

УДК 678.8

В.А. Гончаров¹, М.Н. Усачева¹, А.В. Хрульков¹**ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЫ И СХЕМ АРМИРОВАНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ ВАЛОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-85-96

Для передачи мощности от двигателя к оси и ведущему колесу в автомобиле с задним приводом требуется карданный вал. Композитный вал имеет множество преимуществ: большую длину, по сравнению с металлическим валом, улучшенные механические свойства, меньшее шумообразование, вибрацию и массу. Корректируя состав смолы и схему армирования волокон, можно повысить механические свойства трансмиссионного вала. Рассмотрены различные варианты модификации угле- и стеклопластиков для улучшения характеристик вала.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, трансмиссионные валы, армирование, углепластик, стеклопластик, связующее, модификация.

V.A. Goncharov¹, M.N. Usacheva¹, A.V. Khrulkov¹**FEATURES OF THE STRUCTURE AND REINFORCEMENT TRANSMISSION SHAFTS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS (review)**

A transmission shaft is required to transfer power from the engine to the axle and drive wheel in a rear wheel drive vehicle. A composite shaft has many advantages: greater length compared to a metal shaft, improved mechanical properties, less noise, vibration and weight. By adjusting the resin composition and the fiber reinforcement pattern, the mechanical properties of the transmission shaft can be improved. Various options for modifying carbon and fiber-glass plastics to improve the characteristics of the shaft are considered.

Keywords: polymer composite materials, transmission shafts, reinforcement, carbon fiber reinforced plastic, fiberglass, binder, modification.

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

Введение

Композиционные материалы (КМ) впервые стали применять в аэрокосмической промышленности в 1970-х гг., однако в настоящее время они широко используются в различных инженерных сооружениях [1–3]: космических кораблях, самолетах, автомобилях, лодках, спортивном оборудовании, мостах и зданиях [4–8]. Массовое распространение КМ в промышленности связано с их отличными характеристиками, такими как удельная прочность и твердость, соотношение прочности или твердости и массы.

Для передачи мощности от двигателя к оси и ведущему колесу в автомобиле с задним приводом требуется карданный вал. Эту высоконагруженную часть обычно изготавливают из стали или алюминия. Когда в начале 1980-х гг. КМ стали более доступными,

автопроизводители осознали, что карданный вал из углеродного волокна имеет значительные преимущества, недоступные для металлических конструкций [9].

Композиты успешно применяются в аэрокосмическом, сельскохозяйственном, автомобильном, метрологическом, морском и спортивном оборудовании, включая: валы промышленных станков, приводные валы, автоматизированные линии автомобильного прессования, каркасы и штанги, штанги опрыскивателей, аэрокосмические конструкции, яхтенные мачты и лонжероны, а также велосипедные рамы [9].

Первый композитный вал для автомобильного применения разработали в подразделении Spicer U-Joint компании Dana Corporation для моделей фургонов Ford econoline в 1985 г. [10]. Несколько серийных автомобилей оснастили такой частью в начале 2000-х гг. [9]. Тем не менее производители оригинального оборудования никогда не изготавливали карданные валы полностью из КМ, так как автомобили с передним приводом не нуждаются в карданных валах, а в автомобилях с полным приводом используются более короткие валы, для которых достаточно металла. Однако всегда присутствует разница в стоимости композитов и металла.

Следует отметить, что приводные валы из углепластика, по сравнению с металлическими, имеют и много преимуществ: повышенные эффективность трансмиссии и комфорт, пониженные масса, шум и вибрация, а также сокращение выбросов CO₂ в атмосферу при эксплуатации [11–14].

Приводные валы используются во многих конструкциях, включая градирни и насосные агрегаты, и их обычно изготавливают из цельной или полый трубки из стали либо алюминия [15]. Вал применяется для соединения трансмиссий, не связанных из-за расстояния между ними, а также для передачи крутящего момента и мощности, которые подвергают их высокому напряжению сдвига и скручиванию [16].

Когда длина стального вала >1500 мм, его изготавливают из двух частей – для увеличения собственной частоты. Высокий удельный модуль упругости у углепластиков в 4 раза больше, чем у алюминия, что позволяет заменить двухсекционный металлический вал односекционным композитным валом, который работает с более высокой скоростью вращения и в результате поддерживает более высокий запас прочности. Такой приводной вал обеспечивает отличное гашение вибрации, комфорт в салоне, уменьшает износ компонентов трансмиссии и увеличивает сцепление с дорогой. Кроме того, использование одиночных торсионных валов сокращает продолжительность сборки и технического обслуживания, снижает стоимость инвентаря и сложность деталей [17].

