

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННОГО ДИСКА ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Бодаков М.А., Казановская Н.Д., Сахаров А.В.

Ключевые слова: углерод-углеродный композиционный материал, коэффициент трения, композитные тормозные диски.

Аннотация. Углерод-углеродистые композиционные материалы, обладая высокими термомеханическими свойствами и широким разнообразием трибологических характеристик, нашли свое применение в том числе в узлах трения: подшипниках скольжения и тормозных системах. При синтезе композиционного материала с новой структурой важно достоверно знать его трибологические свойства, что можно осуществить лишь в результате натурных испытаний. На основе анализа литературы была разработана экспериментальная установка для испытаний композиционного материала по определению коэффициента трения скольжения. Путем численного моделирования методом конечных элементов определены допустимые области исследований с использованием выбранных образцов. В заключении работы сделаны выводы и изложены планы дальнейших исследований.

DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL SETUP FOR DETERMINING OF FRICTION COEFFICIENT OF COMPOSITE BRAKE WHEEL

Bodakov M.A., Kaganovskaya N.D., Sakharov A.V.

Keywords: carbon-carbon composite material, coefficient of friction, composite brake wheel.

Abstract. Carbon-carbon composite materials are applied in brake systems, due to its high thermomechanical properties and a wide diversity of tribological characteristics. During the synthesis of a new composite, it is necessary to know properly its tribological characteristics. Based on the literature overview, the experimental setup, which allows determining the coefficient of friction of a composite brake wheel, was developed. The allowed area of chosen test pieces usage was obtained by means of finite element analysis. In conclusion, the obtained results are given, and plans of further works are described.

Введение

Композиционный материал (КМ) – искусственно созданный многофазный анизотропный материал с чётко выраженной границей раздела между его компонентами [1,2]. Свойства каждого составляющего в отдельности, как правило, заметно отличаются друг от друга, а благодаря особенностям технологии производства КМ приобретает необходимые характеристики, которые могут даже заметно отличаться от исходных свойств компонент [3].

В ответственных узлах, работающих при высоких температурах, широкое распространение получил углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ), состоящий из углеродного волокна в качестве армирования и пиролитического углерода, пека или стеклоглерода в качестве матрицы. При этом известны различные схемы армирования, наиболее распространенные из которых представлены на рис. 1. Изготовление деталей из УУКМ придаёт им высокую термостойкость (рабочие температуры в инертной атмосфере – до 2500 °С, в окислительной среде – до 500 °С, а при

обработке поверхности антиоксидантом – до 900 °С), кроме того, УУКМ обладает ударной прочностью, радиационной стойкостью, высокой химической стойкостью и низкой плотностью (1,5–1,9 г/см³), превосходя многие материалы по удельным значениям механических свойств. Из него изготавливают такие детали, как сопла реактивных двигателей, высокотемпературная защита объектов в космических аппаратах, пресс-формы для горячего прессования тугоплавких материалов, узлы активной зоны высокотемпературных реакторов, нагревательные элементы в электротехнике. Кроме этого, УУКМ также нашел применение в медицинских изделиях: из него изготавливают сердечные клапаны, пластины, эндопротезы суставов и др. [4]. Примечательно, что вариативность свойств УУКМ настолько широка, что позволяет использовать его и в тормозных системах, и в динамически нагруженных подшипниках скольжения [5,6] – узлах, предъявляющих совершенно противоположные требования к коэффициенту трения используемого в них материала.

