

УДК 678.747.2

П.Н. Тимошков¹, В.А. Гончаров¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹**ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ И НАХЛЕСТОВ ПРИ ВЫКЛАДКЕ ПРЕПРЕГОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-71-78

Рассматриваются дефекты, возникающие при выкладке в процессе изготовления полимерных композиционных материалов, такие как зазоры и нахлесты, и их влияние на прочность и жесткость. Предложены некоторые пути оптимизации и моделирования процесса для прогнозирования физико-механических характеристик материала. Результаты рассмотренных зарубежных работ показали, что прочность материала может снижаться. Однако следует учитывать, что при подборе оптимального режима отверждения зазоры и нахлесты будут изменять толщину монослоя, практически не влияя на прочность материала.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, зазоры, нахлесты, дефекты, ATL, AFP, автоматизированная выкладка.

P.N. Timoshkov¹, V.A. Goncharov¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrulkov¹**EFFECT OF GAPS AND OVERLAPS WHEN LAYING PREPREGS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON PLASTICS (review)**

This review examines the defects arising during the lay-up of polymer composites during the manufacturing process, such as gaps and overlaps, and their effect on strength and rigidity. Some ways to optimize and simulate the process to predict the physicomachanical characteristics of the material are proposed. The results of the reviewed foreign studies have shown that the strength of the material may decrease. However, it should be borne in mind that when selecting the optimal curing mode, the gaps and overlaps will change the thickness of the monolayer, practically without affecting the strength of the material.

Keywords: polymer composite materials, gaps, overlaps, defects, ATL, AFP, automatic placement.

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

Введение

В настоящее время применение композиционных материалов становится все более широким. В авиации они применяются для обшивки, лонжеронов, панелей, частей двигателей самолета, в автомобильной промышленности – для облегчения массы кузова, в строительстве из композитов изготавливают мосты, конструкции высотных зданий. Это неполный перечень использования этих материалов – они также применяются в горной, космической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности, судостроении и железнодорожном строительстве, сельском хозяйстве.

Одним из методов получения композиционных материалов является автоматизированная выкладка AFP (автоматизированная выкладка узких лент) или ATL (автоматизированная выкладка широких лент). Эти методы применяются в основном в авиационной и космической промышленности, судостроении и при изготовлении изделий для систем возобновляемых источников энергии. Для методов AFP и ATL используется однонаправленный препрег, в первом случае – это широкая лента, во втором – узкая

лента. Метод ATL используется для производства больших и несложных деталей, AFP – пригоден для изготовления сложных и ответственных деталей.

Данный аналитический обзор выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1–4].

Автоматизированные технологии AFP и ATL

Автоматизация производства имеет большое значение для повышения производительности, снижения затрат и сокращения отходов. Автоматизация в оборудовании происходит с использованием автоматизированной выкладки волокон (AFP) и автоматизированной выкладки лент (ATL). Автоматизированные машины выкладывают предварительно пропитанные материалы, которые затем формуются. Использование данных методов для крупногабаритных конструкций, таких как обшивка крыла самолета или фюзеляж, оказалось эффективнее традиционных методов.

Возрастающие требования к композиционным материалам для первичного структурного применения в аэрокосмической, автомобильной, морской областях промышленности и ветровой энергетики обуславливают необходимость увеличения производительности, снижения затрат, сокращения отходов и повышения повторяемости в производстве [5]. Традиционные методы изготовления композиционных материалов, такие как ручная выкладка предварительно пропитанных углеродных или стеклянных тканей, требуют квалифицированных специалистов и кропотливой работы. ATL и AFP – методы производства, с помощью которых можно удовлетворить высокие требования промышленности, в отличие от метода ручной выкладки, не способного реализовать это в полной мере.

В таблице приведены преимущества и недостатки методов автоматизированной и ручной выкладки [6, 7].

