

УДК 678.8

К.И. Донецкий<sup>1</sup>, Д.В. Быстрикова<sup>1</sup>, Р.Ю. Караваяв<sup>1</sup>, П.Н. Тимошков<sup>1</sup>

## ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСМИССИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93

*На авиастроительных предприятиях РФ в настоящее время высоконагруженные части трансмиссий летательных аппаратов (ЛА) в основном производят из металлических сплавов. За рубежом изготовление полимерных композиционных материалов (ПКМ) для таких изделий – главным образом на основе стекло- или угленаполнителей, полученных автоклавным формованием, пропиткой под давлением, намоткой и т. п., – стало обычной практикой.*

*Использование ПКМ при изготовлении частей трансмиссий ЛА позволяет снизить массу изделий по сравнению с металлическими сплавами при сохранении высоких механических показателей и внедрить автоматизированные процессы создания пластиков в производство.*

*Представлен обзор различных технологических методов изготовления элементов трансмиссионных валов авиационного назначения из ПКМ.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, связующее, волокно, трансмиссионный вал, намотка, пропитка под давлением, плетеная преформа, формовка.

K.I. Donetskiy<sup>1</sup>, D.V. Bystrikova<sup>1</sup>, R.Yu. Karavaev<sup>1</sup>, P.N. Timoshkov<sup>1</sup>

## APPLICATION OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS FOR CREATION OF ELEMENTS OF TRANSMISSIONS OF AVIATION ENGINEERING (review)

*At aircraft manufacturing enterprises of the Russian Federation, currently, the heavily loaded parts of the transmissions of aircraft (LA) are mainly made from metal alloys. In foreign practice it has become common practice, the use of polymer composite materials (PCM) for such products is mainly based on glass or carbon fillers using autoclave molding, pressure impregnation, winding, etc.*

*The use of PCM in the manufacture of highly loaded parts of aircraft transmissions allows reducing the weight of products compared to metal alloys while maintaining high mechanical properties and introducing automated processes for the production of plastics in production.*

*The published article is devoted to the review of various technological methods for manufacturing elements of transmission shafts for aviation purposes from PCM.*

**Keywords:** polymeric composite materials, resin, fiber, transmission shaft, winding, resin transfer moulding, preform, mould pressing.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) благодаря их высоким удельным характеристикам прочности и жесткости используют в авиастроительной отрасли практически с момента их создания – сначала на основе стеклянных волокон, а затем

и углеродных. Достоинством композиционного материала является то, что материал, технологию и конструкцию создают одновременно с высокой степенью инноваций на всех этапах жизненного цикла материала – от разработки исходного сырья до создания и эксплуатации изделий.

В настоящее время широкое применение композиционных материалов стало тенденцией в мировом вертолетостроении, а наиболее ярким представителем является экспериментальный скоростной вертолет Sikorsky X2, в конструкции которого доминируют материалы нового поколения, в первую очередь композиционные материалы. Очевидно, что для обеспечения конкурентоспособности отечественной промышленности необходимо располагать всем тем инструментарием, который имеется у зарубежных производителей, – набором материалов и технологий, а также осваивать производство изделий из ПКМ.

Применение современных ПКМ определяет уровень развития как авиационной, так и гражданской отрасли промышленности [1–3]. Кроме того, остро встал вопрос снижения стоимости композиционных конструкций, которые всегда были дороже аналогичных деталей, выполненных из металла. Во многом высокая стоимость изделий из ПКМ определяется большой трудоемкостью и энергоемкостью автоклавной технологии их изготовления, наиболее широко применяемой в настоящее время в авиационной, а также высокой стоимостью оборудования. Из-за этого в последние годы ведущие разработчики авиационной техники активно проводят работы по внедрению безавтоклавных методов изготовления деталей из ПКМ, позволяющие создавать разнообразные материалы для широкого температурного диапазона и климатических условий [4]. Для большего снижения себестоимости при создании изделий из ПКМ необходимо существенно снизить трудоемкость изготовления деталей, а самое главное – трудоемкость сборочных работ, где используется дорогостоящий высококвалифицированный труд, в том числе и за счет автоматизации процессов производства.

В вертолетостроении применение таких материалов при изготовлении вертолетных лопастей, различных конструкций фюзеляжа (в том числе и силовых), панелей обшивки и т. п. является повсеместной практикой и приводит как к снижению количества деталей и массы конструкции, появлению возможности изготовления больших поверхностей со сложными контурами, так и к удешевлению изделий. Проведенные в конце 1970-х гг. в США исследования компаний Sikorsky Aircraft и Bell Helicopter показали, что применение ПКМ в конструкции вертолетов позволяет не только значительно снизить их массу и стоимость, но и повысить живучесть, эксплуатационную технологичность и многое другое [5].

