

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОЧИХ КОЛЕС ТУРБОКОМПРЕССОРОВ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

COMPOSITE MATERIALS FOR IMPELLERS OF THE TURBOCHARGER OF AUTOMOTIVE ENGINES

А.Н. НЕТРУСОВ
В.М. ФОМИН, д.т.н.

Московский политехнический университет, Москва,
Россия, a.netrusov@mail.ru, mixalichDM@mail.ru

A.N. NETRUSOV
V.M. FOMIN, DSc in Engineering

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,
a.netrusov@mail.ru, mixalichDM@mail.ru

Целью данной работы является поиск и выбор компонентов композиционных материалов, наиболее полно отвечающих требованиям, предъявляемым к материалам рабочих колес турбокомпрессора. В работе приведены современные компоненты композитов, а также их свойства. Сформулированы требования к материалам рабочих колес. Проведен патентный поиск с целью описания существующих концепций рабочих колес из композиционных материалов. Дано описание возможных вариантов изготовления колес, выявлены их достоинства и недостатки. В ходе исследования установлены нетрадиционные преимущества применения композитов в конструкции турбокомпрессора. Описана возможность создания ротора электрической машины из рабочего колеса компрессора путем вплетения в него медной проволоки. Рассмотрены основные технологии изготовления рабочих колес. Приведены отечественные и зарубежные производители полимерных матриц и волокон. Описаны физико-механические свойства хаотически армированных композиционных материалов, доступных на современном рынке. По результатам сравнительного анализа выбран композиционный материал, наиболее полно отвечающий предъявляемым требованиям, – полиамидоимид, наполненный углеродным волокном. Применение непрерывных волокон в рабочих колесах является эффективным способом повышения прочности последних. Установлено, что в качестве более дешевой альтернативы полиамидоимида может выступать углеродосодержащий материал «Карбул», – при условии армирования колеса непрерывными волокнами. Дешевые и широко используемые материалы (наполненные полиамиды, поликарбонаты, эпоксидные смолы и др.) могут быть использованы при изготовлении рабочих колес центробежных нагнетателей с механическим или электрическим приводом. Композиты с углеродным волокном в карбидокремниевой матрице (C-SiC) могут выступить как альтернатива жаропрочным никелевым сплавам, из которых в настоящее время изготавливают турбинное колесо.

Ключевые слова: центробежный компрессор, турбокомпрессор, композитные материалы, рабочие колеса.

The aim of this work is the search and selection of components of composite materials are fully meeting the requirements imposed to the materials of the impellers of the turbocharger. During the work modern components of the composites and their properties is described. The requirements to materials of impellers were formulated. Patent search was carried out to describe existing concepts of impellers made of composite materials. A possible production version of the impellers is described, revealed their advantages and disadvantages. In the course of patent studies have not traditional the advantages of using composites in the design of the turbocharger. Described the possibility of creating a rotor of the electric machine of the compressor impeller by weaving a copper wire. The main technology of manufacture of impellers is described. Given domestic and foreign manufacturers of polymer matrixes and fibers. The described physic-mechanical properties of randomly reinforced composite materials available on the market today. A comparative analysis of selected composite material most fully meets the requirements – polyamideimide filled carbon fiber. The use of continuous fibers in the impellers is an effective way to increase the strength of the latter. It is established that as a cheaper alternative to polyamideimide can be a carbon-containing material "Carbul" provided reinforcement of the wheel with continuous fibers. Cheap and widely used materials (filled polyamides, polycarbonates, epoxy resin, etc.) can be used in the manufacture of impellers in centrifugal blowers with manual or electric drive. Composites with carbon fiber in silicon carbide matrix (C-SiC) can act as an alternative to heat-resistant nickel alloys, of which currently produce the turbine wheel.

Keywords: centrifugal compressor, turbocharger, composite material, impellers.