Преимущества и недостатки автоматизированной выкладки

Показатель	Преимущества и недостатки
Сокращение времени изготовления	Скорость автоматизированной выкладки может составлять 13,6 кг/ч, в то время как при ручной укладке наиболее квалифицированными специалистами скорость может достигаться не более 1,1 кг/ч. Для сложных конструкций планера (фюзеляж, крыло и др.) автоматизированная выкладка является примером продуктивности
Сокращение эксплуатационных расходов	При увеличении скорости выкладки время, необходимое для изготовления детали в форме, уменьшается. Кроме того, при переходе от ручной к автоматизированной выкладке численность персонала, задействованного в технологическом процессе, уменьшается, что снижает эксплуатационные расходы
Сокращение количества отходов	Отходы при использовании ручной выкладки могут достигать 20%. При автоматизированной выкладке отходы снижаются до 5% и менее, что существенно снижает себестоимость
Объединение частей конструкции	Используя автоматизированную выкладку, можно объединить производство нескольких частей одной конструкции в одну (например, обшивку, нервюры и стрингеры). В свою очередь, это уменьшает количество крепежных элементов, необходимых для сборки конструкции. Снижаются затраты, повышается весовая эффективность при обеспечении требований по надежности
Улучшение качества и однородности	Автоматизация позволяет контролировать все параметры во время выкладки. Это улучшает качество каждой части, в отличие от ручного процесса, при котором она может отличаться при смене оператора
Контроль укладки	При автоматизации процесса становится возможно управлять укладкой каждого слоя и контролировать качество, что невозможно во время ручной выкладки
Себестоимость материала	Для автоматизированной выкладки требуются дорогостоящие оборудование и расходные материалы, что увеличивает себестоимость препрегов

Метод AFP позволяет производить крупногабаритные композитные структуры сложной формы в авиационной промышленности. Эта технология позволяет достичь высокого качества материала при одновременном сокращении длительности производства [8, 9]. Из-за сложности процесса укладки ленты, зазоры и нахлесты, параллельные направлению волокна (рис. 1), могут образоваться между соседними лентами.



Рис. 1. Схематические изображения зазора (а) и нахлеста (б) между двумя (1 и 2) лентами

Например, методом AFP изготовлены обшивка крыла и лонжероны для самолетов Airbus A350 XWB [10], Boeing 787 и 777X [11]. В самолете Airbus A350 XWB из углепластика практически полностью изготовлены крыло и фюзеляж, а общая доля композиционных материалов достигает 50%. В самолете Boeing 777X доля композиционных материалов составляет 9% (половина салона, элементы механизации), в самолете Boeing 787 композиционных материалов – до 50% (элементы двигателя, фюзеляжа). Увеличение доли композитов позволило уменьшить массу самолета и увеличить его прочность. В приведенных примерах используется препрег с эпоксидной матрицей и углеродной лентой. Материал выкладывается на форму с использованием автоматизированных машин, а затем формируется в автоклавах [12].

По прогнозам, объем композиционных материалов будет возрастать во многих отраслях промышленности: автомобильной и аэрокосмической промышленности [13], судостроении, строительстве, энергетике и др.

Авиационная промышленность является крупнейшим потребителем композиционных материалов. Многочисленные исследования рынка показали, что отрасль развивается. Новые модели самолетов становятся более сложными и легкими, что увеличивает производительность и снижает эксплуатационные свойства [6].

Из полимерных композиционных материалов (ПКМ) можно изготавливать пылезащитные устройства вертолетных двигателей, что улучшит эксплуатационные характеристики [14].

Так, отечественный самолет MC-21 на 40% сделан из углепластиков, а хвостовое оперение изготавливают на станке методом ATL (рис. 2) [15]. Кессон крыла изготавливают методом инфузии с предварительной выкладкой заготовки преформы из ленточки препрега с биндером (рис. 3) [16]. Это позволило не только уменьшить массу самолета, но и сохранить высокую надежность и небольшую стоимость.