Поставленные задачи по уменьшению массы, снижению трудоемкости, производственных затрат и эксплуатационных расходов, повышению ресурсных показателей и боевой живучести успешно решены на предприятиях АО «Камова» и АО «МВЗ им. М.Л. Миля» при разработке новой вертолетной техники [6].

Немного позже, в 1990-х гг., среди всех основных разработчиков вертолетов (как зарубежных, так и российских) наметилась тенденция к широкому применению ПКМ в конструкциях разрабатываемых летательных аппаратов (ЛА). Типичный пример массового внедрения ПКМ – вертолет NH-90, разработанный совместно компаниями Франции, Германии, Италии и Голландии и имеющий конструкцию планера, выполненную более чем на 80% из ПКМ. Использование пластика позволило снизить массу вертолета на 20% по сравнению с расчетной, сократить количество деталей на 70% по сравнению с традиционной металлической конструкцией и уменьшить радиолокационную заметность. Аналогичная ситуация сложилась и у других производителей вертолетной техники – например, в США фирма Sikorsky стала изготавливать конструкции хвостовых балок, фонарей и корпусов фенестронов вертолетов из ПКМ [7].

В России наблюдается аналогичная картина – расширяется область применения ПКМ в конструкциях вертолетов, в том числе и лопастных агрегатов. Накопленный положительный опыт широкого применения ПКМ реализован в вертолетах производства фирм АО «Камов» и АО «МВЗ им. М.Л. Миля» (рис. 1). В области разработки и изготовления элементов трансмиссий из ПКМ по крайней мере в зарубежном вертолетостроении наблюдается схожая картина.

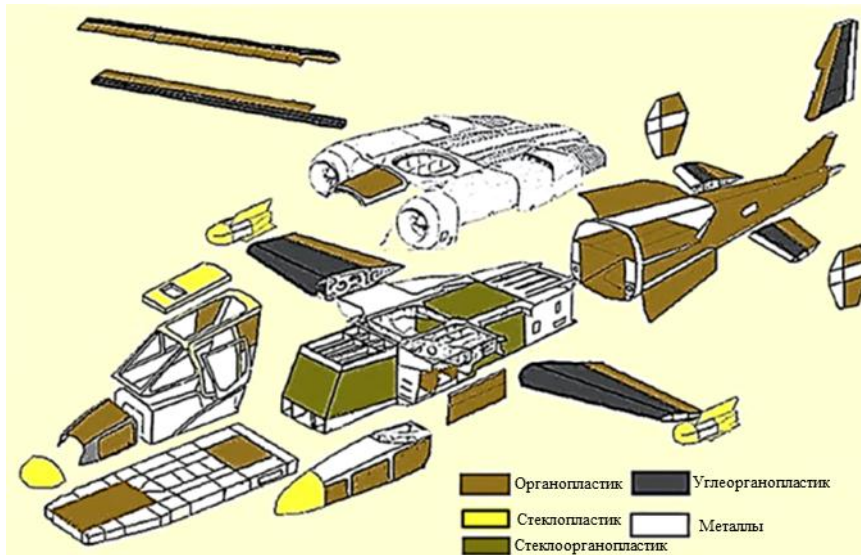


Рис. 1. Применение различных ПКМ в конструкциях вертолета фирмы АО «Камов» [8]

Приблизительно с 1970-х гг. возникла необходимость создания более сложных и современных конструкций, которые могли бы обеспечить безопасную и надежную работу ЛА. Один из вариантов решения – замена металлических валов трансмиссий на композитные.

До конца 1980-х гг. технологии намотки и автоклавного формования предварительно пропитанных термореактивной смолой слоистых материалов занимали основное место в производстве композитов для изделий аэрокосмической промышленности и других ответственных отраслей. В настоящее время при разработке элементов трансмиссий и тяг управления ЛА проводят работы по замене металлических сплавов на композиционные материалы, что позволяет добиться значительного снижения массы изделий и повышения их эксплуатационных характеристик.

Валы трансмиссий обеспечивают передачу крутящего момента от двигателя к несущему и рулевому винтам, поэтому к узлам конструкции предъявляют высокие требования по изгибающим и крутильным колебаниям, их соосности, биению и скручиванию. Помимо этого, элементы трансмиссий и тяги управления ЛА используют в широком температурном диапазоне и различных климатических условиях. Материалы, применяемые при изготовлении валов трансмиссий и тяг управления, должны обладать устойчивостью к разнопеременным температурным нагрузкам, различным смазкам и маслам и не подвергаться коррозии. В связи с этим для создания современных конкурентоспособных элементов трансмиссий и тяг управления необходимо совершенствовать как конструкции, так и материалы и технологии их изготовления.

Работа выполнена 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].

