

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Деменок Анны Олеговны «Разработка и обоснование нового состава стержневой смеси для изготовления отливок охлаждаемых лопаток ГТД», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство

Общая характеристика работы

Представленная диссертационная работа изложена на 163 страницах, включает 71 рисунок, 17 таблиц и 3 приложения, состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка из 85 наименований, а также автореферата объемом 1 печ. лист, изданный на правах рукописи. Автореферат отражает содержание диссертации. Результаты работы достаточно полно представлены в 9 публикациях, включая 3 публикации, входящие в перечень ВАК РФ, получено 2 патента РФ на изобретение, 1 свидетельство о регистрации программы на ЭВМ, а также апробированы на 3 международных и всероссийских конференциях.

1. Актуальность работы

Основными требованиями, предъявляемыми к рабочим лопаткам газотурбинных двигателей, являются высокая жаропрочность и стабильности при их эксплуатации, которые достигаются благодаря использованию для их изготовления жаропрочных никелевых сплавов и полости в лопатках для их охлаждения во время работы ГТД.

Изготовление лопаток производится литьем по выплавляемым моделям (ЛВМ) в вакууме, с внутренней полостью, выполняемой стержнем. От точности геометрических размеров стержня, его механических свойств зависит размерная полость в отливке. Известно, что к стержневой смеси предъявляются повышенные требования по химической инертности к заливаемому металлу, гранулометрическому составу, гравитационной седиментации и др.

Изготовление лопаток ГТД при серийном производстве требует стабильности технологии, исключаящей брак из-за человеческого фактора. В

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»	
за № _____	
Дата регистрации	25.05.2021
Фамилия, инициалы _____	

связи с этим на заводах по изготовлению авиационных двигателей внедряются автоматизированные установки, в том числе и для изготовления стержней, и имеющиеся составы смесей часто не удовлетворяют требованиям к их использованию на этих установках.

В связи с этим диссертационная работа, направленная на разработку и исследования стержневой смеси, отвечающей современным способам изготовления стержней на автоматизированном оборудовании при литье охлаждаемых лопаток ГТД, является актуальной.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

На основе анализа современного состояния вопроса, общих и специальных требований к смесям для изготовления стержней, выполняющим полость в лопатках, выбора основных материалов для изготовления керамических стержней, обусловленных требованиями высокой огнеупорности, а также рассмотрения основных механизмов упрочнения стержневой смеси и методов получения плотной упаковки составов с различными фракциями, позволяющих соблюсти синхронность между химическим и фракционным составами стержневой смеси, в работе обоснованно сформулированы ее цель и совокупность задач на решение ряда обозначенных выше проблем. В их числе выделена, как узловая, проблема разработки стержневой смеси для изготовления стержней для охлаждаемых лопаток ГТД, обладающей необходимой прочностью при высоких температурах и оптимальным коэффициентом термического расширения для обеспечения наименьшего брака по короблению стержней.

Для решения этой основной проблемы выполнен выбор и оптимизация материалов, химического и фракционного состава, разработаны критерии оценки пригодности стержневой смеси для применения ее на автоматизированном оборудовании, создано программное обеспечение для ЭВМ с целью построения теоретической кривой седиментации и оперативного сравнительного анализа, и, наконец, выполнено экспериментальное

исследование физико-химических и механических свойств разработанной стержневой смеси.

Для решения обозначенных выше задач автором применены оригинальные методы расчета оптимального гранулометрического состава стержневой смеси, седиментации дисперсных систем в поле действия гравитации, а также методы определения прочностных характеристик стержней, кажущейся пористости и шероховатости поверхности образцов и фазового состава смеси с использованием современного научного оборудования.

Для разработки стержневой смеси была решена задача оптимального гранулометрического состава смеси, оптимального сочетания прочности и плотности упаковки частиц смеси (по данным автора она составляет 0,6-0,65), определены основные закономерности протекания процесса седиментации дисперсных систем и выведены уравнения для построения теоретической кривой седиментации.

В диссертационной работе сформулированы требования, предъявляемые к керамическим стержневым составам, рассмотрены и проанализированы различные составы стержневых смесей. Показано, что для сложнопрофильных и тонкостенных лопаток ГТД предпочтение следует отдать огнеупорным наполнителям из электрокорунда и плавленного кварца, а для снижения температуры спекания дополнительно необходимо вводить порошки карбида кремния и диоксида титана.

В работе представлены результаты исследования физико-химических и механических свойств разработанной стержневой смеси.

Установлено, что прочность образцов при изгибе зависит от температуры их прокали и состава смеси. Эксперименты показали, что изгибная прочность разработанной стержневой смеси составила 19 МПа при комнатной температуре и 24,7 МПа при температуре 1200 °С при требуемой для обеспечения необходимой размерной точности лопаток не менее 15 МПа.

Коэффициент термического расширения составил $7,8-8,0 \cdot 10^{-6} \text{с}^{-1}$, что оптимально сочетается с КТР формы. Рентгенограмма стержневой смеси показала наличие в ней β -кristобалита, способствующего хорошему удалению

стержня из отливки. На состав стержневой смеси получен патент РФ на изобретение.