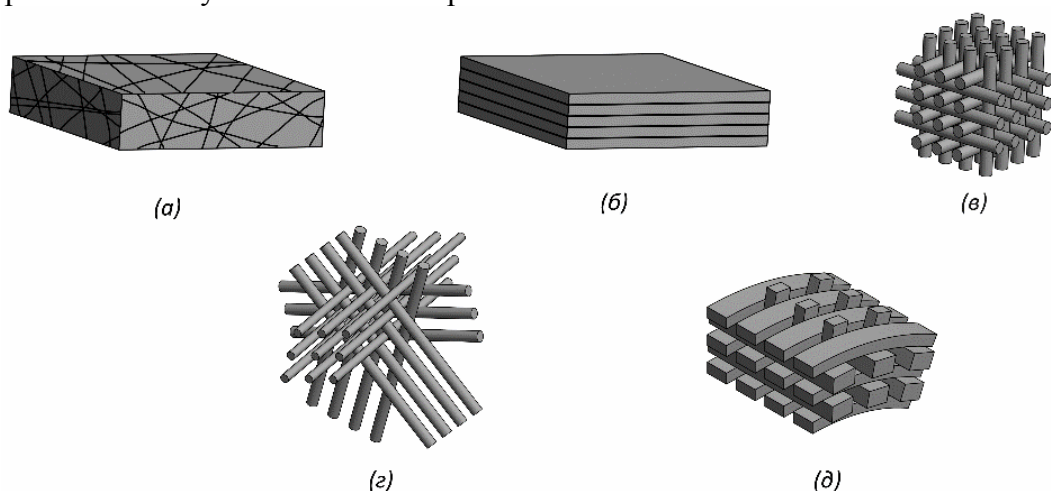


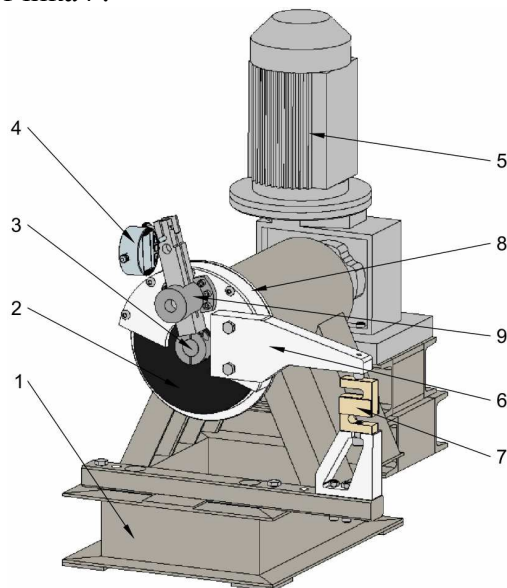
Рис. 1. Схемы армирования УУКМ: а) хаотичная; б) слоистая; в) ортогональная 3Д; г) структура 4Д-Л; д) аксиально-радиально-окружная

Применение УУКМ особенно целесообразно в узлах трения, эксплуатирующихся при тяжелых условиях работы: высокие температура пары трения (до 2500°С) и контактное давление (до 6 МПа). Преимуществом УУКМ заключается в их малой массе, и сегодня углеродные диски применяются более чем в 60% авиационных колёс [6,7]. В тормозных системах отечественных самолётов нашли применение УУКМ типа ТЕРМАР марок ДФ, АДФ, СТД, ТД, также вводятся в эксплуатацию экспериментальные материалы УК1, УК2 [5].

В этой связи, при синтезе нового КМ применяемого в узлах трения, необходимо достоверно знать его трибологические характеристики. В силу этого, целью данной работы является разработка экспериментального стенда для определения коэффициента трения фрикционного диска из композиционного материала.

Описание экспериментальной установки

Общий вид экспериментальной установки приведён на рис. 2. Принцип эксперимента повторяет работу колодочных дисковых тормозов: фрикционный диск из УУКМ 2, установленный на валу 3, приводится во вращение при помощи червячного мотор-редуктора 5; сила трения, действующая на диск 2, создается за счет поджатия колодок 9, установленных в шарнирно опертой гильзе 8, вращение которой зафиксировано рычагом 6 при помощи динамометрической скобы 4. В результате поджатия колодок 9, на гильзу будет действовать момент трения, значение которого фиксируется при помощи тензодатчика 7.



1 – станина, 2 – композитный фрикционный диск, 3 – вал, 4 – динамометр, 5 – мотор-редуктор, 6 – рычаг, 7 – тензодатчик, 8 – гильза, 9 – тормозные колодки

Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Исходя из принципа действия установки, коэффициент трения может быть измерен из равенства момента трения $T_f = f F_{nN} r$, создаваемого колодками, и реактивного момента $T_r = F_{изм} l$ от тензодатчика:

$$f = F_{изм} l / F_N r,$$

где f – коэффициент трения скольжения, F_N – приложенная нормальная сила, измеряемая динамометром, r – расстояние от оси до точки приложения нормальной силы, $F_{изм}$ – сила, измеряемая на тензодатчике, l – расстояние от оси до линии действия измеряемой силы на тензодатчике (рис. 3).