Трансмиссия большой длины требуется (в случае вертолетов, helicopters, конвертопланов, бесхвостых самолетов с двумя двигателями) для работы на скорости, которая больше первой критической скорости, названной суперкритическим режимом. Основное преимущество длинных валов в том, что они уменьшают количество необходимых подшипников, что значительно снижает затраты на техническое обслуживание и массу трансмиссии. Однако процесс проектирования таких валов более сложный, поскольку валу приходится преодолевать критическую скорость вращения и динамическую нестабильность из-за вращения в таком режиме [18].

Главное, что привлекает инженеров в использовании КМ в приводных валах, – это то, что композиты дают возможность увеличить длину вала. Например, для вала с критической скоростью ~8000 об/мин максимально возможная длина может составлять: для стального вала 1250 мм, для композитного вала 1650 мм [19].

Крутящий момент карданного вала автомобиля должен быть >3500 Н·м, частота вращения >9200 об/мин во избежание вихревых колебаний [19], а скорость вращения

вала, выполненного из стали и алюминия, <5700 об/мин при длине 1,5 м. К тому же стальной вал изготавливают из двух частей для увеличения скорости вращения. Однако такое изделие состоит из трех шарниров, центрального опорного подшипника и кронштейна, что увеличивает общую массу автомобиля и, соответственно, расход топлива. Валы из углепластика имеют жесткость, в 4 раза превышающую жесткость валов из стали или алюминия. Кроме того, их можно изготавливать цельными, не беспокоясь о вихревых колебаниях, возникающих при оборотах >9200 об/мин [19, 20].

Используя армированные волокном КМ, можно выбирать соответствующее ориентирование укладки волокон в приводном валу, благодаря чему значение модуля упругости при изгибе будет больше. Кроме того, малая относительная плотность композитов приводит к желаемому модулю упругости, что увеличивает критическую скорость вращения валов [21].

Производитель модульных промышленных инструментальных систем – фирма Bilsing Automation GmbH – заменила гораздо более тяжелые стальные и алюминиевые валы на композитные, тем самым обеспечив значительные производственные преимущества: более высокие рабочие скорости и производительность, снижение вибрации и более быстрое демпфирование, возможность обработки тяжелых грузов на той же линии, уменьшение потребления энергии и эксплуатационных расходов в течение всего срока службы, простой монтаж для конструкций (требуется меньше болтовых соединений) [9].

Особенности состава композитных валов

В 1990-х гг. разработано связующее на основе эпоксиноволачной смолы, фулфурилглицидилового эфира и отвердителя в виде комплекса трифторида бора с бензиламином [22]. На основе этого связующего изготавливали первые детали для авиационных конструкций. Однако данный КМ обладал таким существенным недостатком, как низкая трещиностойкость, и не мог использоваться в трансмиссионных валах или лонжеронах лопастей вертолетов. С целью повышения прочностных свойств предложено модифицировать связующие наночастицами [23]. Введение фуллеренов C60 и C70 в состав связующего влияет на процесс формирования КМ за счет наличия в наноструктурных добавках активных групп, которые химически реагируют со смолами, входящими в состав связующего, что повышает прочность матрицы в межфазном слое на границе «связующее–наполнитель».

В описании [24] представлен состав матрицы для изготовления карданных валов из углепластика. Смола 3M™ Matrix Resin 3831 обеспечивает долговечность и исключительно высокие прочность, модули сдвига и упругости, а также позволяет получить более прочные и легкие детали. Повышенная твердость обеспечивает минимум потерь, царапин и эрозии, а также улучшает эстетику деталей.

Композиционные материалы, изготовленные из этой смолы, могут быть отверждены при температурах в диапазоне от 120 до 150 °С. Экзотермический процесс при отверждении повышает способность к формованию более толстых частей деталей [25]. Такой препрег подходит для производства КМ, требующих стандартной липкости [26].

Смола 3M™ Matrix Resin 3831 представляет собой смолу с высокой концентрацией однородно диспергированных наночастиц, которая делает КМ более прочным. Ранее попытки увеличить жесткость смолы привели к существенному снижению вязкости разрушения, в результате чего получены очень хрупкие материалы. Данная система состоит из нанокompозитных эпоксидных смол, в которой содержится диоксид кремния в количестве 36% (по массе), и предназначена для изготовления препрегов.

Эти наночастицы окружают и поддерживают углеродные волокна, значительно увеличивая модуль упругости при сдвиге и эффективно задерживая микроперегибание углеродных волокон. Чем больше нагрузка, тем жестче поддержка углеродного волокна. Наполнители обычного размера просто слишком велики, чтобы полностью окружать волокна, и их трудно равномерно распределить в смоле. Запатентованная технология позволяет наночастицам распределиться между каждым углеродным волокном и существенно увеличивать как модуль упругости при сдвиге, так и вязкость разрушения [24].

Известно, что углеродные композитные изделия ограничены прочностью при сжатии. При сжимающей нагрузке углеродные волокна микроизгибаются, что приводит к разрушению композитного продукта. При использовании системы 3M™ Matrix Resin 3831 между частицей и смолой создается такая прочная связь, что при воздействии на композит энергия рассеивается, предотвращая распространение трещин.