### Материалы и методы

Трансмиссионный вал предназначен для передачи вращающей силы двигателя напрямую или с помощью коробки передач на ведущие оси и широко используется в разнообразном оборудовании, включая транспортные машины (автомобили, корабли, самолеты и вертолеты). При изготовлении приводных валов применяют металлические сплавы, что приводит к возникновению проблем с весовой эффективностью и возможностью возникновения низкочастотного поперечного резонанса. В этом случае могут возникать частотные колебания приводного вала в диапазоне максимальных оборотов двигателя и его разрушение из-за низкой частоты бокового направленного резонанса. Ввиду этого возможно использовать укороченные валы, соединяемые друг с другом в единый трансмиссионный вал.

Для решения указанной проблемы, присущей обычным металлическим валам, используют композитные приводные валы, изготовленные из армированного волокнами композиционного материала. Такие валы имеют более высокие удельную жесткость, удельную прочность, резонансную частоту и способность демпфирования вибрации и могут применяться в гоночных автомобилях или самолетах [9].

В летательных аппаратах трансмиссия – это совокупность элементов, обеспечивающих связь между двигателем и несущим винтом или иными потребителями его мощности [10]. Трансмиссия состоит из трубчатого элемента и соединительных деталей, которые предназначены для обеспечения связи, например, с коробкой передач или универсальным шарниром.

В настоящее время наиболее активные разработки в области изготовления элементов трансмиссий и тяг управления ЛА из ПКМ ведутся компаниями из США: Boeing Co, Dana Automotive System Group, Sikorsky Aircraft Corp., Bell Helicopter Textron Inc., Ccdi Composites Inc., Lawrie Technology Inc., Hamilton Sundstrand Corp. и др.

В Европе разработкой, созданием, изготовлением и патентованием элементов трансмиссий и тяг управления ЛА из ПКМ занимаются: английская фирма Crompton Technology Group, Ltd; французские фирмы SKF Aerospace France, Hutchinson, немецкое и французское подразделения Airbus, Eurocopter Deutschland GmbH, MT aerospace AG, Rolls Royce Deutschland, Lightweight Structures GmbH; Lieberr-Aerospace Lindenberg GmbH; бельгийская фирма BD Invent SA и др.

Страны азиатского региона представлены в меньшей степени, но тем не менее высокую изобретательскую активность наблюдают и там. Свои изобретения патентуют как японские, так и китайские, и японские фирмы: Hitachi Ltd; Aircelle SA; Guizhou Aerospace Fenghua Prec Equipment Co, Ltd; Shenzhen Qike Intelligent Tech Co, Ltd; Foshan Shenfeng Aviation Tech Co, Ltd; Shenzhen Qike Intelligent Tech Co, Ltd и др.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что реализацию новых конструкторских решений в области создания валов трансмиссий и тяг управления возможно обеспечить с помощью различных технологий изготовления валов из ПКМ.

В настоящее время ведущие производители авиационной техники при проведении новых разработок и исследований в области создания перспективных валов трансмиссий и тяг управления ориентируются на использование стекло-, углепластиков и гибридных материалов. Например, характерные для углепластиков свойства (в 3 раза меньшая, чем у титановых сплавов, плотность; высокие прочность и жесткость в направлении армирования; повышенное сопротивление усталости) делают их перспективными материалами при создании рабочих валов трансмиссий и тяг управления.

Технология, используемая для производства валов из композиционных материалов, должна обеспечивать изготовление конструкции сложной геометрической формы, с максимальной реализацией упруго-прочностных и эксплуатационных свойств

материалов. Поскольку они легче металлических, их применение наиболее актуально в отраслях, где масса имеет большое значение – например, в авиационной и автомобильной промышленности. Композиционные изделия, изготовленные методами контактного или вакуумного формования, не отвечали жестким требованиям к прочности и массе деталей ЛА, что способствовало началу развития новых методов формования.

Производство валов трансмиссий из ПКМ реализуют преимущественно по следующим технологиям:

- выкладка изделий из препрегов с последующим формованием;
- намотка армирующего наполнителя на оправку с последующим отверждением в печи;
- пропитка под давлением сухих армирующих наполнителей (в виде волокон, жгутов, лент, однонаправленных и равнопрочных тканей) в жесткой пресс-форме с использованием низковязких связующих (Resin Transfer Moulding – RTM).

Изготовление по препреговой технологии с последующим автоклавным формованием предполагает выкладку предварительно пропитанного армирующего материала на специальную формообразующую оснастку с последующим отверждением в автоклавном комплексе при избыточном давлении. Этой разработкой занимались Airbus Helicopters Deutschland GmbH и Korea Advanced Institute Science Technology, в которых при производстве трансмиссионного вала использовали металлическую трубку с нанесением слоя ПКМ и совместным отверждением под действием высокого давления в автоклаве. Единое соединение металлической трубки и слоя композиционного материала обеспечивает хорошую способность вала к передаче крутящего момента и его повышенную прочность при изгибающих нагрузках [11].

