

М 87/62

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской революции
ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

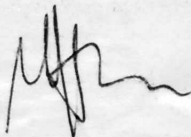
Писарев Игорь Евгеньевич.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОЧНОГО
ЛИТЬЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
ИЗГОТОВЛЕНИИ СВОЛОЧКОВЫХ ФОРМ И КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖ-
НЕЙ.

(Специальность 06.16.04 - " Литейное производство")

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени доктора технических наук

Москва 1993 г.



Работа выполнена в Волгоградском инженерно-строительном институте.

Официальные оппоненты:

1. Д. т. н. проф. Шуляк В.С.
2. д. т. н. проф. Корнюшкин О.А.
3. д. т. н. проф. Ильинский В.А.

Ведущее предприятие – ПО "Волгоградский тракторный завод".

Защита состоится "12" мая 1993 г. на заседании Специализированного Совета Д053.15.05 по машинам и технологии горячей обработки материалов МГТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Б5, ул. 2-я Бауманская, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "12" мая 1993 г.

Ваши отзывы на автореферат
наш печатью, просим направить

Учёный Секретарь

Специализированного Совета

М87162

Подписано к печати 9.03.93

Типография М

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. В условиях перестройки всей жизни нашего общества весьма важная роль отводится научно-техническому прогрессу. Последний предполагает, в числе многих задач, расширение области применения ресурсосберегающих технологий. Настоящая работа посвящена проблемам точного литья, являющегося одним из видов ресурсосберегающей технологии в литейном машиностроении.

Теоретические и экспериментальные исследования советских учёных Н.Н. Рубцова, Г.Ф. Баландина, Ю.А. Степанова, В.А. Васильева, Ф.Д. Оболенцева, В.А. Рыбкина, А.С. Лакеева, Ю.П. Васина, Я.И. Шиленика, В.А. Озерова, В.Н. Иванова и многих других позволили установить механизм формирования отливок, преимущественно, стальных, изготавливаемых методом точного литья по выдвигаемым моделям и с помощью родственных ему процессов. Результатами усилий учёных и практиков явилось создание множества модификаций точного литья, прогрессивных модельных и связующих материалов, методов тепловой обработки и прокаливания форм, а также ряда конструкционных сталей и сплавов. Однако в свете решения новых задач, стоящих в условиях перестройки, вновь и вновь возникает проблема повышения качества отливок и эффективности точного литья.

Качество отливок, изготавливаемых точным литьём (часто говорят: точных отливок), определяется параметрами точности формы (шероховатости) поверхности и размеров отливок, а также показателями комплекса служебных и технологических свойств литого металла. При этом по сравнению с литьём в песчано-глинистые формы в точном литье реализуются повышенные показатели качества точных отливок.

Решение проблемы повышения качества отливок и эффективности точного литья, т.е., фундаментальной проблемы литейщиков за счёт одновременного регулирования всех параметров литейной технологии представляется весьма громоздкой и сложной. Поэтому решение фундаментальной проблемы литья в настоящей работе осуществляется за счёт регулирования некоторых параметров одного (самого важного — по мнению автора настоящей



работы) объекта точного литья — керамики.

Установленный в работе конкретный предмет исследования — керамика на кремнезёмной основе — достаточно подробно исследован многими авторами. Однако эти исследования носят, главным образом, эмпирический характер, не систематизированы, что в условиях повышения требований к отливкам не позволяет достичь желаемого и (или) эффективно использовать достижения смежных наук.

В настоящей работе, применив системный подход к исследованию керамики, формализован ряд свойств последней и установлены численные связи их с параметрами качества отливок и показателями эффективности точного литья. Получены соответствующие аналитические соотношения и подтверждена научно-практическая значимость таких параметров керамики, как шероховатость поверхности и размерная точность.

Анализ процессов формирования последних, а также условий образования трещин в керамике позволил сопоставить названные процессы, установить их сходства и различия, а затем обоснованно мотивировать научную концепцию автора настоящей работы в таком виде:

— образование трещин определяется степенью отклонения напряжённо-деформированного состояния керамики от равноосного.