Кроме того, данная смола содержит наночастицы диоксида кремния в количестве 30–40% (по массе), что значительно увеличивает продольную длину вала и повышает жесткость, а также дает более прочный продукт с большей стойкостью к истиранию, чем продукт, сделанный с немодифицированной смолой [9].

Эпоксидные или винилэфирные смолы широко используются в связи с высокой прочностью, хорошим смачиванием волокон, меньшей усадкой при отверждении и лучшей стабильностью размеров [16]. Формование матрицы – важный процесс, поскольку она обеспечивает правильную связь смолы с волокном, оптимальное расстояние между слоями полимерного КМ, что укрепляет и защищает изделие от истирания [27].

Можно использовать смолу, структура которой является взаимопроникающей полимерной сеткой (ВПС). Это особый тип полимерной смолы, применяемой в производстве КМ. Обычно смола, используемая в композитах, обладает определенными свойствами для специального применения. Однако при решении множества задач приходится использовать не одну смолу. Смола с ВПС состоит из двух разных смол, при смешивании которых до нужной пропорции у нее проявляются исключительные химические свойства, позволяющие расширить сферу применения.

Основное преимущество таких смол заключается в том, что два разных типа смол не вступают в реакцию друг с другом, а только распределяют свои свойства. Структура является ВПС, которая образована путем полимеризации одной смолы в другой. Между смолами нет реакции по причине отсутствия образования ковалентных связей между полимерными структурами. Из-за этого возможны некоторые потери индивидуальных свойств смол, но правильная пропорция смеси обеспечивает все необходимые характеристики для разработки препрегов [28–30].

В работе [31] использовали смолу на основе сложных виниловых эфиров и полиуретана. Виниловые эфиры обладают хрупкостью, прочностью и водонепроницаемостью, а полиуретан – хорошей прочностью при сдвиге и стойкостью к истиранию. В качестве волокон использовали Е-стекло, чтобы усилить механические свойства. Количество наполнителя варьировалось от 0 до 50% (по массе). Материалы испытывали на прочность при изгибе. Результат показал, что армирование Е-стеклом обеспечивает выдерживание больших нагрузок без потери эластичных свойств. Чем больше наполнителя, тем лучше был результат.

Для повышения трещино- и ударопрочности КМ в состав матрицы вводили различные пластификаторы. Во ФГУП «ВИАМ» на основе связующего марки ЭДТ-10П разработан материал марки ВПС-31, который обеспечивает возможность создания автоматизированной технологии намотки детали с повышенным ресурсом работы. Одновременно решалась задача по обеспечению более высокой технологической

жизнеспособности препрегов. Для этого проведена оптимизация состава связующего. Кроме того, решались вопросы сохранения требуемого времени для выполнения операций выкладки и намотки препрега на основе разрабатываемого состава связующего [32].

Фирма QA1 изготавливает карданные валы по требованиям заказчика. Сначала проектируется вал, определяются нужная жесткость, собственная частота и другие характеристики. В процессе проектирования разрабатывают схемы намотки волокон, устанавливают диаметр и толщину стенок трубок в соответствии с конкретными требованиями заказчика. Для изготовления валов используют эпоксидную смолу марки 3M 4831 с частицами диоксида кремния и углеродные волокна со стандартным модулем упругости (например, углеродное волокно марки T700 фирмы Toray Carbon Fibers America Inc. или других компаний). Фирма QA1 использует высокопрочные углеродные волокна на основе пека, а также сочетание волокон с разными модулями в одной детали. Несмотря на повышение производительности валов, это увеличивает стоимость их производства [9].

После завершения намотки вал обматывают уплотнительной викалевоочной лентой и подвергают термообработке в специальной печи. После отверждения вал обрезается по длине и с одного конца вырезается небольшой кусок, который подвергается микроскопическому исследованию с использованием программного обеспечения для проверки пустот, угла наклона, объема волокна и толщины слоя.

Такие конструкции обычно в 3 раза прочнее металлического вала и в ~ 2 раза легче его, что является их огромным преимуществом: общая масса автомобиля и потери мощности двигателя из-за вращения более тяжелого металлического вала значительно уменьшаются и не влияют на производительность. С точки зрения безопасности КМ при столкновении разрушается так, что исключает дополнительное повреждение транспортного средства и предотвращает травмы пассажиров. Следует также отметить, что композиты обладают лучшей коррозионной стойкостью [9].

