

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата технических наук Бабашова Владимира Георгиевича на диссертационную работу Стрюкова Дмитрия Олеговича на тему «Исследование процесса выращивания из расплава монокристаллических и эвтектических оксидных волокон», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности - 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

**Актуальность темы исследования, соответствие паспорта специальности.** Актуальность выбранной диссертантом темы не вызывает сомнений. Проведенное исследование востребовано многими отраслями машиностроения, в том числе авиационным двигателестроением, результаты могут использоваться для разработки новых перспективных технологий. Одним из основных направлений совершенствования энергонасыщенной техники, в том числе авиационных двигателей является применение композиционные материалов, армированных монокристаллическими и эвтектическими оксидными волокнами. Использование таких материалов позволяет создавать изделия с совершенно новыми потребительскими характеристиками. С этой точки зрения такие композиты являются чрезвычайно перспективными: им свойственны одновременно высокие прочность, твердость, износостойкость, стойкость к термоудару и агрессивным средам, устойчивость к радиационному воздействию, высокая жаростойкость и теплопроводность, высокое сопротивление ползучести и низкий КТР, при этом они обладают относительно низкой плотностью и структурной стабильностью при всех указанных условиях. В настоящее время проблемой является получение оксидных армирующих бездефектных волокон обладающих высокими механическими свойствами при низких и высоких температурах. Выполненное научное исследование, затрагивающее теоретическое и практическое исследование проблемы получения оксидных монокристаллических и эвтектических волокон из расплава, является для отечественного машиностроения весьма актуальным.

Диссертационная работа Стрюкова Д.О. направлена на исследование процесса кристаллизации монокристаллических и эвтектических оксидных волокон, а также на разработку новых подходов для выращивания оксидных волокон из расплава. Автору удалось разработать систему автоматизированного управления выращиванием волокон с использованием датчика веса с учетом поведения профильных кривых. В работе исследованы не только характеристики полученных волокон, но приведены эксперименты по изготовлению на их основе слоисто-волоконистых композитов, исследованы их механические характеристики. Все это свидетельствует об актуальности полученных результатов.

Проведенные исследования соответствуют паспорту специальности - 1.3.8. «Физика конденсированного состояния», а именно (полностью или частично) по пунктам:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы и свойств неорганических и органических соединений как в кристаллическом (моно- и поликристаллы), так и в аморфном состоянии, в том числе композитов и гетероструктур, в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления;

4. Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами.

6. Установление закономерностей влияния технологии получения и обработки материалов на их структуру, механические, химические и физические свойства, а также технологические свойства изделий, предназначенных для использования в различных областях промышленности и медицины

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Диссертантом изучены и критически анализируются известные достижения существующие в современной литературе по теме выращивания оксидных волокон из расплава. Список использованной литературы содержит 171 наименование. Автор достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Результаты и выводы диссертанта обоснованы и достоверны, они опираются

на существующую теоретико-методологическую и нормативно-правовую базу.

### **Новизна и практическая значимость результатов исследования**

Теоретическая значимость выполненной работы состоит в создании математической модели описывающих процессы при формировании оксидных монокристаллических и эвтектических волокон из расплава позволившая разработать алгоритм автоматизации процесса выращивания волокон методом Степанова/EFG (edge defined, film-fed growth).

Новизна представленной работы состоит в следующем:

- впервые на основе численного решения уравнения Лапласа исследованы профильные кривые менисков расплава, а также на основе измеряемого сигнала датчика веса растущего кристалла, проведен расчет реального уровня расплава в тигле и реального (эквивалентного) радиуса кристалла. С учетом полученных данных разработана автоматизированная система управления выращиванием волокон с использованием датчика веса;

- разработана методика группового выращивания оксидных монокристаллических и эвтектических волокон диаметром 150-400 мкм, Определена зависимость среднего характерного размера микроструктуры от скорости выращивания для эвтектических волокон. Показано, что она соответствует модели кристаллизации эвтектик Ханта и Джексона.

- разработана методика получения слоистых композитов с металлической матрицей, армированной сапфировыми волокнами.

- методом Степанова/EFG в автоматическом режиме выращены монокристаллические (сапфир, иттрий-алюминиевый гранат) и эвтектические гранат-содержащие ( $Al_2O_3-Y_3Al_5O_{12}$ ,  $Al_2O_3-Er_3Al_5O_{12}$ ) и перовскит-содержащие ( $Al_2O_3-GdAlO_3$ ) волокна. Проведены механические испытания полученных волокон при температурах 20 °С и 1400 °С.