К числу важных результатов относится выполненное в работе расширение области применения прогрессивного способа безопочного прокаливания и заливки оболочковых форм литья по выплавляемым моделям, впервые в нашей практике предложенного в кандидатской диссертации автора настоящей работы.

Следует отметить реализованный в работе на ряде заводов нашей страны такой эффективный метод упрочнения керамических стержней, как армирование. По сравнению с широко применяемой в настоящее время тепловой обработкой метод армирования обеспечивает более стабильные параметры качества керамики при значительном снижении трудоёмкости изготовления последней.

Исходя из сформулированной выше научной концепции автора, в работе решается актуальная научно-производственная проблема повышения качества отливок и эффективности точного ли-

тъя за счёт оптимизации технологических факторов изготовления керамических объектов.

Указанная проблема решается на основе следующих научных положений:

1. Процесс формирования параметров качества (шероховатости поверхности и размерной точности) керамики является многовариантным и зависит от величины прикладываемых при этом внешних нагрузок. Если на поверхностях керамического объекта внешние нагрузки отсутствуют, то на этих поверхностях реализуется процесс образования трещин. В рамках этого положения в настоящей работе, варьируя величинами внешних дополнительных нагрузок, представляется возможность управления не только существующими методами литья, но и создания множества родственных процессов.

2. Структурно-геометрические параметры оболочковых форм: радиусы и число слоёв, а также очередность их нанесения являются функциями напряжённо-деформированного состояния. Последнее определяется переменными сочетаниями гравитационных, динамических и деформационных нагрузок. В рамках этого положения установлено, что число слоёв многослойной оболочковой формы определяется при выплавлении модели по допускаемым напряжениям и проверяется на операциях их прокаливания и заливки по расчётным предельным состояниям.

3. Для разнотипных материалов керамических объектов возможно применять единые алгоритмы для определения переменных параметров упругости и других свойств керамики. Эти же алгоритмы используются и при расчёте напряжённо-деформированного состояния многослойной оболочковой формы. В рамках этого положения разработаны соответствующие блок-схемы и программы расчёта параметров качества отливок и показателей эффективности точного литья на электронно-вычислительных машинах.

Цель работы: решение в научном и техническом аспектах проблемы управления процессом формирования свойств при изготовлении керамики, направленным на существенное улучшение качества отливок и эффективности точного литья.

Для реализации указанной проблемы в работе были решены ни-

исследующие научные задачи:

- применён метод системного подхода к изучению процессов точного литья и установлено место керамики - как объекта исследования настоящей работы - в системной иерархии;
- формализован ряд новых параметров и свойств керамических объектов, оказывающих решающее влияние на процесс формирования качества отливок;
- произведён расчёт напряжённо-деформированного состояния многослойной оболочковой формы и на его основе определено оптимальное количество слоёв покрытий;
- разработаны принципы управления процессом формирования свойств керамики, обеспечивающие получение отливок высокого качества;
- разработано множество частных технологических процессов изготовления оболочковых форм и керамических стержней, отвечающих повышенным требованиям. Часть из этих процессов внедрена в производство на ряде предприятий нашей страны со значительным экономическим эффектом.

Материалы и методы исследований. Исследованию подвергались оболочковые формы, слои которых изготавливались на связующих этилсиликатах 32 и 40, а также на жидком стекле с высокодиспергированными в них частицами материалов, преимущественно, на основе кремнезёма. Исследовались также керамические формы и стержни на этилсиликатном связующем и той же огнеупорной основе.

В работе использованы различные методы структурного и химического анализа: рентгеноскопия и высокотемпературная микроскопия, термогравиметрия, дифференциальные измерения температур и смещений. Широко применены физико-механические методы определения и исследования ансамбля свойств керамических объектов.

Разработан ряд новых методик определения свойств и параметров керамики (нелинейных коэффициентов Пуассона и модулей упругости Юнга керамики в холодном и горячем состояниях и др.), а также модифицированы некоторые известные методики (прочности и линейного модуля упругости керамики при изгибе и др.).

