

## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук, доцента, начальника лаборатории математического моделирования Испытательного центра ОАО «Композит» Хасаншина Рашида Хусаиновича на диссертацию Рудштейна Романа Ильича «Физические свойства многослойных композиционных материалов энергодвигательных установок космической техники и энергетики в условиях воздействия высоких термических и механических нагрузок», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

На сегодняшний день все большую актуальность приобретает проблема разработки конструкционных материалов, способных эксплуатироваться при высоких температурах. Основными сферами применения таких материалов являются ракетно-космическая техника, энергетика и другие отрасли промышленности. Обострение указанной проблемы продиктовано объективной необходимостью повышения мощности энергетических и двигательных установок, и, как следствие, необходимостью повышения температуры рабочего газа-теплоносителя. Широко применяемые ныне конструкционные материалы (в основном, металлы и сплавы на их основе) в большинстве случаев не способны отвечать новым требованиям, главным образом, – требованию высокотемпературной прочности. Для другого класса материалов – технической керамики характерна существенно большая жаропрочность, однако, в чистом виде керамика не способна обеспечить необходимый для конструкционного элемента уровень термо- и трещиностойкости. Одним из наиболее перспективных путей решения данной проблемы по праву считается разработка композиционных материалов, в частности, керамометаллических, позволяющих добиться принципиально нового сочетания физико-химических и эксплуатационных свойств за счет комбинирования фазовых составляющих с различными исходными характеристиками. Несмотря на перспективность и стремительное развитие данного направления в последние годы, задача проектирования подобных материалов до сих пор представляет значительную сложность, поскольку требует проведения целого комплекса предварительных теоретических и экспериментальных исследований.

В рамках данной работы проведен полный комплекс теоретических и экспериментальных исследований по разработке высокотемпературных керамометаллических композиционных материалов с анизотропной слоистой структурой. Таким образом, можно сделать вывод об **актуальности** и **востребованности** тематики настоящей диссертационной работы для аэрокосмической и энергетической отраслей промышленности.

В широком смысле **научная новизна** рассматриваемой работы заключается во всестороннем, комплексном и универсальном характере разработанного подхода, сочетающем в себе совокупность взаимосвязанных и взаимодополняющих теоретических и экспериментальных моделей и методов разработки высокотемпературных многослойных композитов.

В частности, признаками новизны обладают следующие положения диссертационного исследования.

1. Разработанные физико-математические модели, предназначенные для описания и прогнозирования теплофизических и термомеханических характеристик композитов (расчета полей температуры, напряжений, деформаций и оценки термостойкости материала), в основу которых легли современные неклассические градиентные теории, позволяющие внести существенные уточнения в распределения указанных величин в областях межфазных границ.

2. Разработанные и реализованные оптимизационные алгоритмы, позволяющие выявить набор оптимальных структурных параметров композита и достичь наилучшего сочетания его конечных физико-механических свойств.

3. Предложенная многоступенчатая технология синтеза слоистого кермета  $Al_2O_3-Cr$  в сочетании с методикой аттестации достигнутых структурных характеристик материала.

4. Результаты проведенных экспериментальных исследований комплекса физико-механических свойств полученного композита, по результатам которых проведена верификация и оценка погрешностей разработанных теоретических моделей.

5. Предложенная схема реализации узла транспортировки высокотемпературного теплоносителя на борту космического аппарата, выполненная на основе разработанного кермета  $Al_2O_3-Cr$  и ЭВТИ, в сочетании с разработанной физической моделью, описывающей процессы теплопередачи в ЭВТИ.

Все сформулированные в работе положения, выводы и рекомендации грамотно обоснованы, а **достоверность** всех разработанных теоретических моделей подтверждена экспериментально.

Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, могут найти широкое практическое применение на отраслевых предприятиях аэрокосмического и энергетического профиля в ходе выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в части проектирования и разработки современных деталей и узлов, выполненных на основе многослойных керметов и предназначенных для применения в условиях воздействия повышенных температур и механических нагрузок.

Акт внедрения результатов диссертационной работы в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» также является подтверждением их фактической востребованности при выполнении работ по государственному контракту СЧ НИР «Магистраль» (Нано). Таким образом, **практическая значимость** выполненной работы не вызывает сомнений.

**Структуру диссертации** отличает стройность, лаконичность и последовательность изложения материала, а также отсутствие внутренних логических противоречий.

Основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, а его основные выводы отражены в автореферате диссертации. Тема диссертационного исследования соответствует выбранной специальности.

Основная цель диссертационной работы полностью согласуется с поставленными задачами. Задачи исследования в полной мере соответствуют полученным результатам, сформулированным выводам и рекомендациям.

#### **Замечания по диссертации.**

1. В тексте главы 2 диссертации не указано, какие программные средства применялись для численного моделирования распределений температуры, напряжений и деформаций в структуре композита, а также автоматизации процесса структурной оптимизации с использованием разработанной модели.

2. При построении зависимости максимальных деформаций от количества слоев структуры в рамках разработанной модели использовалось значение критического уровня деформации для оксида алюминия  $Al_2O_3$  (стр. 67). Однако ссылка на использованный справочный литературный источник не приведена.

3. В описании технологической цепи синтеза опытных образцов композита (глава 3, стр. 76-77) не приведены кривые гранулометрического распределения использованных исходных порошков керамики и металла, указывается лишь диапазон характерных размеров их частиц. Вид данного распределения может оказывать существенное влияние как на качество консолидации порошков при спекании, так и структуру конечного материала.

4. При описании экспериментальных исследований свойств опытных образцов композита (глава 4) не в каждом случае приводится объем серии образцов, для которой получены приведенные результаты (например, при механических испытаниях на изгиб на стр. 98). По объему серии можно судить как о достоверности полученных данных, так и статистическом разбросе результатов измерений.

5. В работе отсутствуют результаты исследования эрозионной стойкости полученного материала (в т.ч. при повышенных температурах). Указанная

характеристика играет важную роль при рассмотрении полученного материала для применения в качестве стенки узла, контактирующей с горячим газовым потоком.

6. Развѣтый в главе 2 «Критерий прочности слоистого композита» было бы корректнее именовать «Деформационным критерием прочности», тем самым подчеркнув, что он служит для оценки максимального уровня температурных деформаций в структуре материала, а не величины его предела прочности.

7. Зависимость теплового потока, излучаемого с наружной поверхности трубопровода, от количества экранов ЭВТИ (рис. 5.2 на стр. 115) выражена в кВт/м (на единицу длины трубопровода). В выводах главы и общих выводах диссертации указанная величина имеет другую размерность – кВт/м<sup>2</sup> (на единицу площади поверхности трубопровода), что несколько снижает удобство восприятия материала.

Приведенные замечания не снижают научной и практической ценности выполненной работы и носят исключительно рекомендательный характер.

Диссертационная работа Рудштейна Романа Ильича является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложено решение ряда важных для космической и энергетической отраслей задач, связанных с проблемой разработки и создания высокотемпературных слоистых композиционных материалов с анизотропной структурой, обладающих заданной совокупностью механических и теплофизических свойств.

Диссертация Рудштейна Р.И. полностью отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Рудштейн Роман Ильич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,  
к.ф.-м.н., доцент,  
начальник лаборатории  
математического моделирования  
Испытательного центра  
ОАО «Композит»

Р.Х. Хасаншин

Подпись Хасаншина Р.Х. удостоверяю:

01.03.2016

Первый заместитель генерального  
директора ОАО «Композит»

А.Н. Тимофеев