Практическая значимость работы подтверждается следующим:

- разработана и запатентована система механической стабилизации диаметра волокон в процессе их выращивания, а также разработаны технологические приемы управления микроструктурой эвтектических волокон, как непрерывно, так и дискретно, за счет условий кристаллизации;

- разработан и запатентован способ получения высокотемпературных слоисто-волоконистых композитов. С использованием полученных волокон были изготовлены образцы с двумя различными матрицами, проведены их

механические испытания, показано, что полученным образцам свойственен квазипластический характер разрушения.

**Оценка содержания и завершенности диссертации и автореферата.**

Диссертация состоит из Введения и 5 глав, изложена на 146 страницах, проиллюстрирована 74 рисунками, 2 таблицами. В списке цитируемой литературы приведен 171 источник.

**Во Введении** обоснована актуальность проведенных исследований, обозначены цели и задачи работы, описана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту. Также во Введении указан личный вклад автора, достоверность полученных результатов, апробация и публикации, подготовленные за время работы над Диссертацией.

**В первой главе** приведен обзор литературы, в котором рассмотрены основные свойства монокристаллических и эвтектических оксидных волокон и наиболее распространенные методы их получения. Приведены основные свойства непрерывных монокристаллических и эвтектических оксидных волокон. Описаны основные методы выращивания волокон из расплава: micro-pulling down ( $\mu$ -PD), laser-heated pedestal growth method (LHPG), внутренней кристаллизации (ICM - internal crystallization method), edge-defined, film-fed growth (EFG), который является вариантом способа Степанова. Глава заканчивается выводами и постановкой задач работы.

**Во второй главе** представлены анализ поведения профильных кривых волоконных менисков расплава при выращивании монокристаллических и эвтектических оксидных волокон методом Степанова/EFG, проведенный на основе численного решения капиллярного уравнения Лапласа, которое в статическом приближении хорошо описывает форму мениска расплава, находящегося между кристаллом и формообразователем. Проведенные расчёты позволяют на основании сигнала датчика веса растущего кристалла определять уровень расплава в тигле и реальный радиус кристалла непосредственно в процессе выращивания.

**В третьей главе** описаны проведенные исследования по выращиванию монокристаллических оксидных волокон и непосредственно разработка методики получения монокристаллических оксидных волокон (сапфир -  $Al_2O_3$  и иттрий – алюминиевый гранат -  $Y_3Al_5O_{12}$ ), автоматизированной системы управления (АСУ) выращивания волокон, включая разработку

тепловой зоны и технологической оснастки. Описаны основные концепции разработанной АСУ с использованием расчетов, проведенных во второй главе. Разработана методика группового выращивания волокон, позволяющая одновременно выращивать до 20 волокон за один процесс. Для снижения шероховатости поверхности волокна разработана и запатентована система стабилизации диаметра волокна в процессе выращивания. Приведены результаты механических испытаний полученных волокон. Описан разработанный и запатентованный метод формирования линзовых окончаний на торце волокна непосредственно в процессе выращивания.

**В четвертой главе** описано исследование и получение эвтектических гранат-содержащих ( $Al_2O_3-Y_3Al_5O_{12}$ ,  $Al_2O_3-Er_3Al_5O_{12}$ ) и перовскит-содержащих ( $Al_2O_3-GdAlO_3$ ) волокон. В случае выращивания гранат-содержащих волокон показано, что средний размер их микроструктуры зависит от скорости выращивания. Для  $Al_2O_3-GdAlO_3$  показано, что в диапазоне скоростей выращивания от 90 до 150 мм/ч формируется структура, в которой стержни  $GdAlO_3$  регулярным образом располагаются в матрице  $Al_2O_3$ . Также в главе приведены результаты механических испытаний полученных волокон.

**Пятая глава** посвящена изготовлению и исследованию слоисто-волоконистых композитов, армированных сапфировыми волокнами. Были изготовлены композиционные материалы с двумя различными матрицами: с матрицей на основе ниобия и алюминия и с матрицей на основе ниобия и молибдена. Исследованы их механические характеристики, показано, что полученным образцам свойственен квазипластический характер разрушения.

В заключительной части сформулированы основные результаты и выводы.