Научная новизна работы. Разработаны научные основы процессов формирования шероховатости поверхности и размерной точности керамических объектов, не реагирующих с жидким металлом в химическом отношении. Показано, что процессы формирования названных параметров керамики зависят от состояния нагружения конкретных поверхностей керамических объектов внешними силами. В частности, если облицовочная и (или) наружная поверхности керамики свободны от внешних нагрузок, то на указанных поверхностях образуются трещины. Аналогичный эффект наблюдается и при некотором множестве сочетаний дополнительных внешних нагрузок, для которого в работе устанавливается конкретное численное выражение. Выводя сочетания упомянутых нагрузок из установленного в работе численного множества, добиваются полного подавления процесса образования трещин.

Кроме этого в работе устанавливается зависимость процессов формирования параметров качества керамики от свойств исходных компонентов и факторов их подготовки. При этом построена система соотношений между параметрами качества керамики, свойствами материалов и факторами технологии.

Выявлено долевое участие керамики в процессе формирования качества отливок и установлено соответствие между параметрами качества керамики и отливки.

Показана реальная возможность управления процессом формирования шероховатости поверхности и размерной точности отливки, варьируя нагружением керамики при её изготовлении, а также свойствами и факторами подготовки исходных компонентов.

Решена задача расчёта напряжённо-деформированного состояния многослойной оболочковой формы, составленной из пакета тонких разнотвёрдых материалов с физической нелинейностью. Решение данной задачи построено в два этапа, на первом из которых выведены приближённые аналитические выражения для определения напряжений и деформаций в керамике от воздействия исчерпывающего множества внешних нагрузок. На втором этапе, используя диаграммы изгиба материалов и критерий Мизеса, определены переменные параметры упругости, которые затем подставлялись в выражения, полученные на первом этапе решения.

Для численного решения систем уравнений, фигурирующих в данной задаче, составлены алгоритмы, блок-схемы и программы для вычислительных машин, и показано, что для нелинейных жёстко-упругих и упругопластических материалов возможно применять единые алгоритмы и аналогичные программы.

Полученное решение имеет распечатку в виде матрицы множества величин, отображающих не только численные значения напряжений и деформаций, но также и несущую способность каждого слоя, поскольку матрица содержит множество коэффициентов запаса прочности.

Управляя назначением материалов с различными свойствами для слоёв оболочковой формы, решена задача минимизации количества последних.

Практическая значимость работы. Используя метод системного подхода, в работе построены выражения для определения производительности, материало-, энерго- и трудоёмкости технологического процесса изготовления керамики. Рассматривая эти выражения совместно с соотношениями, полученными выше, а также с разработанным условием глобального оптимума, в работе решается проблема управления процессом формирования качеством отливок и эффективностью литья.

Решение научно-производственной проблемы позволило получить значительный народнохозяйственный эффект от применения разработанной керамики на производстве:

- на четырёх промышленных предприятиях расширена область применения прогрессивной технологии безоппочной заливки оболочковых форм по выплавляемым моделям с экзотермическими покрытиями;

- на трёх заводах нефтехимического машиностроения внедрена технология изготовления отливок с применением керамических форм и стержней, упрочнённых методом армирования;

- суммарная экономическая эффективность работы - более 1 млн. руб. в год.

Апробация работы. Основные материалы работы доложены и обсуждены на научных семинарах и заседаниях кафедр СДМ, МАСП (ВолГИСИ), МТ-5 (МВТУ им. Н.Э.Баумана), семинарах НТО МАШ-

ПРОМ и МДТИ им. Ф.Э. Дзержинского (г. Москва), на ряде областных конференций литейщиков гг. Волгограда, Киева и Пензы, а также на заседаниях научно-технических советов ряда предприятий и организаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 научных статей. Научная новизна работы защищена 10 авторскими свидетельствами, а также подано 9 заявок на изобретения.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, основных выводов, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 321 стр. машинописного текста, иллюстрирована 56 рисунками, 37 таблицами и включает список литературы из 327 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматривается современное состояние вопроса исследования процессов точного литья и на базе его анализа обсуждается проблема работы.