Немецкая компания Eurocopter Deutschland также использовала препрег при изготовлении трансмиссионного вала, однако вместо автоклавного формования применяли отверждение сборки в печи. В этом случае при изготовлении трансмиссионных валов использовали технологию выкладки препрега с углом укладки наполнителя  $\pm 45$  градусов. Намотку осуществляли путем укладки препрега в виде однонаправленной углеродной ленты на металлическую оправку с последующим отверждением в печи [12].

Существует технология изготовления тяги управления путем намотки однонаправленного препрега на оснастку. При намотке происходит чередование продольного и поперечного направлений ровинга с образованием решетчатой структуры. Продольные нити повышают прочность конструкции в направлении осевых и изгибающих нагрузок, спиральные нити – прочность при сдвиговых нагрузках и кручении [13–15].

При изготовлении трубчатых элементов трансмиссионных валов (рис. 2) различными компаниями успешно реализуются безавтоклавные процессы изготовления ПКМ, в частности намотка и пропитка под давлением. В отличие от препрегово-автоклавного процесса, длительное время доминирующего в технологии изготовления конструктивных ПКМ и бесспорно обеспечивающего высокий уровень физико-механических свойств и низкую пористость получаемых пластиков, но характеризующегося повышенной энергоемкостью и стоимостью из-за использования дорогостоящего автоклава, оснастки, оборудования и технологических материалов, безавтоклавные процессы пропитки более простые и экономичные и позволяют создавать разнообразные пластики для широкого температурного диапазона и климатических условий [16].

Одним из таких способов является метод намотки, заключающийся в том, что непрерывный волокнистый наполнитель (в виде сухих («сухая намотка») или предварительно пропитанных связующим («мокрая намотка») волокон, жгутов, тканей) наматывается на неподвижную или вращающуюся формообразующую оправку, имеющую

конфигурацию внутренней поверхности изделия, образуя последовательно накладываемые в определенных направлениях слои. Эти слои можно укладывать как под одним и тем же, так и под разными углами армирования (намотки), пока не будут получены нужные толщина и структура материала. Причем угол намотки относительно оси вращения может изменяться от очень малого – продольного (меридионального) до большого – окружного (тангенциального). Затем полученную заготовку отверждают, и на заключительной стадии процесса осуществляют удаление оправки.



Рис. 2. Трансмиссионный вал из углепластика, выполненный по технологии намотки

Планируемые свойства вала из композиционного материала определяют путем расчета толщины слоев и величины углов относительно оси вращения. Волокна, уложенные под малыми углами (<30 градусов), придают высокие осевые свойства при растяжении; волокна, намотанные при 40–50 градусах, – высокие крутильные свойства; волокна, намотанные при 75–90 градусах, – высокие поперечные свойства.

Ориентация волокон композитного вала сильно влияет на крутящий момент. Высокопрочные соединения могут быть получены путем модификации композиционного материала в концевых областях вала таким образом, чтобы нагрузка равномерно распределялась по всем его опорным элементам. Это возможно достичь путем наматывания клинообразного внутреннего слоя из волокон с большим углом наклона в зонах увеличенных локальных толщин. При отверждении и после простой обработки цилиндрической поверхности концевых областей на внешней поверхности, композиционный материал помещали на оправку и затем с натягом устанавливали на металлический фитинг. Таким способом происходило формирование фитингового соединения, препятствующего преждевременному разрушению из-за локального поверхностного расслоения по толщине слоя во время крутильных или осевых нагрузок, предложенное компанией Crompton Technology Group, Ltd (США) [17].

Как указывалось ранее, американские исследователи проявляют наибольшую активность в разработках трансмиссий из ПКМ. Изготовление корпуса вала трансмиссии методом намотки в вакуумном мешке приведено в патентах Boeing Co и Hitachi, Ltd [18, 19], где выделяют следующую особенность изготовления вала трансмиссии: после намотки армирующего наполнителя на оправку заготовку помещают в вакуумный мешок и отверждают.

Еще в одном американском патенте [20] описано изготовление приводного вала методом намотки с различными шагом и углом намотки. Угол намотки волокон варьируется от продольного (10–15 градусов) до поперечного (70–90 градусов), а различные направления намотки соответствуют всем необходимым рабочим параметрам, таким как изгиб и жесткость при кручении. На концах вала устанавливают необходимые металлические фитинги для передачи усилия.