Введение

Научно-практический интерес к рассмотрению проблемы применения композиционных материалов (КМ) для изготовления рабочих колес (РК) турбокомпрессоров (ТК) автотракторных двигателей обусловлен в первую очередь уникальными физико-механическими свойствами этих материалов. В настоящее время в некоторых отраслях энергетического машиностроения используют композиты, которые имеют плотность значительно ниже традиционных металлических материалов, не уступая им в то же время в прочностных свойствах. Низкая плотность КМ априори обуславливает потенциальную возможность решения таких проблем турбонаддува автотракторных двигателей, как повышение надежности работы подшипникового узла ротора ТК за счет уменьшения действующих на него инерционных нагрузок, а также снижение негативных проявлений – т.н. турбоам и турбоподхватов, обусловленных инерционностью ротора ТК [1]. На сегодняшний день существует множество различных видов КМ, основные свойства которых приведены в данной работе, однако следует учитывать при выборе КМ не только условия эксплуатации РК, но также особенности проектирования и технологии производства.

Цель исследования

Основной целью исследования является обоснованный выбор КМ и анализ их свойств, наиболее полно отвечающих требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления РК ТК автотракторных двигателей.

Материалы и методы

На основе выполненных информационно-аналитических исследований приведены систематизированные материалы и сведения о применяемых и перспективных компонентах КМ, используемых в современных технологиях энергомашиностроения при производстве элементов конструкции турбомашин. Рассмотрены наиболее перспективные компоненты композитов, а также их физико-технические свойства. Проанализированы существующие концепции формирования армирующих структур матриц КМ, выявлены их достоинства и недостатки. Сформулированы требования к материалам рабочих колес ТК с учетом условий их работы в составе агрегатов наддува автотракторных двигателей. По результатам

комплексного анализа физико-механических свойств КМ обоснован выбор компонентов КМ, наиболее полно отвечающих требованиям, предъявляемым к материалам рабочих колес ТК. Кратко рассмотрены состояние и потенциальные возможности отечественного и мирового производства КМ.

Результаты и их обсуждение

Рабочие колеса ТК испытывают значительные инерционные нагрузки из-за высокой частоты вращения ротора, которая может варьироваться от 70000 до 150000 мин⁻¹ и более, что обуславливает повышенные требования к прочностным свойствам материалов, используемых для их изготовления. Не менее важной является проблема сохранения прочностных показателей материала в условиях высоких рабочих температур. В процессе работы ТК температура РК компрессора и турбины может достигать 140 и 700 °С соответственно. Для турбинных колес также предъявляется требование по удельной жесткости (E/ρ), в пределе не менее 19,5 МПа·м³/кг с целью исключения резонансных явлений ротора. Работа ТК в составе системы наддува ДВС характеризуется циклическими сменами нагрузочных и температурных режимов, поэтому материал рабочих колес должен обладать необходимой сопротивляемостью к усталостному и термоусталостному разрушению.

Одной из основных проблем ТК является выход из строя подшипникового узла из-за высоких инерционных нагрузок, действующих на него в процессе работы. Это обуславливает требование по предельно возможному снижению плотности материала РК, которая по определению должна быть меньше чем у традиционных алюминиевых и никелевых сплавов.

В условиях эксплуатации ТК при недостаточной фильтрации воздуха от пыли имеет место *абразивный износ поверхностей лопаток компрессора*, который может привести к утонению лопаток до величины меньше необходимой по расчету, а в предельном случае – к их разрушению. Поэтому при выборе материала для лопаток компрессора ТК необходимо учитывать его устойчивость к *абразивному истиранию твердыми частичками пыли*.

Из рассмотренных выше требований к физико-механическим свойствам КМ для РК ТК главными являются требования к прочностным качествам материала и его плотности.

Для повышения прочности и эксплуатационной надежности колес ТК в базовый материал конструкции (матрицу) целесообразно внедрять армирующие элементы, изготовленные из материалов с более высокими прочностными характеристиками. Путем соответствующего усложнения геометрии армирующих структур может быть достигнуто дополнительное повышение прочностных свойств конструкции РК в целом.

В табл. 1 приведены основные физико-механические свойства ряда армирующих компонентов и матриц [2–6].

С учетом определяющего влияния эффекта армирования на прочностные свойства колес поиск наиболее целесообразных структурных

схем армирования является одной из важнейших задач при формировании конструкции РК из КМ.

