непрерывно изменяется от 10 до 45 градусов вдоль верха цилиндрической оболочки в обе стороны. Возможность обрезки и перезапуска в автоматических машинах выкладки волокон устраняет этот эффект [39]. Однако, согласно работе [40], после разрезания жгута укладочная головка не контролирует его размещение. Таким образом, пока машина движется по заданному курсу, обрезанные волокна не следуют точно по новому управляемому курсу и имеют тенденцию отклоняться от намеченного пути. Во избежание этого требуется хороший программный код для создания точной криволинейной управляемой траектории для укладочной головки. Кроме того, для достижения относительно постоянных зазоров или нахлестов между выложенными лентами предложено несколько вариантов выкладки. В соответствии с этими вариантами рассчитывают количество рядов по окружности, количество волокон в каждом ряду, углы ориентации волокна и, наконец, параметр сдвига между последовательными рядами. При подборе оптимальных значений этих величин увеличиваются трудозатраты и продолжительность отработки на этапе освоения производства.

В настоящее время в научно-технической литературе представлено два общих способа выкладки по технологии AFP – по параллельной [41] и смещенной траектории (рис. 2) [42]. При параллельной выкладке траектория определяется математически, чтобы не было зазора между дорожками выкладки. Следовательно, можно получить слой постоянной толщины. Однако, по мнению авторов работы [41], изготовление ПКМ переменной жесткости с использованием такой выкладки затруднено.

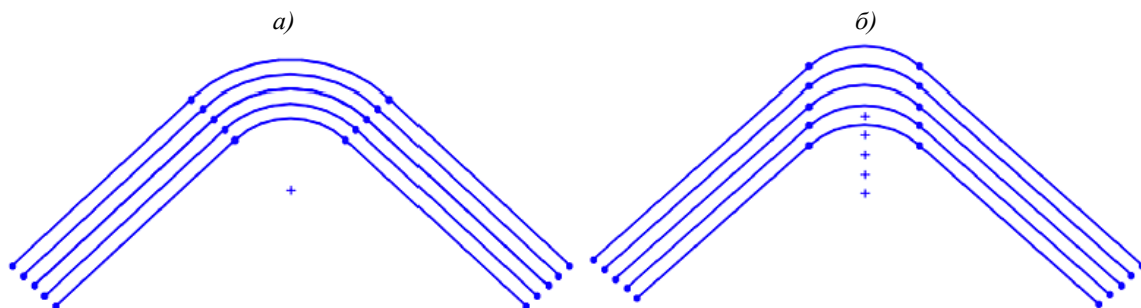


Рис. 2. Траектории выкладки волокна – параллельная (а) и смещенная (б) [43]

В работе [44], напротив, показано, что использование смещенной траектории выкладки является более эффективным способом изготовления ПКМ. Однако вращение укладочной головки вызывает некоторое перераспределение волокон внутри жгута и, как следствие, приводит к образованию зазоров или нахлестов между соседними жгутами. По данным работы [42], размещение волокон по такой траектории приводит к складкам их внутреннего края, а следовательно, к изменению длины и ширины кромки. Поэтому кривизна пути выкладки должна быть как можно меньше.

Заключения

Одним из перспективных направлений развития производственных технологий нового поколения является разработка автоматизированных комплексов по изготовлению деталей из ПКМ методами выкладки и намотки, а также материалов для реализации этих процессов.

При проектировании конструкций из ПКМ и отработке автоматизированных технологий необходимо исследовать влияние возникающих при производстве дефектов на свойства и геометрические размеры будущей детали. Следует также учитывать технологические параметры автоматизированной выкладки: температуру, скорость выкладки, силу уплотнения волокна при выкладке, которые влияют на многие характеристики готового ПКМ (пористость, плотность, толщину, прочность при межслойном сдвиге и т. п.).

Варьируя эти параметры и находя оптимальное их значение и соотношение, можно получить удовлетворительный по качеству материал.

Библиографический список

1. Dorey G. Carbon fibres and their applications // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1987. Vol. 20. P. 245–256.
2. Grant C. Automated processes for composite aircraft structure // *Industrial Robot*. 2006. Vol. 33(2). P. 117–121.
3. Composite tape laying machine with pivoting presser member: pat. US 4627886A; filed 06.04.71; publ. 09.12.86.
4. Geodesic path length compensator for composite-tape placement method: pat. US 3810805A; filed 14.04.72; publ. 14.05.74.
5. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2 (41). С. 35–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-35-39.
6. Lossie M., van Brussel H. Design principles in filament winding // *Composites Manufacturing*. 1994. Vol. 5 (1). P. 5–13.
7. Huber J. Automated lamination of production advanced composite aircraft structures // *SAE International Congress and Exposition*. 1981. Vol. 90. P. 1794–1803.
8. Lukaszewicz D.H.J.A., Ward C., Potter K.D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future // *Composites. Part B: Engineering*. 2012. Vol. 43 (3). P. 997–1009.
9. Introduction to composite materials and smart structures // *Structural health monitoring of composite structures using fiber optic methods* / ed. B.G. Prusty, G. Rajan. New York: CRC Press, 2016. 491 p.
10. Mazumdar S.K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. CRC Press LLC, 2002. 416 p.
11. 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: 12.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
12. Орлов Е.В., Гусев Ю.А., Хрульков А.В., Коротков И.А. Сравнительный анализ методов определения липкости препрега // *Труды ВИАМ*. 2016. № 7 (43). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-9-9.
13. Béland S. High performance thermoplastic resins and their composites. Noyes Data Corp, 1990. 181 p.
14. August Z., Ostrander G., Michasiow J., Hauber D. Recent development in automated fibre placement of Thermoplastic composites // *SAMPE*. 2014. Vol. 50 (2). P. 30–37.
15. Stokes-Griffin C.M., Compston P. Laser-assisted tape placement of thermoplastic composites: The effect of process parameters on bond strength // *Sustainable Automotive Technologies 2013*. New York: Springer, 2014. P. 295.
16. Stokes-Griffin C.M., Compston P. The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of carbon fibre–PEEK manufactured using a laser tape placement process // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2015. Vol. 78. P. 274–283.