Результаты диссертационного исследования нашли достаточно полное отображение в автореферате. Основные результаты исследований опубликованы в изданиях из перечня ВАК и в системе цитирования WOS и Scopus, получено три патента на изобретения.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов.** В ходе выполнения работы автором были получены следующие основные результаты, подтверждающие научную новизну и практическую значимость:

- Впервые на основе численного решения уравнения Лапласа исследованы профильные кривые менисков расплава, а также на основе измеряемого сигнала датчика веса растущего кристалла, проведен расчет реального уровня расплава в тигле и реального (эквивалентного) радиуса кристалла. С учетом полученных данных разработана автоматизированная система управления выращиванием волокон с использованием датчика веса;

- Методом Степанова/EFG в автоматическом режиме выращены монокристаллические (сапфир, иттрий-алюминиевый гранат) и эвтектические гранат-содержащие ( $Al_2O_3-Y_3Al_5O_{12}$ ,  $Al_2O_3-Er_3Al_5O_{12}$ ) и перовскит-содержащие ( $Al_2O_3-GdAlO_3$ ) волокна. Проведены механические испытания полученных волокон при температурах 20 °С и 1400 °С;

- Разработана и запатентована система механической стабилизации диаметра волокон в процессе их выращивания, а также разработаны технологические приемы управления микроструктурой эвтектических волокон, как непрерывно, так и дискретно, за счет условий кристаллизации;

- Разработан и запатентован способ получения высокотемпературных слоисто-волоконистых композитов. С использованием полученных волокон были изготовлены образцы с двумя различными матрицами, проведены их механические испытания, показано, что полученным образцам свойственен квазипластический характер разрушения.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается современными методами исследования, достаточным количеством экспериментальных данных и их хорошим согласованием с данными, полученными другими исследователями.

Результаты исследований опубликованы в 8 статьях по тематике работы в научных журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, а также в 3 главах монографий. Также по основным результатам диссертационной работы получено 3 патента, что подтверждает оригинальность представленных решений. Материалы работы неоднократно обсуждались на профильных научно-технических конференциях, в том числе и международных.

При ознакомлении с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. В рецензируемой работе делались выводы после каждой из пяти глав. Объем каждого из таких выводов составляет до двух страниц и по существу они являются изложением содержания главы. В них не выделено главное, они не разбиты на пункты.
2. Желательно придерживаться общепринятой формы составления выводов, начинать их словами: получено, установлено, доказано и т.д.
3. В выводах первой главы можно было бы дать более развернутое обоснование выбора метода выращивания волокон методом Степанова/EFG, как наиболее перспективного.
4. Не указано, проводилась ли, и какими методами статическая обработка результатов экспериментов, например, отклонений от среднего диаметра волокна.
5. Было бы уместно в конце работы привести ориентировочные технико-экономические расчеты возможного использования технологии выращивания монокристаллических волокон оксидных и эвтектических волокон
6. Результаты, полученные другими исследователями, обычно размещаются в первой, обзорной главе, в остальных главах, как правило, описывают результаты только собственных исследований.

Перечисленные выше замечания не имеют принципиального характера и никоим образом не снижают общей высокой оценки работы.


**Заключение.** Считаю, что диссертационная работа Стрюкова Дмитрия Олеговича «Исследование процесса выращивания из расплава монокристаллических и эвтектических оксидных волокон», представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную для современного материаловедения тему.

Результаты диссертационной работы Д.О. Стрюкова могут быть использованы как для дальнейшего развития методик и получения монокристаллических и эвтектических оксидных волокон из расплава других составов, так и для дальнейшей разработки волокнистых композитов на их основе. Полученные автором результаты достоверны, окончательные выводы являются четкими, аргументированными и обоснованными. Автореферат полностью передает основное содержание диссертации.

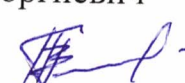
Работа Стрюкова Д.О. полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности «Физика конденсированного состояния» (1.3.8.) и отвечает требованиям п.п. 2, 4, 5, 9, 11 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Стрюков Дмитрий Олегович, вне всякого сомнения, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение» (Машиностроение), начальник лаборатории «Волокна тугоплавких соединений, волокнистые высокотемпературные теплоизоляционные, теплозащитные и керамические композиционные материалы» Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

Бабашов Владимир Георгиевич  
«14» марта 2023 г. 

Согласен на обработку персональных данных.

Бабашов Владимир Георгиевич  
«14» марта 2023 г. 

Подпись Бабашова Владимира Георгиевича заверяю,  
Ученый секретарь «Ученого совета»

к.т.н., доцент

 Свириденко Данила Сергеевич

Контактные данные: Тел.: +7 499 261-86-77 E-mail: admin@viam.ru

Адрес места работы: 105005, Россия, Москва, ул. Радио, д. 17