Компания ComproTech выпустила углеродные валы с круглым и квадратным сечением, которые могут использоваться вместо стальных. Стандартные квадратные балки производят из графита и углеродных волокон с использованием их автоматизированной выкладки с помощью роботов, где непрерывные волокна размещаются в осевом направлении вдоль длины балки. В результате получают высокопрочный вал из углеродного эпоксидного композита с повышенной жесткостью в осевом направлении (на 10–15%) и большей прочностью при изгибе (до 50%) по сравнению с традиционной балкой с намотанной нитью и теми же размерами. Все валы производят из двухкомпонентной эпоксидной смолы методами автоматической выкладки волокон (AFP) и точного прессования [9].

Трубчатый приводной вал изготавливают из армированного углеродным волокном КМ, где волокнистая арматура находится в структурной конфигурации, обеспечивающей улучшенные эксплуатационные характеристики. Стенка приводного вала содержит по меньшей мере 4 связанных слоя, расположенных по окружности и состоящих из углеродного волокна, находящегося внутри полимерной матрицы. Углеродные волокна обычно расположены продольно в промежуточном слое внутри стенки трубы и способны эффективно увеличивать жесткость вала. Стекловолокно также расположено, как правило, продольно в промежуточном слое внутри стенки трубы, что способствует сопротивлению продольному изгибу всего вала без вредного влияния на его критическую скорость вращения. Такие валы имеют небольшую массу и способны обеспечить надежную работу в отсутствие вредного резонанса трансмиссии и сопутствующего шума, связанного с ним [33].

Особенности схем армирования композитных валов

Снижение массы изделий – один из способов экономии энергии и сокращения выбросов CO₂ в атмосферу при эксплуатации [34–36]. Уменьшить массу деталей можно при использовании вместо традиционных материалов углепластиков, которые при небольшой массе и высокой прочности являются хорошей альтернативой металлам [37, 38]. Моделирование для обнаружения весовой разницы валов показало, что вал из углеродного КМ на 24% (по массе) легче, чем из металла [39]. В другом исследовании эта разница достигла 50% (по массе) [40]. Изменяя угол наклона намотки и ориентацию волокна, можно добиться снижения массы до 72% (по массе) [41].

В работе [31] представлены разработка валов из углеродного/эпоксидного и кевларового/эпоксидного композита, исследование предела прочности при кручении и при изгибе с кручением, а также анализ собственной частоты по сравнению с обычным стальным валом. Аналитические расчеты проводили для различных укладок слоев: ~70% слоев – с ориентацией [+45°, -45°] и остальные 30% слоев – с ориентацией [0°, 90°]. Использование вала из углепластика и эпоксидной смолы взамен стального вала позволило снизить массу первого.

Некоторые из авторов рекомендуют использовать валы из гибридных материалов – смеси стеклянных и углеродных волокон в модифицированной эпоксидной матрице [42–44].

Для изготовления валов в основном используют углеродные волокна, потому что они имеют высокие удельную прочность и модуль упругости, низкое тепловое расширение и высокое сопротивление усталости, что делает их идеальными для передающего вала [16]. Однако стекловолокна также могут применяться для производства карданных валов. Например, тонкие E-стекловолокна обеспечивают хорошую структурную прочность и необычное армирование [45].

В таблице представлены свойства полимерных КМ на основе эпоксидного связующего и углеродных волокон (или E-стекла, или борных волокон), которые используют для производства карданных валов [46, 47].

Свойства композиционных материалов для производства карданных валов

Свойства	Значения свойств полимерных композиционных материалов на основе		
	E-стекла/ эпоксидной смолы	углеродных волокон/ эпоксидной смолы	борных волокон/ эпоксидной смолы
Модуль упругости при растяжении, ГПа, в направлении:			
продольном	50	126,9	204
поперечном	12	11	18,5
Модуль сдвига, ГПа	5,6	6,6	5,59
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3	0,23
Предел прочности при растяжении, МПа, в направлении:			
продольном	800	870	1260
поперечном	40	54	61
Напряжение сдвига, МПа	72	30	67
Плотность, кг/м ³	2000	1600	2000
Объемная доля волокна	0,6	0,6	0,6

В работе [48] анализировали свободную вибрацию, продольный изгиб карданных валов из боропластика с укладкой слоев [90°, ±45°, 0°]₄ методом конечных

элементов. Моделирование показало, что боропластик демонстрирует более высокую прочность при растяжении, при этом не наблюдается значительного увеличения угла скручивания и максимального напряжения сдвига даже при минимальной толщине стенки.

Можно применять высокомодульные и высокопрочные углеродные волокна с эпоксидной смолой, чтобы воспользоваться преимуществами каждого волокна [49]. Основные конструкционные свойства для таких валов – осевая жесткость и момент сопротивления при кручении [50]. Композит из углеродных высокомодульных волокон/эпоксидной смолы обладает недостаточной прочностью при сжатии [18], однако может служить для увеличения осевой жесткости. Кроме того, он может использоваться для увеличения прочности при изгибе. Гибридизацию проводят, применяя одну и ту же смолу. При использовании различных смол требуется определять их совместимость. Пять обычных валов могут быть заменены 1–2 такими гибридными валами [49].