Существуют и более технологически сложные способы изготовления трансмиссионного вала. Например, в исследовании [21] предлагают в первую очередь изготовить внутренний корпус филаментной намоткой предварительно пропитанных волокон

вокруг съемного сердечника. Затем на концах внутреннего корпуса устанавливают фланцы и изготавливают наружный корпус намоткой вокруг внутреннего корпуса и наконечников. Далее отверждают и получают единую систему с минимальной пористостью и отсутствием расслоений на границе контакта внутреннего корпуса и сердечника благодаря применению одного и того же предварительно пропитанного волокна.

Однако наиболее распространенным способом изготовления трубчатых элементов трансмиссии из ПКМ является метод пропитки под давлением сухих армирующих наполнителей (в виде волокон, жгутов, лент, однонаправленных и равнопрочных тканей, плетеных преформ) в жесткой пресс-форме, являющийся конкурентоспособной альтернативой такому уже давно применяемому технологическому процессу, как намотка. Преимущество данного способа изготовления пластика заключается в отсутствии дорогого специализированного технологического оборудования, а также в возможности изготовления деталей сложной формы. Изделия, отформованные методом RTM, имеют поверхность необходимой чистоты и точно выдержанные форму и размер. Однако наряду с преимуществами у процесса пропитки под давлением существуют и некоторые недостатки, основными из которых являются длительность процесса, а в отдельных случаях – конструктивная сложность и высокая стоимость оснастки.

Как указано ранее, при изготовлении элементов трансмиссии из ПКМ методом RTM в качестве сухих армирующих наполнителей использовали самые разнообразные наполнители – в первую очередь ленты, однонаправленные и равнопрочные ткани, плетеные преформы. Например, технологию изготовления вала трансмиссии методом пропитки под давлением с использованием выкладки слоев ткани на оправку и последующей пропиткой в пресс-форме приводят в патентах как американские компании Ccdi Composites Inc. и Sikorsky Aircraft Corp. [22, 23], так и немецкое подразделение Rolls-Royce [24].

Интересный способ изготовления методом RTM представлен корейским автором [25]. В его заявке пресс-форма для изготовления составного приводного вала имеет трубчатый вид с поперечным сечением, аналогичным виду обычного вала, но форма концов которого оптимизирована для легкого извлечения готового композиционного приводного вала из пресс-формы после пропитки. Кроме того, композитный приводной вал сконструирован таким образом, что соединительный шарнир фиксируют дополнительно, и крутящий момент эффективно передается без использования механического или клеевого соединения.

Еще один вариант изготовления трансмиссионного пластикового вала указала компания Sikorsky Aircraft Corp. в своем патенте [26], которая предлагает использовать гибридную конструкцию композитного вала, где его трубчатый элемент включает один или несколько расположенных в осевом направлении слоев, имеющих множество обособленных прядей волокна. Каждая прядь сформирована из высокомодульного углеродного стекловолокна, одна или несколько нитей которого намотаны вокруг углеродного материала (рис. 3). Далее происходит впрыск связующего в осевом направлении слоев, после чего пропитанная сборка отверждается под действием давления и температуры. Подобный способ изготовления конструкции гибридного вала приведен и в патенте [27].

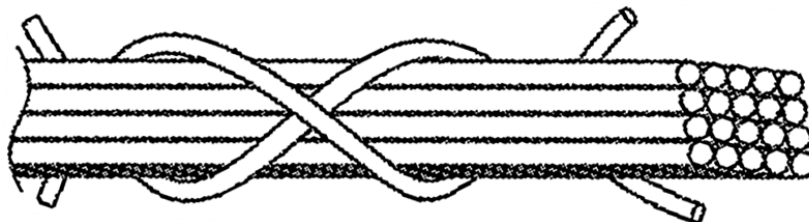


Рис. 3. Схема подготовленных прядей для заготовки

Вообще, качественная установка переходных элементов в трансмиссионных валах – непростая задача, этому вопросу посвящено много исследований. Например, американский разработчик и заявитель патента [28] предлагает производить составной приводной вал, в котором концевые переходные элементы также изготовлены из композиционного материала. Эти концевые адаптеры включают пазы, которые выступают наружу в продольном направлении для передачи крутящего момента, растягивающих и сжимающих сил, а также изгибающих моментов на участок из композиционного материала и наоборот. Для того чтобы увеличить несущую способность для осевого усилия и изгибающего момента, концевые адаптеры имеют по меньшей мере одну кольцевую резьбу. Часть вала из композиционного материала и концевые адаптеры отверждают совместно для получения вала окончательного привода с целью исключения дополнительной работы по сборке элемента трансмиссии.

Интересным направлением при изготовлении элементов трансмиссионных валов из ПКМ методом пропитки под давлением является применение армирующих плетеных преформ, которые сами по себе являются трубчатым элементом и промежуточным продуктом на этапе изготовления пластика.