17. Chauncey Wu K., Stewart B.K., Martin R.A. ISAAC – A Testbed for Advanced Composites Research // The Second International Symposium on Automated Composites Manufacturing. 2015. P. 1–10.
18. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
19. Kablov E.N., Chursova L.V., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Rubtsova E.V., Petrova A.P. A Study of Epoxide–Polysulfone Polymer Systems for High-Strength Adhesives of Aviation Purpose // Polymer Science. Series D. 2017. Vol. 10. No. 3. P. 225–229.
20. Каблов Е.Н., Шульдешов Е.М., Петрова А.П., Лаптева М.А., Сорокин А.Е. Зависимость комплекса свойств звукопоглощающего материала типа ВЗМК от концентрации гидрофобизирующего состава на основе кремнийорганического герметика // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-41-49.
21. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезистивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоматического формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.02.2021). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
22. Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности состава полимерной матрицы и схем армирования трансмиссионных валов из полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96.
23. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Трансмиссионные валы из углепластика. Материалы и технологии (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-46-53.
24. Di Francesco M., Giddings P., Potter K. On the layup of convex corners using Automated Fibre Placement: an evaluation method // The Second International Symposium on Automated Composites Manufacturing. 2015. P. 1–10.
25. Woigka W., Halletta S.R., Jonesa M.I. et al. Experimental investigation of the effect of defects in Automated Fibre Placement produced composite laminates // Composite Structures. 2018. Vol. 201. P. 1004–1017.
26. 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. Is. 5. P. 484–491.
27. Pitchumani R., Gillespie Jr.J.W., Lamontia M.A. Design and optimization of a thermoplastic tow-placement process with in-situ consolidation // Journal of Composite Materials. 1997. Vol. 31. Is. 3. P. 244–275.
28. Qureshi Z., Swait T., Scaife R., El-Dessouky H.M. In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: potential and possibilities // Composites. Part B: Engineering. 2014. Vol. 66. P. 255–267.
29. Bendemra H., Vincent M.J., Compston P. Optimisation of compaction force for automated fibre placement // 8th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM 8). Melbourne: Engineers Australia, 2014. P. 957–965.
30. Senthil K., Arockiarajan A., Palaninathan R. et al. Defects in composite structures: Its effects and prediction methods – a comprehensive review // Composite Structures. 2013. Vol. 106. P. 139–149.
31. Bolotin V.V. Delaminations in composite structures: Its origin, buckling, growth and stability // Composites. Part B: Engineering. 1996. Vol. 27. Is. 2. P. 129–145.
32. Nixon-Pearson O.J., Belnoue J.P.-H., Ivanov D.S., Hallett S.R. The compaction behavior of un-cured prepregs // The 20th International Conference on Composite Materials. Copenhagen, 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/303880867_THE_COMPACTON_BEHAVIOUR_OF_UN-CURED_PREPREGS (дата обращения: 29.03.2021).

33. Sun H., Godin D., Dong A. et al. Effect of Process Parameters on the Quality of Laminates made by Automated Fiber Placement (AFP) Using Out-Of- autoclave (OOA) Prepregs // 17th European Conference on Composite Materials. 2016. P. 1–12.
34. Khan M.A., Mitschang P., Schledjewski R. Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process // Advances in Polymer Technology. 2010. Vol. 29. Is. 2. P. 98–111.
35. Çelik O., Peeters D., Dransfeld S., Teuwen J. Intimate contact development in laser assisted fiber placement. Microstructure and effect of process parameters // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020. Vol. 134. P. 1–13.
36. Ivanov D., Li Y., Ward C., Potter K. Transitional behaviour of prepregs in Automated fibre deposition processes // The 19th International Conference on Composite Materials. 2013. P. 1–11.
37. Ilcewicz L.B., Murphy B. Safety & Certification Initiatives for Composite Airframe Structure // 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference. 2005. P. 1–12.
38. Chauncey Wu K. Design and Analysis of Tow-Steered Composite Shells Using Fiber Placement // American Society for Composites 23rd Technical Conference. United State of America, 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/273144777_Design_and_Analysis_of_Tow-Steered_Composite_Shells_Using_Fiber_Placement (дата обращения: 30.03.2021).
39. Measom R., Sewell K. Fiber placement low-cost production for complex composite structures // Proceedings. American Helicopter Society International Annual Forum. Washington, 1996. Vol. 52. Is. 1. P. 611–622.
40. Wu K., Tatting B., Smith B. et al. Design and Manufacturing of Tow-Steered Composite Shells Using Fiber Placement // 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston, 2009. P. 1–18.
41. Tatting B.F., Gürdal Z. Automated finite element analysis of elastically-tailored plates // NASA Scientific and Technical Information. 2003. P. 1–47.
42. Kim B.C., Hazra K., Weaver P., Potter K. Limitations of fibre placement techniques for variable angle tow composites and their process-induced defects // 18th International Conference on Composite Materials. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/259267107_Limitations_of_fibre_placement_techniques_for_variable_angle_tow_composites_and_their_process-induced_defects (дата обращения: 30.03.2021).
43. 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.
44. Langley P. Finite element modeling of tow-placed variable-stiffness composite laminates. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999. 127 p.