В работе постулируется, что решение важной народнохозяйственной проблемы ускорения научно-технического прогресса применительно к точному литью имеет специфические особенности. Под точным литьём подразумевается литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) и родственные ему процессы: литьё в керамические формы (ЛКФ) и стержни (ЛКС), а также их многочисленные модификации.

Особенностями перечисленных методов литья, называемых специальными, является многофакторность и многовариантность технологических процессов. Однако точное литьё характеризуется одним, объединяющим специальные способы, признаком: применением одного и того же типа связующего — этилсиликата — для изготовления керамических объектов.

В качестве последних в ЛВМ используются оболочковые формы (ОФ), а в ЛКФ и ЛКС — керамические формы (КФ) и стержни (КС), соответственно.

В работе признано целесообразным оценить исследуемые параметры качества точных отливок, а также наличие взаимосвязи их с аналогичными параметрами керамики.

В качестве первого из параметров качества точных отливок

исследуется (по литературным данным) $V\alpha$ - параметр размерной точности отливок.

Представляется, что в литературе к настоящему времени уже накоплен значительный объём сведений по размерной точности отливок. Указывается на возможность регулирования размерной точности отливок за счёт ряда технологических усовершенствований.

Качеству (шероховатости) поверхности точных отливок посвящено несколько меньшее количество работ, однако при этом используется численная оценка результатов по параметрам Ra , $Rmax$, Rz и т.п. согласно ГОСТ 2789-73. Также указывается на возможность регулирования шероховатости поверхности точных отливок за счёт ряда технологических усовершенствований. Рассмотрены процессы формирования ряда других параметров качества точных отливок: макро-, микроструктуры, физико-механических свойств металла, брака отливок и др., а также фактора безопасного прокаливания и заливки ОФ в ДВМ.

Отмечается, что в условиях последней технологии реализуются улучшенные параметры качества точных отливок.

Далее рассмотрены технологические факторы изготовления керамики в точном литье. Подтверждается, что в качестве наиболее распространённого связующего применяются этисиликаты марок 32; 40 и 50; однако применяются и другие типы связующих.

В связующих растворах используется множество составляющих: реагента - воды, растворителей, диспергентов, а также огнеупоров и обсыпочных материалов.

Представляется, что эффекты применения различных компонентов в суспензиях и керамических смесях могут быть весьма значительными, в особенности, в условиях безопасного прокаливания и заливки керамики.

Рассмотрены также другие технологические факторы: порядок ввода компонентов в суспензии и гранулометрический состав огнеупоров, степень наполнения суспензии, ряд внешних воздействий на процедуры перемешивания компонентов, съёма керамики оснастки, факторы её сушки, хранения и транспортировки.

Значительное количество работ посвящено факторам выплавле-

ния моделей и прокаливания керамики.

Особое внимание уделяется факторам безопасного прокаливания и заливки ОФ ЛВМ. При этом отмечается недостаточная степень изученности данной технологии.

Установлено отсутствие формализованной системы знаний процессов точного литья, что не позволяет эффективно использовать достижения смежных наук для дальнейшего повышения качества отливок.

Дальнейший анализ посвящается проблеме исследования свойств керамики: прочности, модуля упругости Юнга и коэффициента Пуассона, а также усадочных и температурных деформаций и множества других свойств.

Рассмотрены методики определения и исследования перечисленных свойств в квазистационарных условиях и отмечены сведения о применяемом при этом лабораторном оборудовании и оснастке. Указывается на отсутствие методики определения такого фундаментального свойства керамики, как коэффициент Пуассона, а также учёта динамики нагружения керамики.

В целом, рассматривая систему: свойства керамики – технологические факторы изготовления керамических объектов – параметры качества точных отливок, устанавливается, что взаимосвязи составляющих этой системы носят лишь качественный характер, хотя и являются предметом непрерывного изучения и исследования.

В заключении первой главы рассматривается проблема повышения эффективности точного литья. Особое внимание при этом обращается на отмеченные в литературе сведения о значительном повышении эффективности ЛВМ при переходе на безопасный способ прокаливания и заливки ОФ.