В качестве системы сбора данных используется измерительно-вычислительный комплекс МИС-026 с установленным модулем МС212 и МС 227к, позволяющей осуществлять измерения тензодатчиков и термопар. Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 4.

Разработанная установка позволяет проводить измерения коэффициента трения при различных скоростях скольжения, значениях контактного давления, площади контакта и температуры. Так же возможно проведение экспериментов по оценке износа.

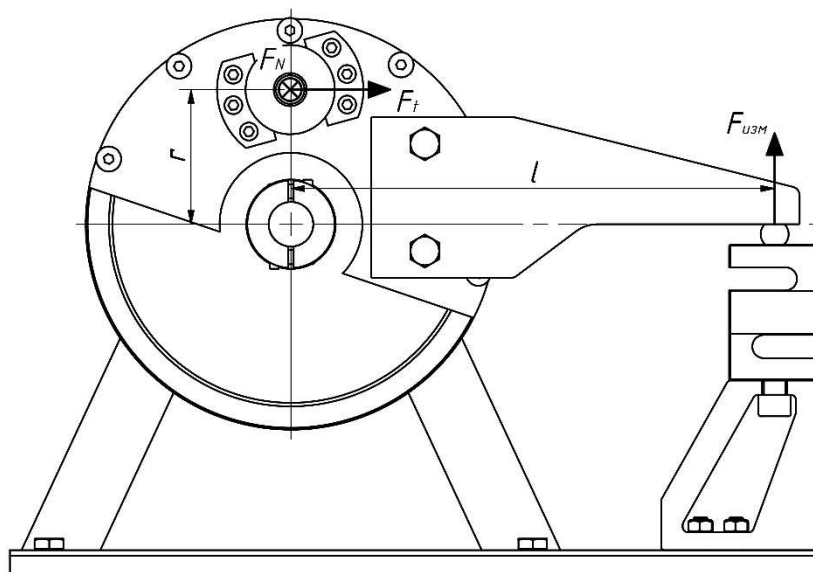
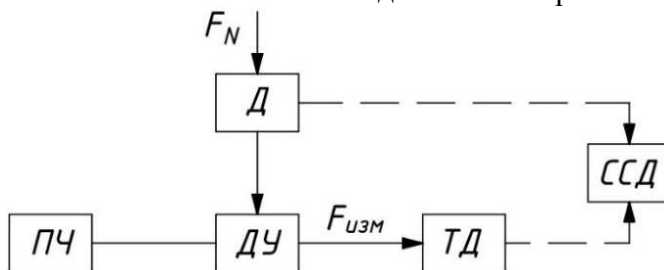


Рис. 3. Расчётная схема дискового тормоза



ПЧ – преобразователь частоты, ДУ – динамическая установка, Д – динамометр,
ТД – тензодатчик, ССД – система сбора данных

Рис. 4. Функциональная схема лабораторной установки

Моделирование эксперимента

Для подтверждения работоспособности конструкции был проведен проверочный расчет в системе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench в модуле для решения задач механики деформируемого твёрдого тела ANSYS Mechanical. Напряжённое состояние было определено и исследовано по результатам термического и прочностного анализов.

В проект были добавлены данные о физических свойствах материала, считающегося ортотропным, включающие в себя значения плотности, пределов прочности, модулей упругости и сдвига, коэффициента Пуассона, теплоёмкостей, коэффициентов теплопроводности и тепловых коэффициентов линейного расширения для различных температур в диапазоне от 20 до 2500°C. Геометрия диска была импортирована из файла 3D модели в формате геометрического моделирования SAT. Для экономии ресурсов рассматривалась половина диска, и расчёт производился с учётом условия симметрии, наложенного на плоскость разреза. С помощью инструмента Meshing была сгенерирована тетраэдральная расчётная сетка на основе поверхностной сетки (метод Patch Conforming), размер элементов принят 5мм.

Термический анализ был проведён модуле стационарного теплового анализа (Steady State Analysis). Начальная температура была принята 25 °С, также она была задана через условие Temperature ко всему телу в качестве граничного условия. На кольцевую поверхность контакта диска с колодкой, получающуюся в процессе вращения диска, было наложено условие теплового потока (Heat flux), числовое значение которого получается из расчёта расчёта, что энергия, затрачиваемая на трение, полностью переходит в тепло.

