

УДК 678.747.2

П.Н. Тимошков¹, А.В. Хрульков¹, Л.Н. Григорьева¹

ТРАНСМИССИОННЫЕ ВАЛЫ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА. МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-46-53

Композиционные материалы находят все большее применение в различных отраслях промышленности. Из полимеров изготавливают относительно мелкие, но конструктивно сложные и ответственные детали машин и механизмов, в то же время все чаще полимеры стали применяться при изготовлении крупногабаритных корпусных деталей, несущих значительные нагрузки. Полимерные композиционные материалы прочно завоевали место среди конструкционных материалов. Композиционные материалы можно без сомнения отнести к наиболее перспективным продуктам как современного, так и будущего промышленного производства.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, карданный вал из углеродного волокна, метод намотки, автомобильная промышленность.

P.N. Timoshkov¹, A.V. Hrulkov¹, L.N. Grigoreva¹

CARBON FIBER TRANSMISSION SHAFT. MATERIALS AND TECHNOLOGY (review)

The use of composite materials is carried out more on the widest scale. More and more relatively small, but structurally complex and critical parts of machines and mechanisms began to be made of polymers, and at the same time, polymers began to be used more and more often in the manufacture of large-sized body parts that carry significant loads. Polymer composite materials have firmly won a place among structural materials. Composite materials can no doubt be attributed to the most promising products of both modern and future industrial production.

Keywords: polymer composite materials, carbon fiber drive shaft, winding method, automotive industry.

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

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят все более широкое применение в самых различных отраслях промышленности. Высокая коррозионная стойкость позволяет применять их в различных климатических зонах с учетом их деградации в процессе эксплуатации [1, 2].

Впервые в самолетостроении была применена углепластиковая деталь в подкосе крыла самолета «Пчелка». Если раньше в 1970-х годах ПКМ использовали при изготовлении спортивного инвентаря: лыж, теннисных ракеток, лыжных палок, то в настоящее время они применяются в таких серьезных конструкциях, как крыло авиалайнеров, в силовых конструкциях мостов, а также в других ответственных конструкциях. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны «Стратегические направления развития материалов

и технологий их переработки на период до 2030 года», аналитический обзор выполнен в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» [3].

Композиционные материалы продолжительное время являются средством снижения массы для высокопроизводительных транспортных средств благодаря своим высоким удельным упруго-прочностным свойствам. Материалы, содержащие углеродные волокна, используются при производстве спортивных автомобилей – начиная от панелей кузова и заканчивая внутренними деталями, а в настоящее время благодаря технологическому усовершенствованию их можно использовать для производства таких нагруженных узлов трансмиссии, как карданный вал, чтобы повысить КПД трансмиссии за счет снижения инерционных сил [4–8].

Композитный или металлический трансмиссионный вал?

Обычно автомобильные приводные валы изготавливают из металлов, они имеют диаметр и толщину такого размера, которые позволяют им передавать полезную нагрузку. Однако такие традиционные валы не только достаточно тяжелые, но кроме того, имеют высокую продольную жесткость. Избыточная масса таких валов увеличивает стоимость производства и эксплуатации транспортного средства, в то время как высокая жесткость этих валов приводит к тому, что боковые вибрации, возникающие в двигателе и трансмиссии, легко передаются в дифференциал при работе трансмиссии на высокой скорости, в результате чего происходит преждевременное разрушение подшипников дифференциала. Проблема шума особенно распространена в автомобилях небольшого размера с двигателями меньшего размера, которые сконструированы таким образом, чтобы обеспечить большее число оборотов коленчатого вала в минуту, чем в автомобилях с двигателями большего размера. В связи с нарастающей тенденцией к созданию более компактных автомобилей и энергосбережению в настоящее время для изготовления карданных валов стали использовать композиционные материалы [9].

Трансмиссионные валы передают большие крутящие моменты, поэтому важно, чтобы они имели минимальную инерционность, т. е. чтобы при знакопеременных нагрузках не было резких ударов и скачков. В то же время они должны обладать достаточной прочностью для того, чтобы передавать крутящий момент.