Простейшие упрочняющие элементы для традиционных компрессорных колес турбомашин представляют собой конические втулки из материала повышенной прочности, внедряемые в опорную зону диска колеса (см. рис. 1). Их применение вызвано необходимостью компенсации негативных эффектов, связанных с концентрацией напряжений в зоне отверстия под вал [7].

Результаты предварительного анализа показывают, что необходимость применения армирующих элементов в конструкции РК из КМ обусловлена, главным образом, разли-

Таблица 1

Физико-механические свойства армирующих компонентов и матриц композиционных материалов

Наименование материалов	Плотность ρ , кг/м ³	Предел прочности σ_b , МПа	Модуль упругости E , ГПа	Удельная прочность D , МПа·м ³ /кг	Удельная жесткость B , МПа·м ³ /кг
Армирующие волокна					
Стальная проволока	7850	3000	210	0,38	26,75
Вольфрамowo-молибденовая проволока	18950	1850	410	0,10	21,64
Бериллиевая проволока	1848	1391	300	0,75	162,34
Титановая проволока	4540	1600	112	0,35	24,67
Волокна бора, карбида кремния, борсик	2430	3150	443	1,30	182,30
Органические волокна («Капроновое волокно»)	1145	450	3	0,39	2,62
Углеродное волокно («высокопрочное»)	1700	2250	225	1,32	132,35
Стеклоанное волокно («капиллярное стекло»)	1700	2650	60	1,56	35,29
Керамические волокна	2520	1760	130	0,70	51,59
Матрицы					
Алюминиевые сплавы	2780	360	70	0,13	25,18
Магниеые сплавы	1830	322	45	0,18	24,59
Титановые сплавы	4490	898	112	0,20	24,94
Полиимид	1370	145	4	0,11	2,92
Полиамид	1350	120	3	0,09	2,22
Эпоксидная смола	1100	70	3	0,06	2,73
Полифениленсульфид	1600	200	15	0,125	9,375
Полиамидоимид	1420	190	5	0,134	3,52
Полиэфирэфиркетон	1320	115	4	0,087	3,03
Полиэфирная смола	1340	76	2	0,057	1,49

чем напряженности диска по его радиальной координате. Понятно, что в этом случае для создания равнопрочной конструкции диска из полимерной матрицы целесообразно использовать армирующие упрочняющие элементы более сложных конфигураций, размещаемые непосредственно в теле диска. На рис. 2 показаны армирующие элементы, выполненные в виде комбинации композитных колец, полученных в результате намотки и последующей пропитки связующим веществом. Схожая комбинация может быть также выполнена с использованием готового к применению композиционного материала-полуфабриката типа препрега, которую получают путем пропитки армирующей волокнистой основы с тканой или нетканой структурой равномерно распределенными полимерными связующими. Пропитка осуществляется таким образом, чтобы максимально реализовать физико-технические свойства армирующего материала. Производят препреги в форме полотна, покрытого с обеих сторон полиэтиленовой пленкой и свернутого в рулон. В настоящее время препреговая технология находит применение в авиастроении при изготовлении корпусов самолетов и вертолетов, крыльев, обтекателей, винтов.

Полагают [8, 9], что для изготовления колес турбомашин может быть также использован полуфабрикат типа препрега с упорядоченными в радиальном и окружном направлениях армирующими волокнами в виде спирали (см. рис. 3, 4). При связывании его слоев вдоль оси образуется каркас диска РК. В последующем диск соединяется с лопаточной частью, выполненной литьем или другим технологическим приемом.

Для повышения прочностных свойств конструкции колес турбомашин в работах ряда авторов [10, 11] предложены и функционально обоснованы оригинальные технологии формирования пространственно армированных структур, приведенных на рис. 5. Отмечается, что данные варианты исполнения упрочняющих структур достаточно сложны и дороги при производстве, но их высокие прочностные качества окупают сполна все издержки.

Разработанные в сфере энергетического машиностроения современные технологии формирования упрочняющих армирующих структур обуславливают потенциальную возможность создания высокопрочных конструкций колес ТК автотракторных двигателей.