Рис. 2. Автоматизированная установка для выкладки методом ATL в АО «ОНПП «Технология»

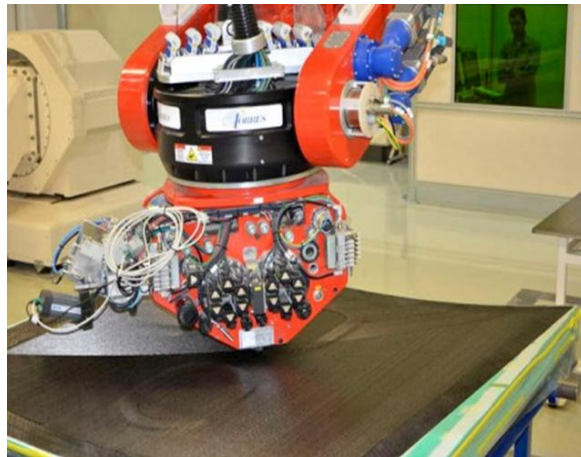


Рис. 3. Установка для автоматизированной выкладки AFP в АО «АэроКомпозит» в Ульяновске

Из композиционных материалов сделаны элементы крыла, хвостового оперения и панели центроплана. Например, крыло имеет небольшую массу, низкую себестоимость и высокую технологичность. При проведении испытаний на прочность композиционных конструкций получены хорошие результаты [17].

Для освоения процесса AFP важно контролировать параметры процесса (температура нагревания, давление, скорость выкладки др.) и траекторию выкладки волокон машиной. Различные исследования позволили разработать правила проектирования, которые оптимизировали эти траектории, так что конечные механические свойства ПКМ (жесткость и прочность) могут быть максимальными [8, 18, 19]. Однако при отработке режимов выкладки могут появляться дефекты в виде нахлестов или зазоров (рис. 4) между соседними лентами, параллельные направлению выкладки волокна [20]. Эти зазоры и перекрытия могут привести к снижению прочности, изменить локальную геометрическую форму и микроструктуру материала, по сравнению с условиями, когда выкладываемые ленты кладутся встык [8, 21]. Для сложных изделий допускается наличие данных дефектов размером 1,5–2,0 мм [22].

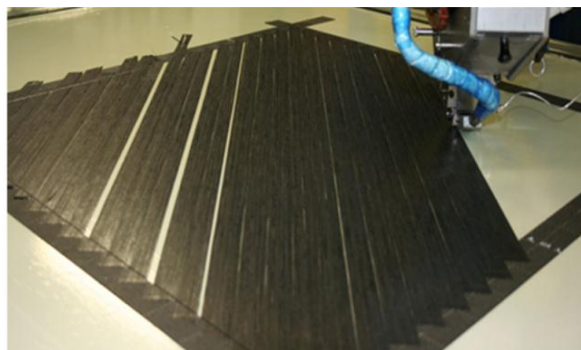


Рис. 4. Зазоры при выкладке препрега методом AFP

Дефекты изменяют структурную целостность, приводят к снижению физико-механических свойств (по статистике прочность снижается в среднем на 10–15%), поэтому их количество должно быть минимизировано. В ПКМ различают следующие дефекты: недостаточная степень отверждения, несоответствие норме состава, расслоение материала, трещины, инородные включения, складки, царапины, свили, подмятия, сколы, отверстия и другие. На каждом этапе изготовления детали возникают различные дефекты [23].

Накопление усталостных напряжений снижает прочность материалов, что установлено при проведении механических испытаний, в том числе при сжатии. Ударное разрушение в зависимости от энергии воздействия уменьшает прочность материала на 65–80%; до 50% уменьшается статическая прочность при наличии расслоений [23].

В последнее время путем математического моделирования усовершенствованы методы автоматизированной выкладки, однако прогнозирование появления дефектов остается сложной задачей [24]. Небольшие зазоры и нахлесты всегда присутствуют в структуре материала при выкладке, поскольку в настоящее время технологические особенности процесса изготовления в полной мере этого не обеспечивают [25].

Моделирование методом конечных элементов – эффективный способ понять, какой размер и какое распределение пробелов и перекрытий наиболее оптимальное. Такое моделирование показывает, что внеплоскостная волнистость и изменение толщины слоя, вызванные зазорами и перекрытиями, играют важную роль в формировании толщины и несущей способности образованного композитного элемента. Разработаны 3D-сетки для автоматического генерирования моделей с зазорами и нахлестами. При этом образующаяся волнистость и изменение толщины слоя, вызванные этими дефектами, автоматически моделируется. Модели с различными размерами и распределением нахлестов и зазоров построены для прогнозирования уменьшения прочности в зависимости от величины и типа дефектов. С учетом этих дефектов создана экспериментальная модель имитируемых дефектов процесса AFP, изготовленная путем ручной укладки ленты препрега. Эти модели позволяют предсказать возможное снижение прочности и жесткости материала [21].