Угол ориентации волокон оказывает большое влияние на собственную частоту колебаний приводного вала. Чтобы увеличить собственную частоту и модуль упругости в продольном направлении вала, волокна должны быть ориентированы под углом 0 градусов. Приводной вал теряет 38% своей собственной частоты, когда углеродные волокна ориентированы в направлении под углом 90 вместо 0 градусов [41].

Расчет на усталость композита приводного вала комплексно выполнен в работах [44, 47]. Обнаружено, что последовательность укладки влияет на сопротивление усталости. Лучше всего укладывать слои с углами ориентации волокон ± 45 градусов около внутренней поверхности торсионной трубки. Кроме того, конфигурация поперечного слоя должна быть расположена снаружи, начинаясь со слоя с ориентацией 90 градусов на внешней стороне.

Максимальный предел прочности на кручение и минимальный продольный изгиб показывает композит с укладкой $[90^\circ; [0^\circ]_3; +45^\circ; [-45^\circ]_2; +45^\circ]$. Для слоев с углами ориентации волокон 90 и 0 градусов использовали композит, состоящий из углеродных высокомодульных волокон/эпоксидной смолы, для слоев ± 45 градусов – композит, состоящий из углеродных высокопрочных волокон. Высокий уровень жесткости обеспечивает слой в направлении под углом 90 градусов. Для предотвращения коробления и минимизации осевого демпфирования, связанного с изгибными колебаниями, потребовалось три слоя в направлении 0 градусов, чтобы избежать достижения первой критической скорости. Количество слоев с углами ориентации волокон ± 45 градусов увеличено вдвое из-за низкой прочности углеродных высокомодульных волокон и эпоксидной смолы – эти слои уменьшают сопротивление крутящему моменту [51].

Угол намотки волокна – важный параметр при проектировании композитов [52, 53], который определяется относительно направления оси. Жесткость изгиба композитного вала является основным фактором, влияющим на собственную частоту. Угол намотки слоев оказывает влияние на распределение нагрузки, что приводит к разнице значений частот. Собственная частота валов из углепластика уменьшалась на ~63% с увеличением угла намотки с 15 до 65 градусов. С уменьшением толщины слоя намотки с 4,20 до 1,20 мм (с 14 до 4 слоев) собственная частота уменьшается на ~34% [54].

Ориентация угла волокна и последовательность укладки имеют большое влияние на прочность при изгибе и динамические характеристики [16].

Обычно в процессе проектирования разрабатывают схемы намотки волокон, устанавливают диаметр трубок и толщину стенок в соответствии с конкретными требованиями заказчика и их характеристиками. Несмотря на то, что структура намотки и последовательность слоев, используемые для каждого клиента или рынка, запатентованы, обычно применяются следующие параметры: осевые волокна 0–35 градусов имеют

тенденцию увеличивать критическую скорость вращения, угол винтовой намотки 35–55 градусов способствует повышению жесткости при кручении, большие углы намотки волокна (55–90 градусов – обрuch) имеют тенденцию увеличивать изгибающий момент. Если желательна «мягкость» при кручении, можно выбрать меньший угол намотки (20–30 градусов), т. е. вал допускает небольшое осевое скручивание, чтобы выдерживать резкую подачу мощности. Осевые модули вала зависят не только от схемы намотки, но и от модуля упругости полимерной матрицы, что сильно влияет на поперечную жесткость пластин и жесткость при сдвиге [9].

Однако из-за высокой стоимости КМ можно изготавливать валы, выполненные не полностью из них, а частично, в гибридном виде – например, алюминий/полимерный КМ, где алюминий передает необходимый крутящий момент, а полимерный КМ увеличивает собственную частоту до 9200 об/мин [55]. Такие гибридные валы изучили в работах [17, 43, 56, 57].

В исследовании [58] смоделировали приводной вал из стали, стеклопластика и углепластика (оба на основе эпоксидного связующего) и провели анализ кручения, вибрации, изменяя такие параметры, как прогиб, напряжение и собственная частота, под воздействием нагрузок. Результаты показали, что передача крутящего момента при изгибе, способность передавать крутящий момент и собственная частота значительно выше у композитного приводного вала по сравнению с обычным стальным валом, а гибридные композитные валы могут использоваться в условиях экстремальной вибрации.

Когда крутящий момент достигает своего максимума, в трансмиссии приводной вал работает как амортизатор и нагрузка на часть трансмиссии уменьшается [16].

При разработке высокоскоростного вала учитывают важную характеристику – вибрацию, которая влияет на срок службы, эффективность, надежность и шум при работе приводного вала. Вибрационные характеристики определяются различными параметрами системы: собственной частотой, динамическими характеристиками и затуханием колебаний [21, 55, 59]. Благодаря сверхвысокой удельной прочности и высокому модулю упругости композитов из углеродного волокна, характеристика собственной частоты приводных валов из углепластика важнее предела прочности при кручении, которая является основным фактором, влияющим на конструкцию металлических приводных валов [60].