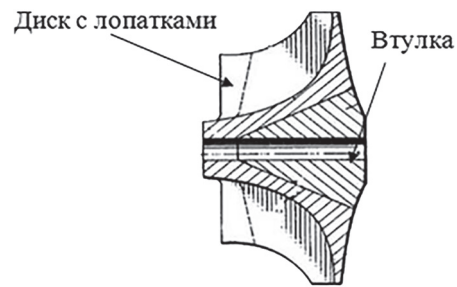


Рис. 1. Рабочее колесо компрессора с втулкой из материала повышенной прочности

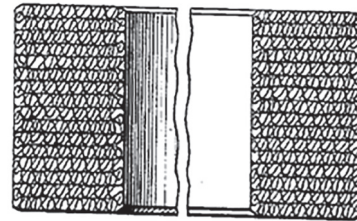


Рис. 2. Армирующие кольца РК

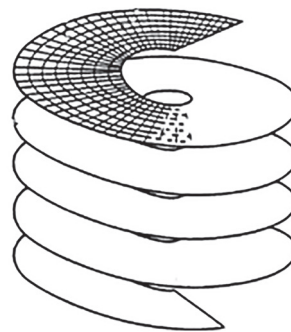


Рис. 3. Армирующая спираль РК

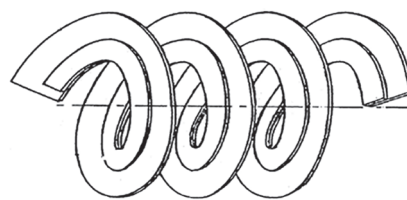


Рис. 4. Композиция армирующих спиралей РК

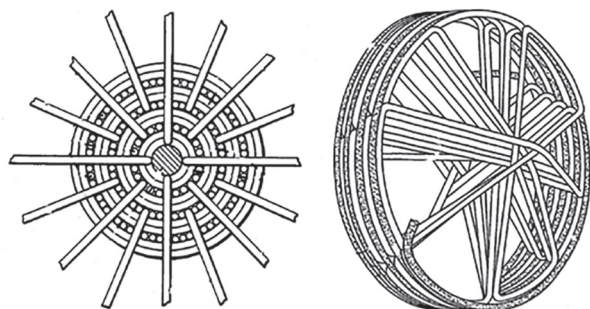


Рис. 5. Пространственно армирующие структуры для РК

Например, в работе коллектива авторов [12] предложен вариант выполнения компрессорного колеса, имеющего внешний армирующий слой диска из КМ с дополнительным упорядоченным в различных направлениях армированием лопаток (см. рис. 6). Матрица КМ может быть выполнена из эпоксидных смол, фенольных смол, полиамидов, полиимидов, полипропилена, полиэфирэфиркетона. Материалом волокна может быть металл, стекло, полимерные или углеродные волокна [12]. Использование углеродных волокон наиболее предпочтительно ввиду их высоких прочностных свойств. Внешний слой диска может быть армирован непрерывными или полунепрерывными волокнами, которые могут быть ориентированы в различных направлениях. В этом варианте слой волокон может быть выполнен в виде тканевого материала, который содержит множество переплетающихся нитей, ориентированных в определенных направлениях. Диск РК может также иметь внутреннее армирование.

Вариант технологии производства РК подобной конструкции, с его преимуществами и недостатками, подробно рассмотрен в отечественной исследовательской практике [13]. Отмечается, что основным недостатком конструкций, в которых используются армирующие волокна, является высокая сложность их изготовления. Лопатки и диск в случае армирования непрерывными и полунепрерывными волокнами необходимо изготавливать по отдельности с последующим связыванием при помощи КМ с дискретным армированием, при этом прочность РК будет лимитироваться

прочностью зон соединения лопаток с диском. Здесь также надо иметь в виду, что внутреннее армирование колеса может дать не только положительный эффект с точки зрения прочности и жесткости, но и негативный – в зонах контакта областей с высокой и низкой жесткости возможно появление концентраций напряжений, что отрицательно скажется на усталостной прочности РК.