При изготовлении трансмиссионных валов из углепластика, как правило, используют метод намотки [10]. Различные фирмы уже изготавливают такие трансмиссионные валы из ПКМ, которые, в отличие от конструкций из традиционных материалов, обладают некоторыми преимуществами: меньшей массой и более высокой коррозионной стойкостью, что важно при применении в автотранспорте, где особенно сильно воздействуют антиобледенительные реагенты, масла, бензин и другие химически агрессивные вещества.

Большим препятствием для широкого внедрения ПКМ (и особенно углепластиков) является высокая стоимость. Если 1 кг алюминиевых сплавов типа дюралюминия стоит ~180 руб., то 1 кг углепластика в настоящее время стоит ~24 тыс. руб. В будущем, когда стоимость углепластиков будет снижена, внедрение их в конструкции будет более интенсивным.

Одновременно развивается и совершенствуется технология изготовления, создаются материалы и осваиваются автоматизированные способы их переработки [11, 12], все шире применяются безавтоклавные технологии формования [13], осваиваются способы создания преформ методом плетения [14], расширяется применение «зеленых» технологий, усовершенствуются способы ремонта и утилизации [15].

Карданные валы из ПКМ все чаще используют в автомобильной, авиационной промышленности и судостроении, как правило в самых специализированных областях, из-за их уникального сочетания свойств – лучшей надежности конструкций, достижения более высокого крутящего момента и более высоких оборотов, повышенной безопасности, небольшой массы, уменьшенными шумом и вибрацией [16]. Далее подробнее рассмотрим достоинства композитных карданных валов.

В зависимости от конструкции углепластикового вала он может обладать демпфирующими свойствами, за счет которых будет поглощать ударные нагрузки. Это выгодно для обеспечения долговечности деталей трансмиссии и для снижения резких скачков крутящего момента на ведущих колесах во время переключения передач. Применение композитного карданного вала повышает эффективность трансмиссии за счет снижения инерционных сил.

Независимые испытания показали, что мощность на ведущих колесах увеличивается более чем на 5% только за счет перехода с обычного стального карданного вала на карданный вал из углеродного волокна [17]. Это связано, прежде всего, с более низкой массой карданного вала. Легкий композитный карданный вал позволяет с большим КПД передавать мощность двигателя на ведущие колеса.

Вибрация трансмиссии является распространенной проблемой, которая может ограничивать ее обороты. В гоночных автомобилях металлические карданные валы испытывают гармонические колебания, ограничивая максимальные обороты и не позволяя развивать максимально возможные обороты двигателя. Композитный карданный вал позволяет увеличить рабочую частоту вращения двигателя на 1000 об/мин и дать двигателю возможность работать на максимальных оборотах. С 1987 г. многие гонщики во всех областях автоспорта обнаружили возможность выигрывать секунды за счет более высоких оборотов двигателя в результате гибкой настройки композитных карданных валов.

Все приводные валы приводятся во вращение при приложении к ним крутящего момента. Сопротивление этому повороту определяется моментом инерции, который в свою очередь зависит от плотности материала. Карданные композитные приводные валы имеют момент инерции несколько ниже, чем у алюминия, и приблизительно вдвое меньше, чем у стали. Преимущество более низкого момента инерции заключается в меньшем ударе трансмиссии в момент знакопеременной нагрузки и уменьшении нагрузки на другие компоненты трансмиссии, а также увеличении тяги.