Однако демпфирование приводных валов может вызвать нестабильные вибрации при критической скорости вращения, которая сильно влияет на собственную частоту [61]. Эти вибрации зависят от материала и структуры [62]. Например, демпфирование слоистых полимерных КМ из углепластика больше, чем у металлических материалов [18].

В работе [11] исследовали частоту и демпфирование композитных приводных валов с разным объемным содержанием волокон. Обнаружили, что собственная частота возрастает с увеличением объемного содержания волокна и снижением коэффициента демпфирования.

На вибрационные характеристики приводных валов также влияют металлические соединения – шлицы, вилки и фланцы, которыми заканчиваются валы [63]. Обычно эти металлические части приклеивают на композитный материал. Из-за этого может возникать усталость материала [47, 64].

Заключения

Углепластики для трансмиссионных валов имеют несомненные преимущества перед стальными: небольшая масса и низкая инерционность при изменении скоростей вращения. Высокий модуль упругости дает возможность изготавливать длинномерные

конструкции без потери жесткости. Интересной задачей остается создание математических моделей, которые позволяют определять схему армирования приводных валов, при этом существует возможность оптимизации работы валов на кручение и изгиб. Для этого выбирается наилучший вариант количества слоев, углов армирования каждого слоя, армирующий наполнитель с соответствующими характеристиками. Вопрос модификации матрицы должен быть решен таким образом, чтобы обеспечить устойчивую работу всех слоев как на кручение, так и на ударные нагрузки при изменении скоростей вращения. Для серийного изготовления таких деталей наиболее подходящим является вариант послойной намотки с использованием расплава связующего или препрегов. Конечно, необходима реклама, которая бы убедительно доказывала эффективность применения легких и коррозионностойких конструкций из углепластиков.

Анализ патентов показывает неограниченные возможности создания углепластиков за счет модификации связующего. Добавление наночастиц, которые придают материалу высокие значения модулей сдвига и упругости, обеспечивают деталям из углепластика высокую прочность и долговечность. При выборе необходимого отвердителя создаются композиты, которые могут эксплуатироваться при различных температурах – от комнатной до 300 °С и более.

Авторами обзоров [65–67] рассмотрены вопросы изготовления композитных конструкций, в том числе трансмиссионных валов, на основе плетенных преформ.

ВИАМ выпускает различные препреги и разрабатывает разные связующие, которые могут быть использованы при изготовлении деталей типа трансмиссионных валов. Предложения на поставку таких связующих и препрегов можно найти на сайте ФГУП «ВИАМ».

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. №7–8. С. 54–58.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. №5–6. С. 40–44.
3. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for Aircraft Engineering // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. Vol. 82. No. 3. P. 158–167.
4. Имамединов Э.Ш., Валуева М.И. Композиционные материалы для поршневых двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №3 (60). С. 19–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-19-28.
5. 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.
6. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
7. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
8. Хрульков А.В., Тимошков П.Н., Язвенко Л.Н., Усачева М.Н. Композиционные материалы медико-биологического назначения (обзор) // Новости материаловедения: наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №3–4. Ст. 05. URL: <https://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 15.10.2020).
9. Compositesworld: CompoTech launches standard range for carbon finer epoxy beams. URL: <https://www.compositesworld.com/products/compotech-launches-standard-range-for-carbon-finer-epoxy-beams> (дата обращения: 15.09.2020).