Более предпочтительным является вариант изготовления колеса на основе менее сложной технологии, которая заключается в изготовлении РК посредством литья резины с упрочняющей фазой в форму с последующей карбонизацией композиции (технология «Карбул»). Данная технология дает возможность получать углеродосодержащий материал (табл. 2), обладающий высокой температурной стойкостью, а по показателям удельной прочности сопоставимый с традиционными материалами, и, что важно, при более низкой (на 30–40 %) удельной плотности. Полагают [14–16], что композитный углеродосодержащий материал, с учетом его уникальных свойств, может эффективно использоваться не только для колес ТК, но и для изготовления поршней ДВС и направляющих лопаток реактивных двигателей.

Некоторые известные из литературных источников физико-механические свойства для ряда углеродосодержащих композитов приведены в табл. 2.

Композиты с углеродным волокном в карбидокремниевой матрице (C-SiC) характеризуются наиболее высокими прочностными

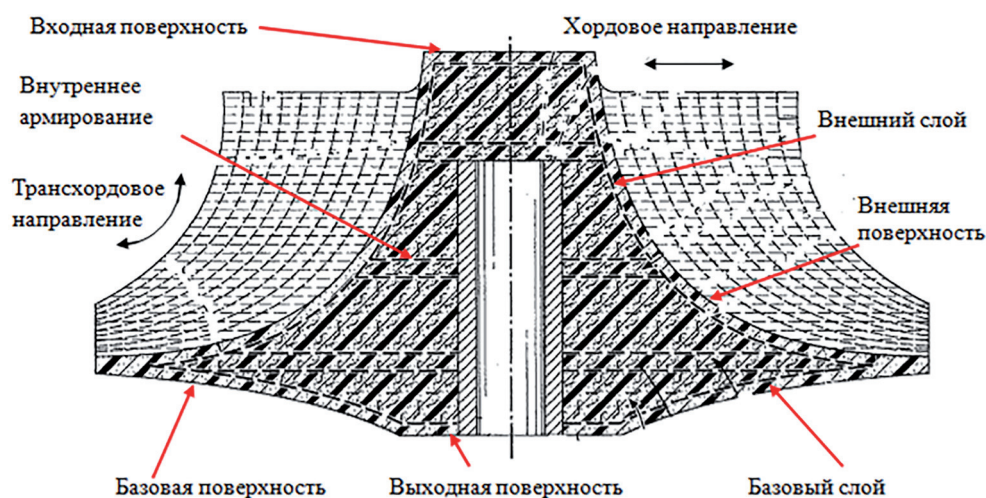


Рис. 6. Схема армирующей структуры рабочего колеса компрессора ТК [12]

Физико-механические свойства углеродосодержащих композитов

Наименование материала	Прочность на разрыв, МПа	Относительное удлинение, %	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Модуль упругости, МПа	Плотность, г/см ³
Shrunk FU 4270	–	–	150	80...100	–	1,8
Shrunk FU 2451	–	–	250	100...120	–	1,9
Карбул СС	72	–	173	121	–	1,20
Карбул 3	40	4	240	120	–	1,17
Карбул 1	42	2	280	90	–	1,24
C-SiC композит	70...100	0,15...0,20	–	160...240	40	2,2...2,4
Композит DLR	80...190	0,15...0,35	–	180...200	60	2,4

качествами [16]. В настоящее время подобные материалы фирмы DLR (свойства одного из них приведены в табл. 2) могут конкурировать с жаропрочными никелевыми сплавами, и использоваться для изготовления турбинного колеса ТК.

Следует отметить, что появление высокопрочных неметаллических КМ стимулирует развитие оригинальных технологий в сфере производства перспективных ТК, разработку новых технических решений, реализация которых становится возможной только при применении подобных материалов. Так в работе [17] обоснована потенциальная возможность создания конструктивно совмещенной с ТК электрической машины путем вплетения медной проволоки в диск РК и преобразования его в ротор электрогенератора или электродвигателя.

