

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу

Барина А. Ю.

«ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИТЬЯ В КЕРАМИЧЕСКИЕ ФОРМЫ  
ЗА СЧЕТ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА  
ВОСКО-ПОЛИМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.6.3 - «Литейное производство»

Представленная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и основных выводов по диссертации, списка литературы и 4 приложений. Содержит 144 страницы, включая 56 рисунков, 22 таблицы, 4 приложения и список литературы из 126 наименований.

Автореферат отражает содержание диссертации, результаты которой достаточно полно освещены в печати в 22 научных статьях, в том числе 8 в изданиях из перечня журналов, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в базе Scopus.

На основании материалов диссертации, автореферата и публикаций автора работы подготовлен следующий отзыв.

### 1. Актуальность избранной темы

Литье по разовым удаляемым, в том числе выплавляемым моделям (ЛВМ) позволяет получать наиболее точные сложнопрофильные ответственные отливки из различных сплавов в машиностроении, ракетно- и авиационном, по размерам и конфигурации максимально приближающиеся к готовой детали.

При этом широкое применение ЛВМ сдерживается такими факторами, как высокая трудоемкость и материалоемкость, а также длительность технологического процесса.

В связи с этим диссертационная работа Барина А. Ю., направленная на повышение эффективности технологического процесса ЛВМ путем интеграции технологий аддитивного производства (АП) и традиционного процесса ЛВМ на подготовительных этапах, является актуальной. Область диссертационного исследования в полной мере соответствует направлениям Стратегии научно-технологического развития РФ до 2035 г. (п. 20, п/п «а») и Стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 г. (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 г. №1913-р).

Актуальность темы диссертации подтверждается выполнением НИР в рамках реализации проекта программы «Реализация мероприятий по развитию инжинирингового центра аэрокосмического кластера Самарской области» (2019 г.) и государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований на период 2020-2022 гг. (проектная часть государственного задания Минобрнауки РФ № 0778-2020-0005).

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

Цель работы и решаемые задачи сформулированы обоснованно, соответствуют современному направлению развития литейного производства в области точного литья по выплавляемым моделям.

Диссертантом проведены исследование, разработка и внедрение комплекса технологических решений, направленных на изготовление воско-полимерных моделей средствами аддитивных технологий на этапе подготовки производства. Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи: сравнительные исследования свободной линейной усадки и стабильности линейных размеров образцов из наполненных и ненаполненных восковых составов, используемых для изготовления выплавляемых моделей; сравнительное исследование зольного остатка и свободной линейной усадки основных полимерных материалов, используемых в аддитивном производстве моделей по FDM-технологии; разработаны технологические принципы проектирования комбинированных воско-полимерных моделей для их изготовления средствами аддитивного производства; исследованы закономерности взаимодействия в системе «разовая модель - огнеупорная керамическая форма»; разработан и успешно опробован в производстве фасонных отливок ответственного назначения технологический процесс получения разовых воско-полимерных моделей средствами аддитивных технологий.

Первый, второй и третий выводы обоснованы и соответствует теме диссертации, цели и задачам работы. Проведены сравнительные исследования усадки, зольности восковых модельных составов и полимерных материалов, используемых в АП моделей по FDM-технологии. Установлены наиболее технологичные материалы: наполненные восковые составы (Romocast 252, Romocast 352) и полимер PLA.

Четвертый, пятый и шестой выводы обоснованы и соответствует теме диссертации, цели и задачам работы. Исследовано влияние плотности заполнения на коэффициент теплового линейного расширения образцов полимерных материалов из PLA и PMMA, Обосновано, что по совокупности значений зольного остатка, технологической свободной линейной усадки и коэффициента теплового линейного расширения для изготовления выжигаемых моделей средствами АП наиболее технологичным является полимер на основе

PLA. Установлено влияние доли полиэтиленового воска на технологические свойства наполненных восковых составов Romocast 252, Romocast 352. Предложены наиболее технологичные воско-полимерные составы (ВПС) с содержанием полиэтиленового воска 25 и 50%.

Седьмой, восьмой и девятый выводы обоснованы и соответствует теме диссертации, цели и задачам работы. Определены температурные режимы для получения филаментов требуемого качества из синтезированных ВПС. Разработаны принципы проектирования воско-полимерных моделей, состоящих из внешней легкоплавкой оболочки ( $T_k \sim 79\div 82^\circ\text{C}$ ) и внутренней тугоплавкой части ( $T_k \sim 90\div 95^\circ\text{C}$ ). Разработаны режимы и технологическая инструкция аддитивного производства моделей из филаментов на основе синтезированных ВПС.

Десятый, одиннадцатый и двенадцатый выводы обоснованы и соответствует теме диссертации, цели и задачам работы. Установлены условия снижения давления на внутренние стенки оболочковой керамической формы (ОКФ) в системе «воско-полимерная модель, полученная средствами АП – огнеупорная керамическая форма», разработаны ступенчатые режимы нагрева ОКФ, совмещенные с удалением моделей и прокалкой ОКФ, обеспечивающие свободное удаление тугоплавких составляющих модели за счет образующегося воздушного зазора с ОКФ.

Тринадцатый вывод обоснован и соответствует теме диссертации, цели и задачам работы. Проведены опытно-промышленные испытания разработанных технологических решений. Доказана эффективность получения отливок из сплавов АК9ч и ВНЛ-3 единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям с использованием воско-полимерных и комбинированных моделей, изготовленных средствами аддитивного производства.