Установлена целесообразность проектирования для последнего прогрессивного способа новых технических систем, а также системного подхода к исследованию процессов точного литья.

Во второй главе реализуется системный подход к исследованию проблемы и устанавливается конкретный предмет исследований в настоящей работе – керамика.

При этом точное литьё представлено как "сложная" система

(сверх-, мета-, надсистема), состоящая из трёх "простых" систем (сосистем): модели 1; керамики 2 и металла 3.

Из этих последних в работе обосновывается выбор конкретного предмета исследования - керамики 2; исходя из "центрального" положения последней в системной иерархии, взаимодействующей как с моделью 1; так и с металлом 3 в разные периоды своего формирования и эксплуатации. Кроме этого исходили из незначительного объёма численной информации о керамике.

Дальнейшая декомпозиция системы произведена только для керамики, состоящей, в свою очередь, из трёх подсистем:

2.1 - нормирование параметров качества объектов формования в точном литье: в этой подсистеме исследовались усадочные процессы "холодного" формирования керамики, рассматриваемой здесь как зернистый композит огнеупорных и связующих материалов;

2.2 - нормирование напряжений и деформаций в керамических объектах: в этой подсистеме исследовались процессы "горячего" формирования керамики, рассматриваемой здесь в виде монолита, имеющего эффективные свойства как результат исходных огнеупорных и затвердевших связующих материалов;

2.3 - нормирование показателей эффективности процесса изготовления керамики: эта подсистема была экономической.

Из сказанного следует, что в данной работе исследуются все (или почти все) операции технологического процесса изготовления, формирования и эксплуатации керамики, начиная с подготовки исходных компонентов вплоть до разрушения последней.

Объектом наинизшего уровня системной иерархии, т.е., элементом, или начальным звеном рассматриваемой системы является композит керамической суспензии с зерном (частицей) огнеупора, находящийся в начальной стадии пластического деформирования в процессе затвердевания керамики.

В третьей главе исследуется подсистема 2.1; где нормируются численные величины параметров качества - шероховатости поверхности и размерной точности - керамики.

При этом шероховатость поверхности представляется как результат процесса формирования микронеровностей на облицовочной поверхности форм и стержней, являющихся композитами огнеупорных и связующих материалов. Исходя из "композитной" природы всех рассматриваемых керамических объектов: ОФ, КФ и КС, последние приводятся к единой модели.

В работе приведена геометрическая схема структуры керамики, примыкающей к её облицовочной поверхности, где связующее занимает пространство в виде непрерывного связного множества. В последнем дискретно и регулярно расположены огнеупорные включения.

В качестве упомянутой единой модели керамики выбрана тонкая плоская квадратная шайба связующего с круговой частицей (зерном) огнеупора, прилегающая к облицовочной поверхности.

Параметр геометрии модели ($I \geq c/h \geq 0$; где c - радиус зерна (частицы) огнеупора, а $2h$ - регулярное расстояние между центрами двух соседних зёрен (частиц) огнеупора) является фактором распределения огнеупора в связующем и отображает упруго-геометрическую область исследования (в скобках) керамики в настоящей работе.

При затвердевании связующего и формировании керамики геометрическая форма квадратной шайбы и облицовочной поверхности искажается, что обусловлено различными усадочными смещениями точек квадрата и облицовочной поверхности.

В качестве характерных точек облицовочной поверхности керамики, в которых реализуются усадочные смещения, выбраны две точки, принадлежащие оси симметрии зерна и межзёрненного пространства.

При этом устанавливается, что параметр шероховатости поверхности пропорционален полуразности смещений характерных точек и является дифференциальным параметром качества керамики. Параметр размерной точности пропорционален полусумме тех же смещений и является интегральным параметром качества керамики.

Таким образом, задача определения численных величин параметров качества керамики приводится к задаче определения

смещений характерных точек керамики.

Следует заметить, что в общем виде (при трёхосном негавном напряжённо-деформированном состоянии) решения последней задачи не существует. Такое решение возможно только в частных случаях: при трёхосном равном, двухосном (плоском), одноосном (простом) нагружениях и (или) при свободной усадке.