Результаты аналитического исследования физико-технических свойств компонентов КМ позволяют провести обоснованный их выбор для изготовления РК турбокомпрессоров с учетом условий эксплуатации ТК в составе систем наддува автотракторных двигателей.

Как уже отмечалось ранее, полимеры имеют плотность более чем в 1,5 раза ниже, чем металлы, и, следовательно, обеспечивают значительное уменьшение инерционности ротора и нагруженности подшипникового узла. Поэтому их целесообразно использовать для формирования конструктивной основы колеса – матрицы. Результаты анализа показали, что наиболее предпочтительным (по стоимостным и эксплуатационным признакам) полимером для матрицы является полиамидоимид, повышение физико-механических свойств которого может быть достигнуто путем введения в его состав углеродных армирующих компонентов,

например нанотрубок [6]. Такой выбор обусловлен не только уникальными физико-механическими свойствами полиамидоимида при нормальных условиях, но и способностью этого материала сохранять свои свойства при температурах свыше 100 °С. Сохранение свойств полиамидоимида при высоких температурах объясняется его высокой температурой (270 °С) стеклования. Для сравнения: полиэфирэфиркетон имеет температуру стеклования 145 °С, а полифениленсульфид 90 °С. Материалы на основе полиамидоимида имеют также преимущество по сравнению с другими дискретно армированными КМ в том, что свойства их практически изотропны, что значительно упрощает процессы расчета и проектирования изделий из этих материалов.

Наиболее легкие полимерные материалы – алифатические полиамиды – снижают более чем на 50 % свои прочностные качества уже при температуре 80 °С, что исключает возможность их практического применения для РК ТК. Эпоксидные смолы также не пригодны для использования в элементах конструкции ТК, т.к. их максимальная рабочая температура лимитируется 100 °С. Все эти материалы, с учетом их температурных ограничений, могут оказаться востребованы при разработке агрегатов наддува с автономным приводом, например, для рабочих колес центробежных нагнетателей с механическим или электрическим приводом.

В качестве армирующих компонентов КМ наиболее перспективным является высокопрочное углеродное волокно, которое имеет плотность приблизительно на 40 % меньше по сравнению с более дешевым и распространенным стекловолокном.

Для изготовления турбинного колеса наиболее приемлем C-SiC композит, который в полной мере удовлетворяет эксплуатационным требованиям и условиям работы ТК автотракторных двигателей.

По результатам анализа рынка производителей можно отметить, что в настоящее время в России существует ряд предприятий, выпускающих КМ. Среди них можно выделить ФГУП НИИ «Графит», ООО «РЕАМ-РТИ», АО «Препрег-СКМ» и ФГУП «ВИАМ». При этом, практически отсутствуют предприятия по производству высокопрочных полимеров. Известно всего одно предприятие – НИИПМ, которое занимается производством этого материала.

В то же время за рубежом существует множество компаний по производству различных высокопрочных полимеров: Solvay Advanced Polymers, LATI, Ryton, Victrex Polymer Solutions, Röchling, Ensinger, Quadrant, и др.

В настоящее время среди наиболее востребованных промышленностью армирующих элементов являются углеродные волокна. Отечественными производителями углеродных волокон являются ОАО НПК «Химпром-инжиниринг», ФГУП НИИ «Графит», НПЦ «УВИКОМ», ООО «Алабуга-Волокно» и ООО «Аргон». За рубежом основными производителями углеродных волокон являются компании Toray, Tejin, Cytec, SGL, Kureha, Mitsubishi и др.

Выводы

1. В настоящее время в мировой и отечественной практике существует целый ряд готовых технических и технологических решений по производству элементов композиционных материалов, которые по своим физико-техническим свойствам отвечают требованиям, предъявляемым к материалам рабочих колес турбокомпрессоров автотракторных двигателей и, следовательно, могут рассматриваться, как альтернатива традиционным металлическим материалам.

2. По результатам проведенного аналитического исследования установлено, что наиболее приемлемой композицией неметаллических материалов, которая может заменить традиционные материалы РК компрессора ТК, является полиамидоимидная матрица, наполненная армирующими углеродными волокнами. В качестве наиболее дешевой альтернативы полиа-

мидоимиду может стать углеродосодержащий материал «Карбул» – при условии армирования колеса непрерывными волокнами. Дополнительное повышение прочностных свойств матрицы может быть достигнуто введением в ее среду углеродных нанотрубок.