10. Mallick P.K., Newman S. Composite materials technology. Hanser Publishers, 1990. P. 206–210.
11. Sino R., Baranger T.N., Chatelet E., Jacquet G. Dynamic analysis of a rotating composite shaft // *Composite Science and Technology*. 2008. Vol. 68. P. 337–345.
12. Kotynia R., Cholostiakow S. New Proposal for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP T-Shaped Profiles // *Polymers-Basel*. 2015. Vol. 7. P. 2461–2477.
13. Khalid Y.A., Mutasher S.A., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Bending fatigue behavior of hybrid aluminum/composite drive shafts // *Materials & Design*. 2007. Vol. 28. P. 329–334.
14. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Трансмиссионные валы из углепластика. Материалы и технологии (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2020. №8 (90). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-46-53.
15. Gay D., Hoa S.V., Tsai S.W. Composite materials: design and application. CRC press, 2004. 552 p.
16. Shoaib Nadeem S.K., Giridhara G., Rangavittal H.K. A Review on the design and analysis of composite drive shaft // *Materials Today: Proceedings*. 2018. No. 5. P. 2738–2741.
17. Abu Talib A., Ali A., Badie M., Azida Che Lah N., Golestaneh A. et al. Developing a hybrid epoxy composite automotive drive shaft // *Materials & Design*. 2010. Vol. 31 (1). P. 514–521.
18. Montagnier O., Hochard C. Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fibre reinforced plastic composite drive shafts // *Materials & Design*. 2013. Vol. 46. P. 88–100.
19. Schmelz F., Seherr Th., Aucktor E. Universal joints and drive shafts. New York: Springer-Verlag, 1992. 251 p.
20. Cho D.H., Lee D.G., Choi J.H. Manufacturing of one-piece automotive drive shafts with aluminum and composite materials // *Composite Structures*. 1997. Vol. 38. P. 309–319.
21. Lee D.G., Kim H.S., Kim J.W., Kim J.K. Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft // *Composite Structures*. 2004. Vol. 63. P. 87–99.
22. Способ получения препрега: пат. SU892930A1 СССР. №2795649/05; заявл. 11.07.79; опубл. 15.02.91.
23. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексагин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.
24. 3M: 3M™ Matrix Resin 3831. URL: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/3M-Matrix-Resin-3831/?N=5002385+3292653729&rt=rud (дата обращения: 30.09.2020).
25. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Усачева М.Н., Пурвин К.Э. Технологические особенности изготовления толстостенных деталей из ПКМ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №3 (75). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-61-67.
26. Тимошков П.Н., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Липкость и возможность использования препрегов для автоматизированных технологий (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №8 (68). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-38-46.
27. Suresh G., Jayakumari L.S. Analyzing the mechanical behavior of E-Glass fibre reinforced interpenetrating polymer network composite pipe // *Journal of Composite Materials*. 2016. Vol. 50. P. 3053–3061.
28. Masaru Z., Yasutomo U., Tetsusei K. Finite element analysis of damaged woven fabric composite materials // *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63. P. 507–516.
29. Zhang Y.X., Yang C.H. Recent developments in finite element analysis for laminated composite plates // *Computers & Structures*. 2009. Vol. 88. P. 147–157.
30. Suresh G., Ganesh B.L., Bharani K.S., Rajesh K.K. Influence of water absorption on glass fibre reinforced IPN composite pipes // *Polímeros: Ciência e Tecnologia*. 2019. Vol. 29 (3). P. 2019–2038.
31. Suresh G., Srinivasan T., Stephen Bernard S., Sekaran V. Analyzing the mechanical behavior of IPN composite drive shaft with E-glass fiber reinforcement // *Materials Today: Proceedings*. 2020. April 2. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320319787> (дата обращения: 25.09.2020).

32. Попов Ю.О., Колокольцева Т.В., Беспалова Л.С., Хрульков А.В., Коган Д.И. Стеклопластик ВПС-31 и гибридный композиционный материал ВКГ-5 из однонаправленных препрегов на основе расплавленного связующего и жгутовых угле-, стеклонаполнителей // *Авиационные материалы и технологии*. 2006. №1. С. 10–20.
33. Carbon fiber reinforced composite drive shaft: pat. US4171626A. No. 890232; filed 27.03.78; publ. 23.10.79.
34. Kim H.S., Park S.W., Hwang H.Y., Lee D.G. Effect of the smart cure cycle on the performance of the co-cured aluminum/composite hybrid shaft // *Composite Structures*. 2006. Vol. 75. P. 276–88.
35. Shokrieh M.M., Hasani A., Lessard L.B. Shear buckling of a composite drive shaft under torsion // *Composite Structures*. 2004. Vol. 64. P. 63–69.
36. Eksi S., Kapti A.O., Genel K. Buckling behavior of fiber reinforced plastic-metal hybrid-composite beam // *Materials & Design*. 2013. Vol. 49. P. 130–138.
37. Rafiee R. On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting resin pipes: A review // *Composite Structures*. 2016. Vol. 143. P. 151–164.
38. Eyer G., Montagnier O., Charles J.P., Hochard C. Design of a composite tube to analyze the compressive behavior of CFRP // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 87. P. 115–122.
39. Ravi A. Design, Comparison and Analysis of a Composite Drive Shaft for an Automobile // *International Review of Applied Engineering Research*. 2014. Vol. 4 (1). P. 21–28.
40. Bhajantri V.S., Bajantri S.C., Shindolkar A.M., Amarapure S.S., Roll K. Design and Analysis of Composite Drive Shaft // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3 (3). P. 738–745.
41. Khoshravan M.R., Paykani A. Design of a Composite Drive Shaft and its Coupling for Automotive Application // *Journal of Applied Research and Technology*. 2012. Vol. 10. P. 826–834.
42. Xu F.-J., Ye J.-R., Xue Y.-D. Design and mechanical analysis of a hybrid composite driveshaft // *Composite Structure*. 1991. Vol. 9. P. 207–216.
43. Gubran H.B.H. Dynamics of hybrid shafts // *Mechanical Research Communications*. 2005. Vol. 32 (4). P. 368–74.
44. Badie M.A., Mahdi E., Hamouda A.M.S. An investigation into hybrid carbon/glass fiber reinforced epoxy composite automotive drive shaft // *Materials & Design*. 2011. Vol. 32 (3). P. 1485–1500.
45. Hua F.J., Hu C.P. Interpenetrating polymer networks of epoxy resin and urethane acrylate resin: 2. Morphology and mechanical property // *European Polymer Journal*. 2000. Vol. 36. P. 27–33.
46. Rangaswamy T., Vijayarangan S. Optimal Sizing and Stacking Sequence of Composite Drive Shafts // *International Journal of Materials Science*. 2005. Vol. 11. No. 2. P. 1392–1320.
47. Badie M.A., Mahdi A., Abu Talib R., Abdullah E.J., Yonus R. Automotive Composite Drive Shafts: Investigation of The Design Variables Effects // *International Journal of Engineering and Technology*. 2006. Vol. 3. No. 2. P. 227–237.
48. Satheesh Kumar Reddy P., Nagaraju Ch. Weight optimization and Finite Element Analysis of Composite automotive drive shaft for Maximum Stiffness // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4. P. 2390–2396.
49. Montagnier O., Hochard C. Compression characterization of high modulus carbon fibers // *Journal of Composite Materials*. 2005. Vol. 39. P. 35–49.
50. Hochard C., Payan J., Montagnier O. Design and computation of laminated composite structures // *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. P. 467–474.
51. Montagnier O., Hochard C. Dynamics of a supercritical composite shaft mounted on viscoelastic supports // *Journal of Sound and Vibration*. 2014. Vol. 333. P. 470–484.
52. Khalifa A.B., Zidi M., Abdelwahed L. Mechanical characterization of glass/vinylester $\pm 55^\circ$ filament wound pipes by acoustic emission under axial monotonic loading // *Comptes Rendus – Mécanique*. 2012. Vol. 340. P. 453–460.
53. Yazdani Sarvestani H., Naghashpour A., Gorjipoor A. A simple-input method to analyze thick composite tubes under pure bending moment reinforced by carbon nanotubes // *Composites. Part B: Engineering*. 2016. Vol. 87. P. 149–160.

