

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Буковского Павла Олеговича «Теоретико-экспериментальное изучение фрикционных характеристик углерод-углеродных композитных материалов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8.

Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Буковского П.О. посвящена изучению фрикционных характеристик углерод-углеродных композиционных материалов, применяемых для изготовления тормозных дисков современных пассажирских и транспортных самолетов.

Работа состоит из введения, 4 глав, и заключения, изложена на 134 страницах, содержит 28 рисунков и 16 таблиц, а также библиографического списка из 181 наименования.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) - один из наиболее интересных классов композиционных материалов, в котором все многообразие форм и эксплуатационных характеристик обеспечивается только за счет разных структурных состояний одного химического элемента – углерода. УУКМ состоят из армирующего каркаса на основе углеродных волокон и матрицы, сформированной из коксовых остатков различных органических связующих и/или пиролитического углерода осажденного из газовой фазы.

УУКМ при эксплуатации в восстановительной или инертной атмосфере способны длительное время эксплуатироваться при температурах до 3000 – 3200 °С, время работы в окислительных атмосферах определяется стойкостью нанесенных на их поверхность защитных покрытий. УУКМ сохраняют свои физико-механические характеристики до температуры 900 - 1000 °С, а в интервале температур от 1000 до 2100 – 2400 °С их предел

прочности при растяжении, модуль упругости в отличие от большинства материалов не снижается, а возрастает более чем в 2 – 2,5 раза. Сочетание такого характера изменения упруго-прочностных характеристик с высокой стойкостью к тепловому удару, малыми коэффициентами линейного расширения, высокой теплопроводностью делает их незаменимыми в авиационной и ракетно-космической технике.

В настоящий момент до 65% от всех промышленно производимых в мире УУКМ используется для изготовления авиационных тормозных дисков. Применение данного класса материалов в авиационных тормозных системах позволило на 600 – 800 кг уменьшить массу самолета, существенно снизить эксплуатационные расходы за счет большего ресурса по сравнению с ранее применяемыми металлокерамиками. В настоящий момент зарубежные производители предлагают материалы, обеспечивающие до 4000 – 4500 циклов «взлет – посадка», диски отечественных производителей обладают меньшим ресурсом.

Прекращение поставки комплектующих для поддержания летной годности эксплуатируемых в Российской Федерации импортных самолетов и другие санкционные ограничения требуют значительного увеличения выпуска отечественных материалов и повышение их эксплуатационных характеристик. Полученные Буковским Павлом Олеговичем в представленной им работе результаты могут быть использованы при разработке новых и модернизации имеющихся фрикционных материалов для авиационных тормозных систем, что делает выполненную работу **актуальной**.

В качестве объектов исследования в работе выступали серийно выпускаемые и экспериментальные УУКМ фрикционного назначения, изготовленные в АК «Рубин».

Буковским Павлом Олеговичем проведены трибологические испытания образцов УУКМ при различных схемах контактного взаимодействия (палец-диск, кольцо-кольцо), с различными величинами контактной нагрузки и

скорости скольжения, выполнено исследование продуктов износа на дорожках трения. Испытания проведены в соответствии с методикой полного факторного эксперимента, с использованием современного научного оборудования и достаточного количества образцов, применяемые методики исследования обеспечивали предварительную подготовку поверхностей пар «образец - контртело», автоматическую фиксацию коэффициентов трения в зависимости от времени и пути трения. Исследование продуктов износа на дорожках трения проведено с использованием метода Рамановской спектроскопии на приборе inVia Qontor (Renishaw). Использование современного испытательного оборудования в сочетании с научно обоснованными методами проведения эксперимента позволило получить достоверные результаты, имеющие большой практический интерес.

Выполнено экспериментальное исследование процессов трения между пучками углеродных волокон по схеме контакта перекрещивающиеся цилиндры, с использованием специально изготовленной оснастки для лабораторного микротрибометра УМТ-3МТ. В качестве объектов исследования выбраны карбонизованные и графитированные углеродные волокна производства ООО «Аргон» (г. Балаково), входящего в состав компании ЮМАТЕКС – дивизион «Перспективные материалы и технологии» Госкорпорации «Росатом» и «Zoltek corporation», входящей в настоящий момент в состав «Toqay group».

Исследования поверхности углеродных волокон до и после трибологических испытаний были проведены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 SBH. Для изучения шероховатости поверхности волокна использовалась сканирующая зондовая микроскопия, основной разновидностью которой является атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Полученные Буковским Павлом Олеговичем в диссертационной работе экспериментальные результаты являются новыми, обладают высокой научной и практической ценностью, особенно результаты

высокотемпературных исследований УУКМ. Проведенные обработка и анализ полученных экспериментальных данных позволили предложить алгоритм расчета трибологических свойств (коэффициент трения и интенсивность изнашивания) УУКМ фрикционного назначения, методику расчета внутренних напряжений и накопления контактно-усталостных повреждений в волокнистых углеродных композитах, механические свойства которых описываются осредненными модулями упругости, и теоретико-экспериментальный метод расчета контактно-усталостных характеристик УУКМ.

К полученным в работе новым научным результатам можно отнести:

- Экспериментальную методику определения коэффициента трения между углеродными жгутами по схеме контакта перекрещивающиеся цилиндры. Данная методика и полученные с ее помощью результаты могут в дальнейшем использоваться при проектировании технологического оборудования по производству и переработке углеродных волокон, для которых крайне важно обеспечивать поддержание постоянных усилий.