Использование таких преформ, которые характеризуются высокой подвижностью нитей и способностью создавать криволинейные поверхности, позволяет решать задачу изготовления изделий сложной формы достаточно просто, обеспечивая при этом автоматизацию процесса. Возможность оплетать оправки сложной формы приводит к значительному разнообразию изготавливаемых материалов и позволяет применять при создании изделий экономически эффективные безавтоклавные технологии пропитки, в первую очередь вакуумную инфузию и пропитку под давлением [29–32].

Как известно, существуют две основные схемы плетения (би- и триаксиальная), которые в первую очередь отличаются количеством направлений укладки армирующего волокна [33]. В патенте [34] компания Dana Automotive Systems Group предлагает изготавливать трансмиссионный вал методом пропитки под давлением с применением технологии плетения, используя при этом две схемы армирования волокон – и биаксиальную, и триаксиальную.

В элементах трансмиссии армирующий материал располагают по направлениям действия максимальных внутренних напряжений для данного вида нагрузки, что обеспечивает его максимальную эффективность использования. Необходимое для обеспечения требуемой прочности количество армирующего материала определяют по величине действующей нагрузки и распределяют равномерно в преформе [35]. В патенте на полезную модель [36] описаны биаксиальная сетчатая преформа из композиционного материала, изготовленная методом радиального плетения (рис. 4, а), и возможные варианты усиления конструкции за счет использования различных схем переплетения волокна.

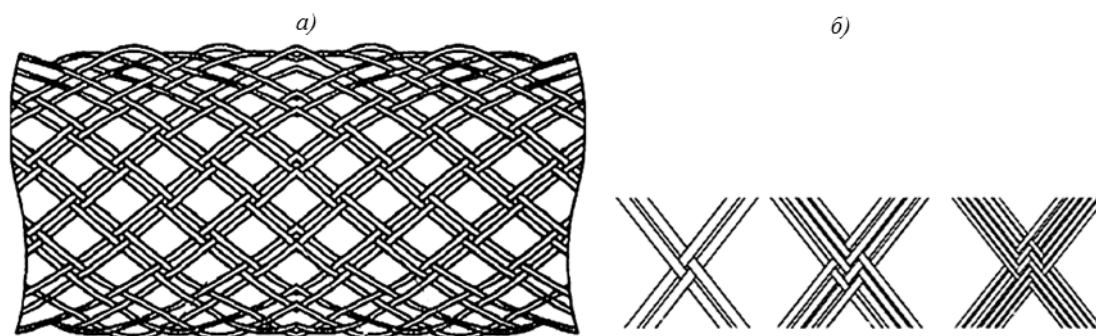


Рис. 4. Схема плетения в биаксиальной преформе (а) и возможные схемы переплетения волокна (б)

Основным классом связующих для изготовления элементов трансмиссионных валов выступают эпоксидные смолы. Однако в научно-технической литературе встречаются упоминания об использовании и термопластов. Так, в патентах [37–40] указано, что при создании элементов трансмиссий и тяг управления из ПКМ в качестве матрицы выступают термопластичные смолы на основе тетрафторэтилена, полиамида, полиэфиримида, полифениленсульфида, полиэфирсульфона, полиэфирэфиркетона, а также смолы на основе эластомеров типа полиуретана и др. Рассматриваемые ПКМ обладают повышенной рабочей температурой при сохранении высоких требований по изгибающим и сжимающим нагрузкам.

Как указано ранее, при изготовлении трансмиссионных валов из ПКМ применяют достаточно традиционные для полимерной отрасли связующие, чаще всего это эпоксидные реактопласты. При формовке пластиков для этих изделий обычно используют следующие сочетания композиции «армирующий наполнитель/связующее»:

- стекловолокно/эпоксидная смола;
- среднемодульное углеволокно/эпоксидная смола;
- высокомодульное углеволокно/эпоксидная смола;
- борное волокно/эпоксидная смола;
- стекловолокно/металл;
- углеволокно/металл.

За выбор окончательного варианта несет ответственность разработчик изделия. Вариант определяют, рассматривая технические требования и технологические возможности производителя, а также опираясь на опыт работы с конкретными материалами [41].

Анализ российских научных публикаций и патентов показал, что процесс изготовления валов трансмиссий и тяг управлений из ПКМ имеет, к сожалению, весьма ограниченное применение в отечественной промышленности. Ситуация с высоконагруженными частями трансмиссий на вертолетостроительных предприятиях РФ в настоящее время иная, чем за рубежом, – в основном их производят из металлических сплавов. Опыт использования ПКМ минимален и относится ко второй половине прошлого века, когда для вертолета Ми-6 были изготовлены экспериментальные образцы трансмиссионных валов на основе углепластика марки КМУ-3 разработки ФГУП «ВИАМ». Показано, что использование углепластика вдвое эффективнее сплава Д16-Т при нормированных нагрузках и не менее чем на 20% при ненормированных – эксплуатационных повреждениях [42]. К сожалению, развития эта работа не получила, и в настоящее время количество разработок отечественных материалов и изделий на их основе (трансмиссионных валов из ПКМ) в России крайне мало. Основные причины известны:

- технологическая отсталость отечественного производства, причем как в производстве исходного сырья (смол, армирующих материалов и преформ на их основе), так и конечных продуктов (композитных изделий);
- отсутствие широкого круга крупных потребителей композитных изделий в тех отраслях промышленности, где композиты способны заменить традиционные материалы.