В заключение следует отметить, что в диссертационной работе разработан и обоснован новый состав стержневой смеси, отвечающий всем требованиям, предъявляемым к стержневым смесям для изготовления стержней при производстве рабочих лопаток ГТД, что позволяет сделать вывод о ее актуальности как для теоретического анализа исследуемых процессов, так и для решения технологических задач.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Для решения поставленных задач автором использованы современные методики и научное оборудование: дилатометр MISURA ® ODLT, дифференциальный калориметр, дифрактометр Rigaku Ultima IV, профилограф АБРИС-ПМ7 и др. Обоснование гранулометрического состава стержневой смеси сводится к решению задачи, эквивалентной построению уплотняющей упаковки шаров. Оптимизация гранулометрического состава производилась с использованием программы Excel. Установлено, что в оптимизированном составе увеличено процентное содержание каркасообразующих фракций (100–120 мкм) на 21,5 %, уменьшено содержание средних фракций (30–40 мкм) на 14,5 % и незначительно повышено содержание мелких (3–5 мкм) – с 5 до 5,7 %. При этом за счет этих изменений повысилась плотность структуры опытного стержня и составила $(76 \pm 1) \%$, объем пор – $(24 \pm 1) \%$.

Оптимальное соотношение фракционного и химического состава стержневой смеси позволило снизить пустотность каркасообразующих фракций стержня, что положительным образом сказалось на физико-механических свойствах, усадке и короблении.

Предложена стержневая смесь следующего состава: SiO_2 – 11–13 %; SiC – 1–2 %; TiO_2 – 0,5–1 %. остальное Al_2O_3 и легкоплавкий пластификатор на основе парафина с полиэтиленом 10–16 % сверх 100 %. На состав смеси получено 2 патента РФ на изобретение.

Автором выполнена апробация разработанной стержневой смеси при литье лопаток ГТД в производственных условиях ПАО «ОДК-УМПО». Стержни изготавливались с использованием пресс-автомата CLEVELAND STM-25. Запрессовка стержневой смеси в пресс-форму совершалась в автоматическом режиме и выдерживалась в ней 25 с. Изготовленные стержни – «сырцы» в количестве 60 шт. из серийной и опытной стержневой смеси подвергались обжигу в газовой печи ПГ-30. Брак по изготовлению стержней – «сырцов» из серийной смеси составил более 50 %, из опытной – 10 %, брак после обжига – 30 % и 6 % соответственно. Установлено, что на 17 % увеличен выход годных лопаток, снизился брак по разностенности пера лопатки. Разработанная смесь рекомендована к внедрению. Акт испытаний прилагается. Важным результатом выполненной работы является формулировка диссертантом ряда положений, обладающих научной новизной. В частности, определен оптимальный зерновой состав стержневой смеси, обеспечивающий наименьшее коробление стержней, получены математические зависимости КТР и предела прочности при изгибе от процентного содержания компонентов смеси, получены аналитические зависимости седиментационной устойчивости стержневой смеси, позволяющие определить ее пригодность для изготовления стержней на автоматизированном оборудовании с помощью разработанной программы на ЭВМ.

4. Замечания по работе

1. В диссертации приведены данные о введении в состав стержневой смеси TiO_2 . Существует несколько модификаций данного оксида. В работе не указано, какая именно модификация оксида титана применялась при разработке стержневой смеси.

2. В главе 3 приводится расчет плотной упаковки при допущении, что зерна стержневой смеси имеет шарообразную форму. В практических условиях форма зерен огнеупорного материала в основном отличается от шарообразной. В работе не приведены сравнительные характеристики идеальной и реальной моделей плотной упаковки зерен стержневой смеси и коэффициентов адекватности рассматриваемой модели.

3. В работе недостаточно обоснован выбор необходимого коэффициента термического расширения стержневой смеси и не указано за счет чего обеспечивается требуемый показатель КТР $7,8 \dots 8 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

4. В диссертации представлен метод расчета плотности упаковки частиц стержневой смеси, но не показано, за счет чего достигается оптимальное ее значение $0,6 \dots 0,65$.

5. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней»

Указанные замечания, часть которых носит дискуссионный характер, не снижают теоретическую и практическую значимость диссертационной работы Деменок А.О., выполненной на актуальную тему.

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, направленной на решение проблемы разработки состава стержневой смеси для рабочих лопаток ГТД, которая обладает необходимой прочностью при высоких температурах и оптимальным коэффициентом термического расширения для обеспечения наименьшего брака по короблению стержней и разностенности пера лопаток.

Эффективность теоретических и экспериментальных исследований подтверждена высокой достоверностью полученных результатов с применением аттестованных современных физико-химических методов, математического планирования и физического моделирования процессов, компьютерной программы обработки результатов экспериментов.

Результаты работы прошли апробирование в ходе промышленных испытаний на ПАО «ОДК-УМПО».

Диссертационная работа и автореферат находятся в полном соответствии и по содержанию отвечают паспорту специальности 05.16.04 – Литейное производство. Опубликованные работы, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК, и автореферат достаточно полно отражают содержание работы.

В целом представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Деменок Анна Олеговна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.04 – Литейное производство.

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
профессор, профессор кафедры
литейного производства и
упрочняющих технологий

Мысик
Раиса Константиновна

12.05.2021 г.

Подпись
заверяю



ДОКУМЕНТОВЕД УДИОВ
ГАФУРОВА А.А.

Я, Мысик Раиса Константиновна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Деменок Анны Олеговны, и их дальнейшую обработку Мысик