На всю поверхность диска было задано условие теплообмена его с окружающей средой вследствие конвекции (Convection) в условиях обычного теплообмена с воздухом ($5,0 \cdot 10^{-6}$ Вт/мм²). Результаты расчёта температурных полей диска представлены на рис. 5.

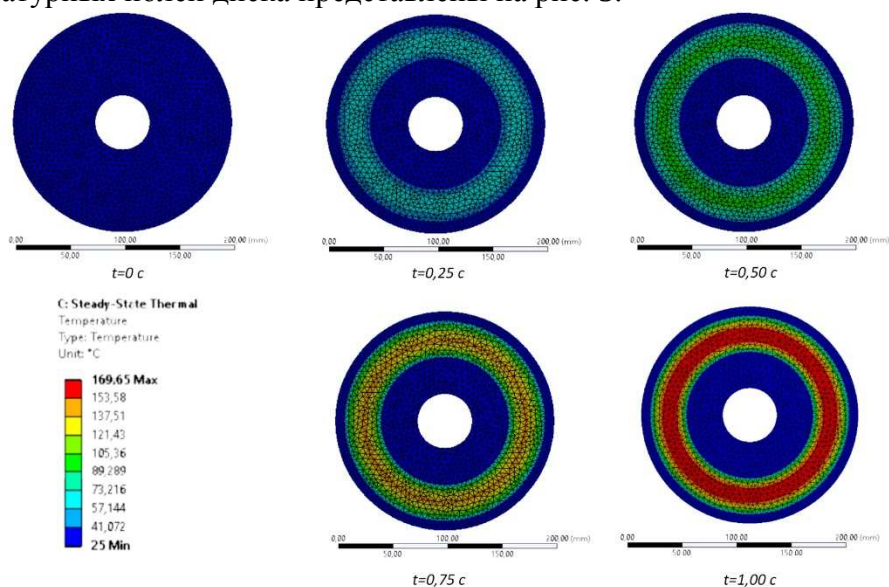


Рис. 5. Распределение температур в разные моменты времени

Анализ напряжённого состояния был проведён в модуле Static Structural. Параметры исследуемой системы были заимствованы из предыдущего решения, внешние нагрузки были заданы в виде момента и нормальной силы. Значение момента получается из момента на валу ЭД и передаточного числа редуктора.

Значение прикладываемой силы было вычислено из условия равенства движущего момента и момента от тангенциальной силы F_τ с учётом коэффициента трения $\mu = 0,4$ (ориентировочное значение, в предельном случае):

$$T = F_\tau \cdot l = \mu \cdot F_N \cdot l;$$

$$F_N = \frac{T}{\mu \cdot l}.$$

Помимо этого, были заданы граничные условия в виде закреплений: цилиндрическая опора (Cylindrical Support) на внешнюю цилиндрическую поверхность, чтобы ограничить перемещение диска в плоскости,

перпендикулярной оси, и получить напряжения от вращающего момента; закрепления по поступательным степеням свободы (Displacement) на плоскость симметрии диска для ограничения его перемещения вдоль оси и на участок контактирования с колодкой для ограничения его перемещения в плоскости диска.

Результаты расчёта напряжённого состояния, – нормальные и сдвиговые напряжения в диске по координатным осям, ось Z совпадает с осью диска, – представлены на рисунке 6.

Выводы

Анализ источников показал перспективность использования УУКМ в проектировании тормозных систем – дисков и колодок. При этом разнообразие структуры УУКМ не позволяет определить единое точное значение коэффициента трения, что делает актуальным его экспериментальное определение и по сей день.

Разработаны образцы, представляющие собой диск и тормозные колодки, а проверочный анализ напряжений и температура частей показал пригодность данных образцов для использования в установке.

На основе намеченного плана экспериментов была создана установка, позволяющая испытывать образцы из УУКМ на трение в широком диапазоне: а) контактных давлений; б) скоростей скольжения; с) площадей контактов.