- Экспериментальную методику определения трибологических свойств углерод-углеродных композитов в бескислородной среде при повышенных температурах и полученные с ее помощью зависимости коэффициента трения от объемной температуры и контактной нагрузки для серийных и экспериментальных отечественных УУКМ фрикционного назначения. Данные результаты могут быть использованы для оптимизации структуры при разработке новых УУКМ и оптимизации режимов выполнения торможения с учетом особенностей изменения коэффициентов трения при изменении температуры тормозного пакета.

- Впервые проведены экспериментальные исследования процессов трения на УУКМ в бескислородной среде при высоких температурах (до $T = 1000^{\circ}\text{C}$) по схеме кольцо–кольцо, в условиях фрикционного разогрева. Получены зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от скорости скольжения и нормальной нагрузки. Проведен анализ

возникающей на контактирующих поверхностях пленки и фрикционного разогрева поверхности при разных нагрузочно-скоростных параметрах взаимодействия для отечественных УУКМ фрикционного назначения.

- Получены аналитические зависимости, позволяющие проводить расчет глубины и момента зарождения контактно-усталостной трещины в УУКМ в условиях циклического нагружения.

Полученные результаты могут использоваться в АК «Рубин», ОАО «Композит», ОАО «НИИГрафит» и др. при разработке новых и совершенствовании существующих УУКМ фрикционного назначения.

Полученные результаты прошли хорошую апробацию, были представлены в виде докладов на 12 конференциях, в том числе 8 всероссийских и 4 международных. Основные результаты, полученные автором и представленные в диссертации, опубликованы в виде 4-х статей в рецензируемых научных журналах рекомендованных ВАК и/или индексируемых в Web of Science, Scopus. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

- введение не в полной мере отражает прогресс в развитии характеристик углеродных волокон, в таблице 1 приведены характеристики волокон 1 – 2 поколений, в то время как использованные в работе волокна Zoltek, относятся к 3 – 4 поколениям и существенно превосходят рассмотренные в таблице 1 по своим прочностным характеристикам;

- во введении нет анализа и приближенной оценки напряженно-деформированного и теплового состояния, возникающего в материале тормоза при выполнении самолетом торможения в различных режимах, что необходимо для обоснования применяемых автором схем и режимов испытаний УУКМ, выбранных в работе;

- во введении есть ряд неточностей в описании технологий получения УУКМ, к примеру: «Процесс газофазного осаждения является весьма длительным и требующим создания сложного оборудования. Для

достижения предельной (максимально возможной) плотности (как правило, немного большей $1,7 \text{ г/см}^3$) требуется уплотнение в течение нескольких месяцев», в то время как процессы газофазного уплотнения позволяют получать плотности до $2,0-2,1 \text{ г/см}^3$ за существенно более короткие циклы уплотнения;

- к недостатку я могу отнести «кодирование» наименований УУКМ в работе, так как название «УУКМ 1» мало что скажет заинтересованному читателю, в то время как «ТЕРМАР-АДФ-***» или «ТЕРМАР-ДФ-***» хорошо известны и исследователям, и среди представителей промышленности, что существенно повысило бы интерес к работе и полученным в ней результатам;

- кодирование наименований материалов исследования, применяемое в работе, не является постоянным, к примеру «УУКМ 3» из глав 1 и 4 и «УУКМ 3» рассматриваемый в главе 3, - это разные материалы, что затрудняет восприятие представленных результатов;

- в таблице 1.1 приведены характеристики исследуемых в первой главе материалов, однако не указан источник этих данных, аналогичное замечание можно сделать по таблице 2.1 в главе 2;

- к недостаткам можно отнести то, что не проведено определение фактических характеристик использованных образцов и их сравнение с табличными, например, по критерию плотности, что не требует больших трудозатрат, но позволяет ранжировать приготовленные образцы на однородные группы;

- во введении рассмотрено влияние угла выхода на поверхность углеродного волокна на трибологические свойства УУКМ, в то время как в тексте диссертации не приведена информация по таким углам для исследованных материалов;

- в работе не хватает информации по характеристикам использованных автором углеродных волокон (количество филаментов, линейная плотность, технологические покрытия, и т.д.);

- не приведены литературные источники, из которых взяты Рамановские спектры углеродных волокон и материалов матрицы, используемые для идентификации продуктов износа на дорожках трения. Выводы о составе продуктов износа по результатам Рамановской спектроскопии (рисунок 3.7) являются не совсем корректными, так как спектры карбонизованной при температуре 2000 °С пековой матрицы и углеродных волокон близки, и различить по ним волокно и матрицу не представляется возможным. На ширину пиков существенное влияние оказывает размеры частиц, от которых получается спектр и наличие в этих частицах дефектов, возникающих в результате механического воздействия. Из приведенных на рисунке данных можно только предполагать более высокую температуру финальной термообработки «УУКМ4». Поэтому для подтверждения выводов о преимущественном формировании дорожек из продуктов износа волокна или матрицы не хватает данных оптической или сканирующей электронной микроскопии, выполненных после соответствующих испытаний на поверхностях трения, и микроскопии самих продуктов износа.

Не зависимо от данных замечаний полученные результаты представляет научную ценность, и имеют высокое практическое значение.

Диссертационная работа Буковского Павла Олеговича «Теоретико-экспериментальное изучение фрикционных характеристик углерод-углеродных композитных материалов», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой. Полученные автором экспериментальные результаты и разработанные методики имеют практическое значение и могут использоваться как при разработке новых, так и при совершенствовании существующих углерод-углеродных композиционных материалов фрикционного назначения, способствовать повышению безопасности эксплуатации современных пассажирских самолетов.