Решение данных проблем создаст необходимые условия для существенно более широкого применения ПКМ в различных отраслях промышленности РФ и все большего использования перспективных технологий изготовления изделий из пластиков, в том числе при производстве элементов трансмиссии и тяг управления.

### Заключения

Приведен обзор способов изготовления ПКМ для создания элементов трансмиссий авиационной техники.

Представлены варианты работ в этом направлении основных разработчиков в данной области – Boeing Company, Sikorsky Aircraft Corp., Bell Helicopter Textron, Airbus и др. В настоящее время детально смоделированы валы трансмиссии нового поколения из ПКМ. В результате произошло снижение массы детали на 40% (относительно массы детали, выполненной из металлического сплава) при сохранении необходимого уровня свойств.

Показано, что оптимизация состава и структуры элементов трансмиссии и тяг управления нового поколения из ПКМ возможна за счет использования:

- определенной схемы армирования и увеличения объемного содержания армирующего наполнителя;
- армирующих наполнителей на основе высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон;
- материалов, различных по природе и физическим свойствам.

Снижение трудоемкости процесса и повышение автоматизации производства возможны за счет:

- пропитки под давлением сухих армирующих наполнителей (в виде волокон, жгутов, лент, однонаправленных и равнопрочных тканей) в жесткой пресс-форме;
- использования низковязких связующих;
- использования плетеных преформ в технологическом процессе.

Показаны технический уровень выполняемых работ и основные направления при изготовлении элементов трансмиссий из ПКМ, которыми являются:

- технология пропитки армирующего наполнителя методом RTM (пропитка под давлением) сухих армирующих наполнителей (в виде волокон, жгутов, лент, однонаправленных и равнопрочных тканей) в жесткой пресс-форме;
- технология намотки непрерывного волокнистого наполнителя (в виде сухих («сухая намотка») или предварительно пропитанных связующим («мокрая намотка») волокон, жгутов, тканей), наматываемого на неподвижную или вращающуюся формообразующую оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия, и образующего последовательно накладываемые в определенных направлениях слои;
- препреговая технология изготовления предварительно пропитанных наполнителей (препрегов) в виде ровингов, лент, однонаправленных и равнопрочных тканей с дальнейшей их намоткой/выкладкой на оправку и последующим отверждением автоклавным/безавтоклавным способами формования;
- изготовление металлокомпозитных (гибридных) материалов путем совмещения армирующего наполнителя с металлической заготовкой и последующего отверждения полученной композиции в пресс-форме или печи;
- использование в качестве армирующих наполнителей стекло- и углеродных волокон как однонаправленной, так и тканой структуры;
- использование в качестве матрицы как традиционных эпоксидных связующих, так и полимеров другой химической природы: полиэфирэфиркетона, бисмалеимида, полиэфиримида, полиимида и др.;
- использование в качестве дополнительных демпфирующих слоев вязкоупругого материала, позволяющего снизить вибрационные нагрузки.

Таким образом, в настоящее время использование ПКМ для изготовления высоконагруженных элементов трансмиссий взамен традиционных металлических является ведущим и значимым направлением, используемым в мировой практике. Весьма перспективной является технология изготовления данных изделий пропиткой под давлением, в том числе и с использованием плетеных преформ.