Метод AFP с криволинейным путем выкладки волокон является перспективным, но только теоретически оптимальным, так как не рассматриваются производственные ограничения [26] – например, минимальный радиус поворота волокна, выкладываемый машиной методом AFP. На практике этот метод приводит к образованию дефектов в виде зазоров и/или нахлестов. Во время производственного процесса первая полоса ленты выкладывается вдоль проектируемого пути выкладки. Впоследствии путь смещается, чтобы охватить всю деталь. Если ширина ленты смогла бы непрерывно меняться, то дефектов бы не было. Поскольку машина для метода AFP может изменять ширину только с помощью дискретного значения через добавление или удаление ленты, то образуются небольшие дефекты.

В работе [27] установлено, что увеличение площади зазоров ухудшает прочность и жесткость, исследовано также влияние ширины ленты на жесткость и прочность ламинатов с переменной жесткостью. Таким образом, пришли к выводу, что на структурные свойства ламината влияют размер зазоров и их распределение в структуре.

В работе [25] исследовали четыре основных дефекта (зазор, нахлест, частичный зазор, нахлест скрученной ленточки препрега) и провели испытания пластинок на растяжение, сжатие и сдвиг в плоскости, а ламинатов – на растяжение и сжатие с открытыми отверстиями. Затем результаты сравнивали с результатами образцов без дефектов. Если вводили зазоры и нахлесты в продольном направлении препрега, то они не влияли на прочность сжатия или сдвига. Однако, когда дефекты помещали в поперечное сечение, прочность сдвига уменьшалась, что вызвано волнистостью волокна из-за дефектов. Тесты показали минимальный эффект единичных и изолированных дефектов на механические характеристики – особенно на уровне пластинки (~5%) по сравнению с ламинатом (~13%).

В работе [28] провели экспериментальные исследования: препрег выкладывали в 5 или 10 слоев, искусственно создавали межслойные отслоения, прокладывая

фторопластовую пленку между слоями. Результаты показали, что критическая нагрузка отслоения снижается в 2 раза при укладке $[+45^\circ, -45^\circ]$, в отличие от укладки $[0^\circ, 90^\circ]$.

Некоторые исследователи [29] установили пути уменьшения влияния дефектов на структуру материала – например, за счет размещения верхнего и нижнего слоя при укладке $[+45^\circ, -45^\circ]$. Однако даже при использовании этого метода дефекты все равно присутствуют и их влияние на уровень свойств структуры до сих пор не очень понятно.

В работе [30] изучено влияние зазоров шириной 0,76 и 2,5 мм при испытании ПКМ на прочность при сжатии. Сделан вывод о том, что зазор с данными размерами снижает прочность при сжатии. Показано, что скорость этого снижения для зазоров шириной $<0,76$ мм уменьшается, а уменьшение прочности для больших зазоров относительно стабильное.

В работе [24] на основе экспериментальных наблюдений и моделирования изучали дефекты, возникающие в ламинатах. Модель применяли для анализа образцов с зазорами и нахлестами, а также этих дефектов. Образец был изготовлен с «плохой» комбинацией зазоров и нахлестов реальных размеров. Это позволило облегчить задачу их идентифицирования. Образцы обработали двумя способами: изотермически (под действием трех различных уровней давления) и с применением цикла со ступенчатым режимом нагрева.

Авторы работы [26] изучали, как параметры, определяющие образование дефектов, влияют на выбор лучших решений для задачи оптимизации процесса изготовления препрега. Размер дефектной зоны в основном зависит от двух параметров – производственного и проектного. Установили, что увеличение количества ленточек уменьшает количество дефектных областей, где ширина ленточки относительно постоянна. Количество дефектных площадей также уменьшается с применением широкой ленты.