Постоянное вращение при приложении крутящего момента в конечном итоге приводит к тому, что все металлические валы подвергаются пластической деформации. Со временем концы валов на несколько градусов постоянно смещаются и вибрация начинает изнашивать компоненты. В приводных валах из ПКМ практически полностью отсутствует пластическая деформация, вследствие чего приводные валы из углеродного волокна не могут выйти из строя, будучи постоянно вращающимися. Когда крутящий момент от двигателя передается на трансмиссию, все приводные валы начинают вращаться. При определенной «критической скорости», присущей каждому типу карданного вала, происходит изгиб вала, что создает боковое биение и вибрацию. Эта вибрация является основной причиной выхода из строя трансмиссии от коробки передач до ведущего моста. «Критическая скорость» валов из углеродного волокна намного больше, чем у валов из стали или алюминия того же размера. Исключительное гармоническое демпфирование в сочетании с высокой боковой жесткостью и низкой плотностью практически исключают проблемы вибрации.

Одной из проблем металлических карданных валов является то, что при разрушении одного из шарниров карданный вал продолжает вращаться, но вследствие

потери опоры металлический вал чаще всего наносит сильные повреждения нижней части автомобиля, а также его агрегатам. Приводные валы из углеродного волокна созданы с учетом прочности для передачи крутящего момента, но могут быть сломаны при сильном поперечном ударе. Результатом является то, что, в случае выхода из строя U-образного соединения или ярма, углеродный волокнистый композит начинает разрушаться. Когда композит разрушается, вал просто превращается в пучок свободных углеродных волокон и не представляет опасности для водителя и автомобиля.

Более легкий вал из углеродного волокна позволяет экономить топливо и увеличивает скорость вращения, что, как упоминалось ранее, увеличивает крутящий момент. Это также облегчает установку вала в автомобиль. Снижение шума, вибрации и гармонических колебаний, а также более плавное передвижение увеличивают срок службы автомобиля и делают вождение более комфортным.

Рассмотрим, какие карданные валы предлагают различные фирмы.

Обзор материалов и технологий изготовления карданных валов

В статье [18] проводится анализ преимуществ и недостатков применения углеродных волокон в конструкциях карданных валов.

Для того чтобы лучше понять, что происходит с карданным валом из углеродного волокна и каковы его преимущества, ознакомимся с представленной информацией на сайте фирмы-производителя карданных валов QA1. Фирму ассоциируют с производством качественных компонентов подвески автомобиля, но несколько лет назад сотрудники фирмы начали заниматься разработкой и изготовлением карданного вала из ПКМ.

Фирме удалось спроектировать такое изделие, а также разработать технологию его изготовления, что позволило получить карданный вал из композиционных материалов с оптимальным сочетанием критической скорости вращения и передаваемого крутящего момента.

Решающее значение для создания прочного карданного вала, который будет выдерживать высокие скорости, имеет выбор подходящих материалов, а также наилучших углов армирования, которые нужно реализовать в изделии. Меняя углы армирования, разработчик может отрегулировать их для различных видов применения – например, таких как драг-рейсинг, кольцевые гонки и стрит-рейсинг для машин с высокой мощностью.

Существует множество способов изготовить заготовку из углеродного волокна, которая будет использоваться для карданного вала. Для реализации идеи создания такого вала создается компьютерная модель. Эта модель используется для того, чтобы предсказать работу различных материалов и разных углов армирования при использовании углеродного волокна как части карданного вала. Перед тем как какой-либо материал будет применен, необходимо рассчитать критическую скорость вращения карданного вала, чтобы предсказать, как он будет работать при передаче крутящего момента.

После того как конструкция заготовки определена, создается прототип и проводятся испытания по определению прочности на кручение и долговечности работы при критической скорости. Качество и дизайн необходимо контролировать на протяжении всего производственного процесса с помощью специального оборудования, в том числе намоточного станка для углеродного волокна, испытательного стенда на кручение и балансировочного станка. Кроме того, все карданные валы изготовлены в соответствии со стандартом SFI 43.1.

Некоторые опасения могут возникнуть при использовании карданного вала из углеродного волокна, поскольку он состоит из нескольких частей. Для решения этой проблемы фирма QAI сотрудничала с несколькими различными компаниями, занимающимися разработкой связующего материала и конструкционного клея для создания качественного и надежного изделия. Фирмой запатентован 11-ступенчатый процесс, который обеспечивает такую прочность соединения хомута с трубкой из углеродного волокна, что при испытании на кручение точкой разрушения является U-образное соединение, что доказывает надежность вала из углепластика.