**Библиографический список**

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагоднасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
5. Kay B.F., Maass D. Airframe Preliminary Design for an Advanced Composite Airframe Program: USAAVRADCOR-TR-80-D-35A / Applied Technology Laboratory, U.S. Army Research and Technology Laboratories. 1982. Vol. 1. 229 p. URL: <https://www.sikorskyarchives.com/.S-75%20ACAP.php> (дата обращения: 12.11.2019).
6. Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов // *Труды МАИ*. 2017. №92. С. 1–33.
7. Вертолет NH-90 на службе ВС Германии // *Милитари ревью: интернет-портал*. URL: <https://militaryreview.su/49-vertolet-nh-90-na-sluzhbe-vs-germanii.html> (дата обращения: 13.11.2019).
8. Вагин А.Ю., Головин В.В. Композиты в каркасных конструкциях // *Вертолет*. 1999. №1. С. 12–15. URL: <https://nemaloknig.com/read-57920/?page=8> (дата обращения: 13.11.2019).
9. Hybrid metal-composite drive shaft unit and method of manufacturing same: pat. US10280969; filed 13.04.16; publ. 07.05.19.
10. Трансмиссия вертолета // *Avia.pro: информационное агентство*. URL: <http://avia.pro/blog/transmissiya-vertoleta> (дата обращения: 26.11.2019).
11. Method for producing hybrid driveshaft: pat. US6336986; filed 25.01.98; publ. 08.01.02.
12. Rotor wing with integrated tension-torque-transmission element and method for its production: pat. US2010278649; filed 26.04.10; publ. 04.11.10.
13. Composite material metal integrated pull rod and forming method thereof: pat. CN106741835; filed 29.12.16; publ. 31.05.17.
14. Composite Tie Rod and Method for Making the Same: pat. US8679275; filed 26.08.08; publ. 25.03.14.
15. Способ изготовления объемно-армированного композиционного материала: пат. 2379185 Рос. Федерация; заявл. 10.11.06; опублик. 20.01.10.
16. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №1. С. 18–26.
17. Transmission shaft joint design: pat. US2008012329; filed 16.01.07; publ. 17.01.08.
18. Conformal clearance fit fastener, fastener system, and method for composite structures: pat. CN107269655; filed 28.03.17; publ. 20.10.17.
19. Composite power transmission mechanism and vehicle: pat. US6808468; filed 08.05.00; publ. 26.10.04.
20. Ram air turbine with composite shaft: pat. US2016137308; filed 17.11.14; publ. 19.05.19.
21. Цельная соединительная тяга и способ ее изготовления: пат. 2653822 Рос. Федерация; заявл. 10.10.13; опублик. 14.05.18.
22. Composite tube for torque and/or load transmissions and related methods: pat. US2014221110; filed 05.02.14; publ. 07.08.14.
23. Aircraft rotor assembly with composite laminate: pat. US2016207621; filed 16.02.14; publ. 21.07.16.
24. Engine shaft in the form of a fiber-composite plastic tube with metallic driving and driven protrusions: pat. US 2010113171; filed 05.11.09; publ. 06.05.10.

25. Mold for manufacturing composite drive shaft and composite drive shaft manufactured using the mold: pat. US2010113169; filed 05.11.09; publ. 11.06.13.
26. High speed composite drive shaft: pat. US2015060594; filed 18.11.16; publ. 05.03.15.
27. Fiber composite transmission shaft for driving airfoil wing of airplane, has metal flanges inserted in end regions of shaft, and layer structure symmetrical to thickness, fiber volume portions and angle of carbon and glass fiber layers: pat. DE102007018082; filed 18.04.03; publ. 23.10.08.
28. Composite drive shaft with captured end adapters: pat. US2005239562; filed 17.04.07; publ. 27.10.05.
29. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №1 (73). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.11.2019). DOI:10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
30. Montagnier O., Hochard Ch. Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fibre reinforced plastic composite drive shafts // Materials and Design. 2013. Vol. 46. P. 88–100.
31. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №9. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2019) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10.
32. Lawrie D.J. Development of a High Torque Density, Flexible, Composite Driveshaft. 2007. URL: [http://www.scirp.org/pdf/EPE\\_2013090314242136.pdf](http://www.scirp.org/pdf/EPE_2013090314242136.pdf) (дата обращения: 25.11.2019).
33. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5.
34. Open composite shaft: pat. US10344794; filed 18.11.16; publ. 09.07.19.
35. Приводной вал из композиционных материалов: пат. 2601971 Рос. Федерация; заявл. 08.09.15; опубл. 10.11.16.
36. Биаксиальная сетчатая конструкция из композиционного материала: пат. 183461 Рос. Федерация; заявл. 25.06.18; опубл. 24.09.18.
37. Split torque geared power transmissions with composite output shafts: pat. US2009038435; filed 08.08.07; publ.17.01.08.
38. Component for absorbing and/or transmitting mechanical forces and/or moments, method for producing same and use thereof: pat. US9874240; filed 19.06.12; publ. 23.01.18.
39. Hybrid Composite-Metal shaft: pat. US2016271925; filed 19.03.15; publ. 02.09.16.
40. A rotorcraft rotor comprising a hub made of composite materials obtained from carbon fiber fabric dusted in a thermoplastic resin: pat. KR20160085715; filed 07.01.16; publ. 18.07.16.
41. Singha S., Gubran H., Gupta K. Developments in Dynamics of Composite Material Shafts // International Journal of Rotating Machinery. 1997. Vol. 3. No. 3. P. 189–198.
42. Перов Б.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф., Строганов Г.Б. Применение высокомодульных полимерных композиционных материалов в изделиях авиационной техники // Авиационная промышленность. 1982. №8. С. 1–16.