Рассмотрев напряжённо-деформированное состояние ОФ, КФ и КС, были установлены точки (принадлежащие, главным образом, осям и плоскостям симметрии керамики), в которых реализуются упомянутые выше частные случаи нагружения. В этих случаях задача определения смещений становится вполне разрешимой.

Для решения данной задачи составлены две силовые схемы нагружения исследуемой модели. Первая из схем иллюстрирует нагружение связующего от внутренних сил, т.е., от собственной его усадки, затруднённой со стороны жёсткого зерна огнеупора. При этом на круговом контуре зерна огнеупора радиусом r_c действует неизвестное контактное давление p_c .

Согласно второй схеме исследуемая модель керамики находится в состоянии двухосного растяжения внешними силами p и q , действующими вдоль (q) и перпендикулярно (p) облицовочной поверхности.

На последней поверхности было составлено граничное условие, заключающееся в том, что сумма компонентов напряжений, действующих перпендикулярно облицовочной поверхности, равна 0 или p . При этом ось x направлена вдоль облицовочной поверхности.

Воспользовавшись решением аналогичных задач, выполненным в фундаментальной монографии Н.И.Мусхелишвили, было получено восемь выражений, иллюстрировавших по четыре оценки параметров шероховатости поверхности и размерной точности керамики.

Из полученных выражений следовало, что шероховатость поверхности и размерная точность керамики зависят от множества технологических факторов её изготовления, а также от физических и геометрических свойств керамики.

Дальнейшие интерпретации полученных выражений для парамет-

тров качества керамики представлены в шестой главе.

Далее рассматриваются методики расчётного и (или) экспериментального определения параметров и факторов, фигурирующих в подсистеме 2.1. Из экспериментальных методик отмечены методики: определения радиуса частицы огнеупора с усадочной деформации керамики ξ , параметров шероховатости поверхности R_a и размерной точности V_a керамики и отливок, а также предложенная в настоящей работе новая методика для определения величины коэффициента Пуассона μ керамики в холодном состоянии.

Здесь же фигурирует расчётная методика определения усадки связующего ξ_0 , исчисляемой на базе кривых, связывающих усадку суспензии с количеством введённого в неё огнеупора и построенных по экспериментальным данным.

В заключение третьей главы составлено условие локального оптимума подсистемы 2.1; заключающееся в минимизации параметров R_a и V_a .

В четвёртой главе исследуется подсистема 2.2; где нормируются величины напряжений и деформации ОФ и КС, возникающих в процессе "горячего" формирования керамики. Рассматривается задача определения напряжённо-деформированного состояния цилиндрической ОФ, составленной из множества разнотвёрдых слоёв покрытий и подверженной воздействию исчерпывающего множества внешних "нагрузок": внешнего и внутреннего давления, осевой силы, перепада температур, а также гравитационных и динамических сил.

Решение данной задачи построено в два этапа. На первом этапе решения рассматривается линейная задача, результатом которой является определение напряжений и деформаций в предположении, что материал керамики подчиняется закону Гука.

На втором этапе решения эквивалентные значения найденных на первом этапе решения напряжений и деформаций последовательно приближались к некоторым нелинейным эквивалентным кривым. В качестве последних использовались диаграммы деформирования образцов керамики при изгибе. В результате последовательных приближений (итераций) находились точки пересечения упомянутых эквивалентных кривых. В найденных точках устанавливались значения переменных параметров упругости: E и μ .

Наконец, подставляя последние значения в выражения для напряжений и деформаций, найденные на первом этапе, завершали решение данной задачи.

Полученные решения удовлетворяли условиям осевого и радиального равновесия, статики, совместности смещений с учётом физической нелинейности керамических материалов.

Исходя из того, что применённый на втором этапе решения данной задачи математический аппарат оказался весьма громоздким, то вычисления производились на электронно-вычислительных машинах (ЭВМ).

Для этой цели была составлена блок-схема и программа расчёта на ЭВМ переменных параметров упругости E и μ , зашифрованная индексом "РВМУ".