В статье [18] отмечается, что самым распространенным мнением является то, что карданные валы из углеродного волокна не выдерживают применения при высокой нагрузке. Ранее большинство карданных валов было изготовлено с использованием старых материалов, и в основном применялись метод намотки труб и клеевой метод соединения углепластикового вала с металлическими законцовками (рис. 1). Совершенствование технологии изготовления, разработка новых материалов, а также многочисленные стендовые испытания на всех уровнях соревнований, в частности бесчисленных кругов в гонках по асфальту и грунтовым кольцам, позволили получить надежный карданный вал из композита, что опровергло любые неправильные представления о характеристиках карданных композитных валов (рис. 2).



Рис. 1. Процесс намотки заготовки карданного вала из ПКМ [18]



Рис. 2. Установленный на автомобиль композитный карданный вал [18]

Рассматривается также вопрос о том, как карданный вал из углеродного волокна может повысить производительность двигателя. В зависимости от конструкции композитного карданного вала, он может иметь демпфирующие свойства, что будет позволять поглощать удары при знакопеременной нагрузке для остальных компонентов карданной передачи. Это выгодно для долговечности компонентов трансмиссии, а также для снижения резких скачков крутящего момента на ведущих колесах во время старта и переключения передачи.

В перспективе при проектировании и разработке технологии изготовления современных деталей трансмиссии, не следует забывать об идее использования карданного вала из углеродного волокна. Выбор правильных материалов и метода изготовления поможет создать карданный вал, который будет передавать всю мощность, создаваемую двигателем, быстрее и эффективнее на ведущие колеса машины, и это обеспечит надежную и долговечную работу трансмиссии.

Компания Rexnord Corporation CENTA предлагает современные решения для конструирования изделий из углепластика, разработанных в сотрудничестве с техническим университетом Дармштадта и ведущими производителями. Прочность

и жесткость таких конструкций из углепластика сопоставимы с характеристиками конструкций из стали, но при этом происходит значительное снижение массы. Валы из углепластика комбинируют с различными гибкими муфтами и соединительными элементами для оптимальной передачи крутящего момента [19]. Конструкция при этом получается чрезвычайно прочной и снижается уровень шума. Одновременно обеспечивается низкое тепловое расширение и отсутствует коррозия [20, 21]. Вал может быть изготовлен методом намотки длиной до 10 метров на секцию (рис. 3).



Рис. 3. Вал из углеродного волокна, изготовленный методом намотки [21]

Компания CENTA – ведущий производитель гибких муфт и валов (рис. 4) с 1970 г. – является также производителем композитных приводных валов (CFRP) для судовых силовых установок. С 1996 г. компания CENTA оборудовала более 150 судов с ~500 приводными валами, все они работали без разрушения в течение нескольких десятков тысяч часов. Обширный опыт проектирования, компоновки и расчета систем валов приводит к экономически эффективным и комплексным решениям.



Рис. 4. Углепластиковый карданный вал производства компании CENTA [21]

В сотрудничестве со всеми участвующими партнерами – верфью, производителями двигателей, коробок передач, гребных винтов, подшипников вала, уплотнений вала – компанией CENTA разработаны и внедрены оптимизированные и индивидуальные концепции для каждого приводного механизма. Для надежного соединения труб из углепластика с металлическими втулками производства компании CENTA разработан собственный запатентованный метод.

Кроме того, эта компания имеет обширные разработки компонентов привода, включающих несколько серий упругих на кручение или жестких на кручение деталей, а также гибких муфт, поэтому для каждого случая разрабатывается оптимальная конструкция. Приводные валы CFRP компании CENTA успешно используются в деталях для скоростных паромов (однокорпусные и катамараны), круизных лайнеров, кораблей класса люкс, яхт, буксиров, буровых катеров, спасательных шлюпок, экскурсионных и туристических катеров.