54. Sun Z., Xiao J., Yu X., Tusiime R. et al. Vibration characteristics of carbon-fiber reinforced composite drive shafts fabricated using filament winding technology // *Composite Structures*. 2020. Vol. 241. P. 1117–1125.
55. Kim H.S., Kim B.C., Lim T.S., Lee D.G. Foreign objects impact damage characteristics of aluminum/composite hybrid drive shaft // *Composite Structures*. 2004. Vol. 66. P. 377–389.
56. Lee D.G., Sung K.H., Woon K.J., Kook K.J. Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft // *Composite Structures*. 2004. Vol. 63. P. 87–99.
57. Mutasher S.A. Prediction of the torsional strength of the hybrid aluminum/composite drive shaft // *Materials & Design*. 2009. Vol. 30. P. 215–220.
58. Chopde P.V., Barjibhe R.B. Analysis of Carbon/Epoxy Composite Drive Shaft for Automotive Application // *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 2015. Vol. 5 (1). P. 101–111.
59. Kim B., Oh S., Park S. Manufacture of elastic composite ring for planetary traction drive with silicon rubber and carbon fiber // *Composite Structures*. 2004. Vol. 66. P. 543–546.
60. Chang C.Y., Chang M.Y., Huang J.H. Vibration analysis of rotating composite shafts containing randomly oriented reinforcements // *Composite Structures*. 2004. Vol. 63. P. 21–32.
61. Mendonça W., Coelho de Medeiros E., Rezende A., Mathias M.H. The dynamic analysis of rotors mounted on composite shafts with internal damping // *Composite Structures*. 2017. Vol. 167. P. 50–62.
62. Henry T.C., Bakis C.E., Smith E.C. Viscoelastic characterization and self-heating behavior of laminated fiber composite driveshafts // *Materials & Design*. 2015. Vol. 66. P. 346–55.
63. Qatu M.S., Iqbal J. Transverse vibration of a two-segment cross-ply composite shafts with a lumped mass // *Composite Structures*. 2010. Vol. 92. P. 1126–1131.
64. Sevkhat E., Tumer H., Halidun Kelestemur M., Dogan S. Effect of torsional strain-rate and lay-up sequences on the performance of hybrid composite shafts // *Materials & Design*. 2014. Vol. 60. P. 310–319.
65. 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: 25.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.
66. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хиллов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2015. №9. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10.
67. Донецкий К.И., Быстрикова Д.В., Караваев Р.Ю., Тимошков П.Н. Полимерные композиционные материалы для создания элементов трансмиссий авиационной техники (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2020. №3 (87). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-82-93.