3. Наиболее дешевые и широко используемые полиамиды, поликарбонат, эпоксидные смолы и др., армированные непрерывными и полунепрерывными волокнами, могут быть использованы для изготовления элементов конструкции агрегатов наддува, которые в процессе работы не нагреваются свыше 80 °С, например, для рабочих колес центробежных нагнетателей с механическим или электрическим приводом.

4. Композиты с углеродным волокном в карбидокремниевой матрице (C-SiC) могут выступить как альтернатива жаропрочным никелевым сплавам, из которых в настоящее время изготавливают турбинное колесо ТК.

5. Научно-практический интерес к проблемам обоснованного выбора и применения КМ для элементов конструкции ТК вызван в первую очередь уникальными физико-механическими свойствами этих материалов. Одним из важнейших отличительных качеств КМ является показатель плотности, который существенно ниже этого показателя для традиционных металлических материалов, используемых для изготовления рабочих колес ТК автотракторных двигателей. Применение КМ позволяет уменьшить массу колес и, как следствие, инерционные нагрузки на подшипниковый узел ТК, снизить момент инерции ротора, а следовательно, улучшить приемистость и приспособляемость ТК к переменным условиям работы двигателя, что может быть отнесено к разряду принципиально новых альтернативных решений проблем газотурбинного наддува автотракторных двигателей. Его реализация может быть успешно совмещена с рядом других уже реализованных решений, дополняя и усиливая при этом их совокупную эффективность.

Литература

1. Нетрусов А.Н., Фомин В.М. Исследование прочностных качеств рабочих колес из композитного материала агрегатов наддува дизелей // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 2. С. 21–28.
2. Карпинос Д.М. Композиционные материалы. Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 593 с.

3. Крыжановский В.К. и др. Технические свойства полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2003. 240 с.
4. Кузеванов Д.В. Научно-технический отчет по теме: «Конструкции с композитной неметаллической арматурой. Обзор и анализ зарубежных и отечественных нормативных документов». М.: НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, 2012. 66 с.
5. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
6. Степанов Н.А., Тарасов В.А. Упрочнение полиэфирной матрицы углеродными нанотрубками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2010. С. 53–65.
7. Pankratz A.W., Matysek B.J., Mendelson R.A. Composite compressor wheel for turbochargers. United States Patent № US 4, 850, 802. Date of patent 25.07.1989. 8 p.
8. La Brouche J.-P. et al. High speed composite turbine wheel. United States Patent № US 5,222,866. Date of patent 29.06.1993. 3 p.
9. Broquere B. et al. Process for manufacturing a turbine or compressor wheel made of composite material and wheel thus obtained. United States Patent № US 4,751,123. Date of patent 14.06.1988. 4 p.
10. Shultz F.E. Orthogonally woven reinforcing structure. United States Patent № US 3,993,817. Date of patent 23.11.1976. 10 p.
11. Muller N. Woven turbo machine impeller. United States Patent № US 2007/0297905 A1. Date of patent 27.12.2007. 15 p.
12. Hommes D.J., Williams C.E. Composite centrifugal compressor wheel. United States Patent № US 8, 794, 914. Date of patent 5.08.2014. 8 p.
13. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Колесников С.А., Васильев Ю.Н. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 368 с.
14. Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В., Пятов И.С., Врублевская Ю.И., Финкельберг Л.А. Конструкционные материалы для поршней ДВС // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 1 (15). С. 119–125.
15. Пятов И.С., Шибоев О.В., Бузинов В.Г., Макаров А.Р., Костюков А.В., Поседко В.Н., Финкельберг Л.А., Костюченков А.Н. Углеродные материалы для деталей ГТД и ДВС, проблемы и перспективы // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. № 4 (22). С. 55–60.
16. Kumar S., Chandra R., Kumar A., Prasad N.E., Manocha L.M. C/SiC Composites for propulsion Application // Composites and Nanostructures. 2015. № 4. P. 9–15.
17. Woolenweber W.E., Halimi E.M. Compressor wheels and magnet assemblies for internal combustion engine supercharging devices. United States Patent № 6, 145, 314. Date of patent 14.11.2000. 9 p.