Компания CENTA CARBON разработала каталог, в котором представлен ассортимент продукции из композитов. Отмечается, что каталог все еще расширяется, добавляются новые размеры и серии [21]. Одной из проблем остается высокая стоимость изделий из углепластика, что, несомненно [22, 23], будет тормозить внедрение их в конструкции приводов.

Заключения

Карданные валы из углепластиков могут найти свое место в конструкциях перспективных автомобилей, морских и речных судов, различных летательных аппаратов и будущих конструкциях. Для этого необходимо постоянно совершенствовать применяемые материалы, а также технологии их переработки в готовое изделие. Необходимо снизить стоимость углепластика, что позволит обеспечить целесообразность перехода на конструкции из ПКМ, а также создать производства, обеспечивающие изготовление требуемого количества таких конструкций по экономически выгодной цене как для производителя, так и для потребителя.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. В истории ВИАМ Петр Дементьев занимает особое место // Крылья Родины. 2017. №1. С. 1–2.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. №4. С. 41–46.
5. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. №31. С. 43–47.
6. Каблов Е.Н. О настоящем и будущем ВИАМ и отечественного материаловедения: интервью // Российская академия наук: офиц. сайт. 2015. 19 января. URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=824e2453-383e-4d9e-b78d-87v9f7bf16ee> (дата обращения: 27.06.2020).
7. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
8. Каблов Е.Н., Валуева М.И., Зеленина И.В., Хмельницкий В.В., Алексахин В.М. Углепластики на основе бензоксазиновых олигомеров – перспективные материалы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2020. №1 (85). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-68-77.
9. Carbon fiber drive shaft: pat. US4089190A; filed 14.04.76; publ. 16.05.78.
10. Биаксиальная сетчатая конструкция из композиционного материала: пат. RU183461 Рос. Федерация; заявл. 25.06.18; опубл. 24.09.18.
11. Гусев Ю.А., Борщев А.В., Хрульков А.В. Особенности препрегов для автоматизированной выкладки методами ATL и AFP // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-6-6.
12. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
13. Тимошков П.Н., Платонов А.А., Хрульков А.В. Пропитка пленочным связующим (RFI) как перспективная безавтоклавная технология получения изделий из ПКМ // Труды ВИАМ:

- электрон. науч.-техн. журн. 2015. №5. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-9-9.
14. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Использование технологий плетения при производстве элементов конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2013. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2019).
 15. 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.
 16. Перов Б.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф., Строганов Г.Б. Применение высокомодульных полимерных композиционных материалов в изделиях авиационной техники. URL: <https://viam.ru/public/files/1982/1982-198546.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
 17. Приводной вал из композиционных материалов: пат. 2601971 Рос. Федерация; заявл. 08.09.15; опубл. 10.11.16.
 18. Wagner B. Cutting Weight: Why You Should Use A Carbon Fiber Driveshaft. URL: www.streetmuscle.com/news/cutting-weight-why-you-should-use-a-carbon-fiber-driveshaft (дата обращения: 05.04.2020).
 19. Карбоновый карданный вал Driveshaft Shop. URL: <https://www.drive2.ru/l/3888355/> (дата обращения: 22.06.2020).
 20. Карбоновый вал, Все С63. URL: <http://weistec.com.ua/product/carbon-fiber-drive-shaft-c63-all> (дата обращения: 22.06.2020).
 21. Вал из пластика. Из углеродного волокна. Полный. Азимутный. URL: <https://www.directindustry.com.ru/prod/centa/product-9279-717567.html> (дата обращения: 05.04.2020).
 22. Карбон, углеткань и углеволокно. URL: https://carbocarbo.ru/shop/carbon_fabric (дата обращения: 27.07.2020).
 23. Изготовление и ремонт углепластиковых валов градилен и приводных валов морских и речных судов Centa. URL: <http://safit.info/carbon-fiber-shaft.html> (дата обращения: 05.04.2020).