В работе [8] представлены результаты экспериментального исследования влияния встроенных дефектов при автоматизированной выкладке лентами на механические свойства композиционного материала из углеродной ленты, пропитанной эпоксидной смолой. Изучены два образца препрега (8552/AS4/RC34/AW194) производителя Hexcel Composites шириной $6,35 \pm 0,25$ мм, с последовательностью укладки $[(-45^\circ, +45^\circ)_3, -45^\circ]$ и $[90^\circ_4, 0^\circ_3, 90^\circ_4]$, в которые зазоры и нахлесты вводили во время выкладки волокон. Эти материалы отверждали в автоклаве, а затем их проанализировали ультразвуковым методом контроля с получением С-сканов. Микроструктуру материала исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии. Испытания на сдвиг проводили на образцах с укладкой $[(-45^\circ, +45^\circ)_3, -45^\circ]$, в которых дефекты находились в третьем и четвертом слоях. Испытания на сжатие проводили на образцах с укладкой $[90^\circ_4, 0^\circ_3, 90^\circ_4]$, в которых дефекты ввели в центр восьми слоев с ориентацией 90 градусов. Результаты исследования показали, что прочность на сдвиг уменьшается на 5–10% с зазором 0,5 мм и меньше, для больших зазоров данное значение прочности уменьшается на 15%. Прочность при сжатии уменьшилась на 12–20%, а при сочетании нескольких дефектов – на 55%. В работе [31] показано, что при наличии дефектов прочность при изгибе уменьшается на 12%.

Заключения

В рассмотренных в данной статье зарубежных работах показано, что при автоматизированной выкладке волокон такие дефекты, как зазоры и нахлесты, влияют на значения прочности при сдвиге, сжатии и изгибе. Показатели уменьшаются на 10–20%, а в некоторых случаях, когда оба дефекта совмещаются, показания уменьшаются до 55%. Однако исследования должны продолжаться, и следует учитывать, что при

подборе оптимального режима отверждения зазоры и нахлесты будут изменять толщину монослоя, практически не влияя на прочность материала.

Поскольку при изготовлении сложных деталей невозможно удалить небольшие зазоры и нахлесты, то следует уменьшить их количество и размер путем дальнейшей оптимизации механизма автоматизированной выкладки. Поэтому требуется понимание процесса выкладки неотвержденного препрега, на который влияют многочисленные факторы, что усложняет его моделирование. Хотя в последние десятилетия усовершенствованы возможности методов моделирования процессов, появление локальных дефектов все также остается сложным методом для прогнозирования, так как реальная деталь, изготовленная методом AFP, содержит большое количество сложных комбинаций зазоров и нахлестов разных размеров.

Таким образом, при дальнейшем освоении процессов автоматизированной выкладки необходимо провести всесторонние исследования, позволяющие изучить влияние зазоров и нахлестов на свойства будущего композиционного материала. Эта задача может быть решена с помощью выкладки дополнительных слоев или изменения траектории выкладки. Необходимо также учесть процесс получения монолитного пакета препрега в процессе отверждения. Так, если пустоты были полностью вакуумированы, то при нагреве пакет, состоящий из смолы и наполнителя, превратится в подвижную массу и связующее заполнит пустоты. При анализе этого процесса необходимо будет учитывать изменение толщины монослоя с учетом заполненных пустот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002.* М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. *Материалы нового поколения // Защита и безопасность.* 2014. №4. С. 28–29.
3. Каблов Е.Н. *Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии.* 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н. *Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии.* 2015. №1. С. 36–39.
5. Hoa S.V. *Automated composites manufacturing // Science and Engineering of Composite Material.* 2015. No. 3. P. 113.
6. Gharabegi N. *Composite Laminates Made by Automated Fiber Placement of Dry Fibers and Vacuum Assisted Resin Transfer Molding.* Canada, 2018. 124 p.
7. 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.
8. Lan M., Cartié D., Davies P., Baley Ch. *Influence of embedded gap and overlap fiber placement defects on the microstructure and shear and compression properties of carbon-epoxy laminates // Composites: Part A.* 2016. No. 82. P. 198–207.
9. 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. No. 43. P. 997–1009.
10. *Composites World [Электронный ресурс].* URL: <http://www.compositesworld.com/articles/a350-xwb-update-smart-manufacturing/> (дата обращения: 11.10.2018).
11. *Seattle Times [Электронный ресурс].* URL: <http://www.seattletimes.com/business/boeing-aerospace/massive-speedy-robots-ready-to-build-composite-wings-for-boeing-777x/> (дата обращения: 11.10.2018).
12. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. *Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №3. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2018).
13. Гуняев Г.М., Гофин М.Я. *Углерод-углеродные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии.* 2013. №S1. С. 62–90.

14. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
15. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Выбор технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №3. С. 20–26.
16. Душин М.И., Хрульков А.В., Караваев Р.Ю. Параметры, влияющие на образование пористости в изделиях из полимерных композиционных материалов, изготавливаемых безавтоклавными методами (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №2. Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 11.10.2018).
17. Авиация России [Электронный ресурс]. URL: <https://aviation21.ru/ms-21/> (дата обращения: 24.09.2018).
18. Lopes C.S., Gürdal Z., Camanho P.P. Variable-stiffness composite panels: Buckling and first-ply failure improvements over straight-fibre laminates // *Computers & Structures*. 2008. No. 86. P. 897–907.
19. Arian N.M., Fayazbakhsh K., Pasini D., Lessard L. A comparative study of metamodeling methods for the design optimization of variable stiffness composites // *Composite Structures*. 2014. No. 107. P. 494–501.
20. Pasini Group [Электронный ресурс]. URL: <http://pasini.ca> (дата обращения: 02.11.2018).
21. Li X., Hallett S.R., Wisnom M.R. Modelling the effect of Gaps and Overlaps in Automated Fibre Placement (AFP) manufactured laminates // *Science and Engineering of Composite Materials*. 2015. No. 22 (2). P. 115–129.
22. Вашуков Ю.А. Технология и оборудование сборочных процессов: учеб. пособие. Самара: СГАУ, 2011. 179 с.
23. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №4. С. 23–31.
24. Belnoue J.P.-H., Mesogitis T., Nixon-Pearson O.J. et al. Understanding and predicting defect formation in automated fibre placement pre-preg laminates // *Composites: Part A*. 2017. No. 102. P. 196–206.
25. Croft K., Lessard L., Pasini D., Hojjati M., Chen J., Yousefpour A. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates // *Composites: Part A*. 2011. No. 42. P. 484–491.
26. Nik M.A., Fayazbakhsh K., Pasini D., Lessard L. Optimization of variable stiffness composites with embedded defects induced by Automated Fiber Placement // *Composite Structures*. 2014. No. 107. P. 160–166.
27. Blom A.W., Lopes C.S., Kromwijk P.J. et al. A theoretical model to study the influence of tow-drop areas on the stiffness and strength of variable-stiffness laminates // *Journal of Composite Materials*. 2009. No. 43. P. 403–425.
28. Бохоева Л.А., Чермошенцева А.С., Ергонов В.П. Исследование дефектов типа «отслоение» в элементах конструкций из композиционных материалов // *Проблемы механики современных машин: материалы V Междунар. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ*, 2012. Т. 4. С. 18.
29. Jarve E.V., Kim R. Strength prediction and measurement in model multilayered discontinuous tow reinforced composites // *Journal of Composite Materials*. 2004. Vol. 38 (1). P. 5–18.
30. Sawicki A.J., Minguet P.J. The Effect of intraply overlaps and gaps upon the compression strength of composite laminates // *Thirty-ninth AIAA structural, dynamics, & materials conferences*. Long Beach, CA. 1998. P. 744–54.
31. Fayazbakhsh K., Nik M.A., Pasini D., Lessard L. The effect of gaps and overlaps on the in-plane stiffness and buckling load of variable stiffness laminates made by automated fiber placement // *15th European conference on composite materials*, Venice, Italy. June 24–28, 2012. P. 1–8.