References

1. Netrusov A.N., Fomin V.M. Issledovanie prochnostnyh kachestv rabochih koles iz kompozitnogo materiala agregatov nadduva dizelej [Investigation of strength properties of impellers made of composite material for diesel engines] // Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny. 2017. № 2. P. 21–28.
2. Karpinos D.M. Kompozicionnye materialy. Spravochnik. Kiev: Naukova dumka, 1985. 593 p.
3. Kryzhanovskij V.K. i dr. Tekhnicheskie svojstva polimernyh materialov. Uchebno-spravochnoe posobie. SPb.: Professiya, 2003. 240 p.
4. Kuzevanov D.V. Nauchno-tehnicheskij otchet po teme: «Konstrukci is kompozitnoj nemetallicheskoj armaturoj. Obzor i analiz zarubezhnyh i otechestvennyh normativnyh dokumentov». М.: NIIZHB im A.A. Gvozdeva, 2012. 66 p.
5. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. i dr. Konstrukcionnye materialy: Spravochnik. М.: Mashinostroenie, 1990. 688 p.
6. Stepanishchev N.A., Tarasov V.A. Uprochnenie poliehfirnoj matricy uglernodnymi nanotrubkami // Vestnik MGTU im. N. E.H. Baumana. Seriya «Priborostroenie» 2010. P. 53–65.
7. Pankratz A.W., Matysek B.J., Mendelson R.A. Composite compressor wheel for turbochargers. United States Patent № US 4,850,802. Date of patent 25.07.1989. 8 p.
8. La Brouche J.-P. et al. High speed composite turbine wheel. United States Patent № US 5, 222, 866. Date of patent 29.06.1993. 3 p.
9. Broquere B. et al. Process for manufacturing a turbine or compressor wheel made of composite material and wheel thus obtained. United States Patent № US 4,751,123. Date of patent 14.06.1988. 4 p.
10. Shultz F.E. Orthogonally woven reinforcing structure. United States Patent № US 3,993,817. Date of patent 23.11.1976. 10 p.
11. Muller N. Woven turbomachine impeller. United States Patent № US 2007/0297905 A1. Date of patent 27.12.2007. 15 p.

12. Hommes D.J., Williams C.E. Composite centrifugal compressor wheel. United States Patent № US 8, 794, 914. Date of patent 5.08.2014. 8 p.
13. Eliseev YU.S., Krymov V.V., Kolesnikov S.A., Vasil'ev YU.N.. Nemetallicheskie kompozicionnye materialy v ehlementah konstrukcij i proizvodstve aviacionnyh gazoturbinyh dvigatelej. M.: MGТУ im. N.EH. Bauman, 2007. 368 p.
14. Makarov A.R., Smirnov S.V., Osokin S.V., Pyatov I.S., Vrublevskaya YU.I., Finkel'berg L.A. Konstrukcionnyematerialydlyaporshnej DVS // Izvestiya MGТУ «MAMI». 2013. № 1 (15). P. 119–125.
15. Pyatov I.S., SHiboev O.V., Buzinov V.G., Makarov A.R., Kostyukov A.V., Posedko V.N., Finkel'berg L.A., Kostyuchenkov A.N. Uglerodnyematerialy-dlyadetalej GTD i DVS, problemy i perspektivy // Izvestiya MGТУ «MAMI». 2014. № 4 (22). P. 55–60.
16. Kumar S., Chandra R., Kumar A., Prasad N.E., Manocha L.M. C/SiC Composites for propulsion Application//Composites and Nanostructures. 2015. № 4. P. 9–15.
17. Woolenweber W.E., Halimi E.M. Compressor wheels and magnet assemblies for internal combustion engine supercharging devices. United States Patent № 6, 145, 314. Date of patent 14.11.2000. 9 p.