Сформулированные в работе научные положения, выводы и рекомендации соответствуют названию, цели и задачам диссертационного исследования.

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

Достоверность полученных в ходе выполнения исследований результатов подтверждается применением современных методик исследования и аналитического оборудования для определения свойств воско-полимерных составов и изготовления воско-полимерных моделей, лицензионного программного обеспечения моделирования литейных процессов и статистической обработки результатов.

Первый, второй, третий, четвертый, пятый и шестой выводы достоверны, а также вытекающие из них рекомендации достоверны, и обладают научной новизной, так как впервые проведенные автором сравнительные исследования изменения линейных размеров наполненных Romocast 252, Romocast 352 и ненаполненных Romocast 152, МВС-3Т восковых модельных и полимерных

материалов PLA, HIPS, ABS, PMMA, позволили ему установить минимальные значения линейной усадки и выбрать наиболее технологичные для производства моделей средствами аддитивного производства, что было подтверждено впоследствии практическими результатами испытаний полученных моделей для ЛВМ.

Седьмой, восьмой и девятый выводы достоверны, т.к. на их основе выполнена модернизация экструзионной линии, разработаны принципы проектирования и инструкция получения воско-полимерных моделей из внешней легкоплавкой и внутренней тугоплавкой части, исключая разрушающее силовое воздействие на формооболочку.

Десятый, одиннадцатый и двенадцатый выводы и вытекающие из них рекомендации достоверны и обладают научной новизной, т.к. теоретически доказаны и экспериментально подтверждены температурные условия обеспечения целостности огнеупорной керамической формы в системе «восковая модель – огнеупорная керамическая форма» в процессе прокали для синтезированных воско-полимерных моделей.

Тринадцатый вывод достоверен, т.к. проведенные опытно-промышленные испытания разработанных технологических решений доказали эффективность применения воско-полимерных и комбинированных моделей, изготовленных средствами аддитивного производства для получения отливок единичной и мелкой серии литьем по выплавляемым моделям и подтверждены актами использования и внедрения результатов работ.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертации, не противоречат фундаментальным теоретическим положениям и законам материаловедения, теплотехники, физики жидкого и твердого тела.

Основные научные положения, представленные в диссертации, способствуют развитию теории формообразования в литье по выплавляемым моделям, а также практической реализации технологических решений, направленных на повышение качества точных отливок.

#### **4. Замечания по работе**

1. В гл. 1 на с. 20 сказано, что «Для литья лопаток ГТД (литье с направленной кристаллизацией) рекомендуют использовать электрокорундовую суспензию и обсыпку». Это утверждение верно при формировании отливок методом высокоскоростной направленной кристаллизации. При получении литых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) методом направленной кристаллизации в проходных печах типа ПМП-2 при длительном контакте жаропрочного никелевого расплава с литейной формой происходит взаимодействие оксида хрома, образующегося окислением легирующего сплав компонента хрома остаточным кислородом с оксидом алюминия формы и образование на поверхности отливки пригарного слоя в виде хромистого корунда, значительно снижающего качество отливки. Поэтому для

облицовочных слоев в данном случае в качестве наполнителей используют огнеупоры на основе алюмосиликатов.

2. Непонятно, с какой целью в 1 главу включен раздел об явлениях структурной наследственности металлических сплавов, т.к. диссертационное исследование выполнено на другую тему.

3. В гл. 2 на с.50 диссертации сообщается о «прокалке керамических блоков при температуре 600 °С...», однако на графике рис. 2.7 показано, что изотермического режима при температуре 600 °С в процессе прокалки нет, кривая нагрева идет постоянно вверх, а при температуре 600 °С прокалка заканчивается.

4. В диссертационном исследовании проделана большая исследовательская работа по сравнительной оценке свойств модельных материалов в процессе нагрева. Однако, результаты представлены в виде констатации полученных экспериментальных данных. Желательно было бы дать им научное объяснение.

5. При исследовании процессов взаимодействия в системе «модель-форма» рассматривалось воздействие только со стороны модели. Не принимались в расчет такие свойства формооболочки как прочность, пористость, не рассматривалось её напряженно-деформированное состояние, которые могут оказать непосредственное влияние на целостность формы и качество отливки.

6. Из графиков 4.18 и 4.19 не понятна продолжительность прокалки форм, т.к. на оси абсцисс отсутствуют числовые значения.

## **5. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней**

Замечания по работе, некоторые из которых носят дискуссионный характер, не снижают теоретическую и практическую значимость диссертационной работы Барина А.Ю., которая выполнена на актуальную тему.

Диссертация Барина А.Ю. является законченной научно-квалификационной работой, которая содержит решение важной научно-технологической задачи в области литья по выплавляемым моделям, результаты могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях единичного и мелкосерийного производства сложнопрофильных точных отливок литьем по разовым удаляемым моделям.

Диссертационная работа и автореферат находятся в полном соответствии и по содержанию отвечают паспорту специальности 2.6.3 – «Литейное производство» в части формулы специальности, а также в части области исследования: пунктам 1, 5, 16. Результаты работы достаточно полно отражены в научных публикациях и автореферате диссертации.

В целом представленная диссертационная работа отвечает требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, определенным п. 9 «Положения ВАК РФ о порядке присуждения ученых степеней и ученых званий» по специальности 2.6.3 – «Литейное производство».