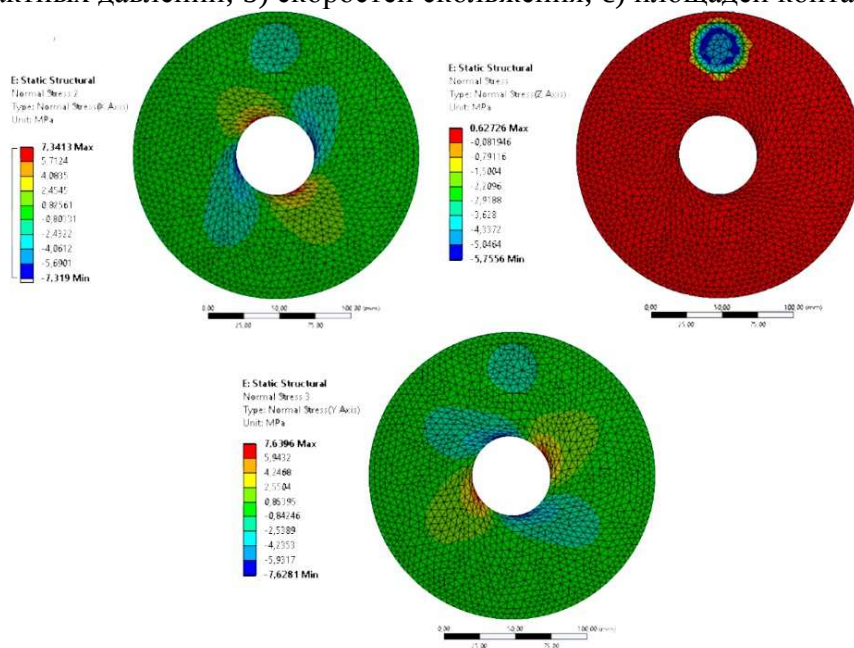


Рис. 6. Результаты расчёта напряжённого состояния в разложении по осям декартовой системы координат

Список литературы

1. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М. Изд-во МГТУ им. НЭ Баумана, 1998. – 516с.

2. Композиционный материал [Электронный ресурс]: URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/7078>
3. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408с.
4. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы: Справочник. – М.: Metallurgy, 1994. – 128с.
5. Степашкин А.А. Работоспособность углерод-углеродных композиционных материалов фрикционного назначения при циклическом нагружении: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МИСИС, 2013. – 168с.
6. Stadler Z. Carbonised-material-based brake pads for a C/C-SiC composite brake disc // Mater. Tehnol. Soizdajatelji. 2001. Vol. 35, № 3/4. P. 205-208.
7. Крамаренко Е.И. и др. Авиационные тормоза с углеродными фрикционными дисками // Трение и износ. 2006. № 3. P. 290-298.

References

1. Bulanov I.M., Vorobei V.V. Technology of rocket and aerospace construction of composite materials. – М.: Publ. of Bauman MSTU, 1998. – 516p.
2. Composite material [Electronic resource]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/7078>
3. Matthews F.L., Rawlings R.D. Composite Materials. Engineering and Science. – М. Technosphere, 2004. – 408p.
4. Bushuev Yu.G., Persin M.I., Sokolov V.A. Carbon-carbon composite materials: guide book. – М.: Metallurgy, 1994. – 128p.
5. Stepashkin A.A. Performance of carbon-carbon composite materials for frictional purposes under cyclic loading. PhD dissertation. – М.: MISIS, 2013. – 168p.
6. Stadler Z. Carbonised-material-based brake pads for a C/C-SiC composite brake disc // Mater. Tehnol. Soizdajatelji. 2001. Vol. 35, № 3/4. P. 205-208.
7. Kramarenko E.I. et al. Aircraft brakes with carbon friction discs // Friction and wear. 2006. № 3. P. 290-298.

Бодаков Максим Александрович – студент, bma17t149@student.bmstu.ru	Bodakov Maksim Alexandrovich – student, bma17t149@student.bmstu.ru
Кагановская Нина Дмитриевна - студент, kaganovskayand@student.bmstu.ru	Kaganovskaya Nina Dmitrievna – student, kaganovskayand@student.bmstu.ru
Сахаров Александр Владимирович – студент, sakharovav1@student.bmstu.ru	Sakharov Alexander Vladimirovich – student, sakharovav1@student.bmstu.ru
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация	Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Received 23.12.2020