При составлении программной документации был применён единый алгоритм для определения переменных параметров упругости и напряжённо-деформированного состояния как жёстко-упругих, так и упруго-пластических керамических материалов слоёв ОФ. Это привело к упрощению (сокращению) блока алгоритмов и программ, а также явилось доказательством корректности третьего научного положения работы, выдвинутого на защиту.

Система расчёта напряжений и деформаций в керамике, разработанная в настоящей работе, может быть применена во многих технологических расчётах.

В настоящей работе данный расчёт использовался для определения количества слоёв ОФ, исчисляемого по формуле:

$$s = (\alpha_s - \alpha) / h$$

где: α — радиус облицовочной поверхности ОФ;

α_s — радиус наружной поверхности ОФ;

h — толщина слоя ОФ.

Величина: $\alpha_s - \alpha$ представляет собой толщину стенки ОФ, определяемую на базе двухстадийного расчёта: проектировочного и проверочного. Оба расчёта составлены на основании результатов решения предыдущей задачи определения напряжённо-деформированного состояния многослойной цилиндрической ОФ.

В работе обосновывается, что проектировочный расчёт выполняется на операции выплавления моделей из ОФ, а провероч-

чный расчёт напряжений и деформаций – на операциях прокаливания и заливки. Последовательно приближая оба расчёта друг другу, оптимизируют искомые величины толщины ОФ, напряжений и деформаций.

Толщина слоя суспензии h устанавливается расчётно-экспериментальным путём. При этом экспериментально определялась линейная зависимость h от плотности и вязкости суспензии, т. е., таких свойств, в которых комплексно отображено множество технологических факторов, обуславливающих величину h .

Линеаризация последней зависимости осуществлялась на ЭВМ, для чего разработана блок-схема и программа расчёта, зашифрованная индексом "Н".

Упомянутые выше расчёты: проектировочный и проверочный, а также процедуры определения h и ε вместе с сортировкой, отображающей порядок выбора покрытий для различных слоёв ОФ, выполняются на ЭВМ. Для этого разработана комплексная программа "SS", в которую введены обе предыдущие программы РЕМУ и Н в качестве подпрограмм.

Таким образом методика определения количества слоёв многослойной ОФ базируется на расчёте её напряжённо-деформированного состояния, что доказывает корректность второго научного положения работы, выдвинутого на защиту.

По аналогии с подсистемой 2.1 рассмотрены вопросы численного и экспериментального определения параметров и факторов, фигурирующих в подсистеме 2.2. При этом из экспериментальных методик отмечается новая методика определения коэффициента Пуассона керамики в горячем состоянии, а также методика учёта пористости керамических материалов при определении ряда свойств керамики.

В заключение этой главы изложена расчётная методика определения смещений каждого из слоёв многослойной ОФ при внезапном тепловом ударе. Методика построена на базе аппроксимации экспериментально полученных осцилло- и дилатограмм в виде некоторых полупериодических функций. Дважды дифференцируя последние, переходили от смещений к их ускорениям при внезапном тепловом ударе. По найденным значениям судили о

величине и вероятности образования термических (динамических) напряжений и трещин.

В пятой главе рассматривается экономическая подсистема 2.3 и нормируются технико-экономические показатели процесса изготовления керамики на примере ОФ.

Используя элементы системотехники, в работе составлен ориентированный мультиграф (оргграф) возможных маршрутных схем технологического процесса ЛВМ. При этом рёбра и вершины оргграфа отображают переходы и операции изготовления и эксплуатации ОФ, а петли – процедуры их модифицирования.

В качестве целевых функций, фигурирующих в подсистеме 2.3; выбраны следующие показатели эффективности: производительность, материало-, энерго- и трудоёмкость процесса изготовления ОФ.

Для численного определения перечисленных показателей построены соотношения, устанавливающие искомые величины последних в зависимости от ряда экономических и технологических факторов. Обсуждаемые соотношения аналогичны таковым, фигурирующим в смежных науках, а в настоящей работе они привязаны к процедурам оптимизации.

Для тех же процедур разработан комплексный экономический критерий – себестоимость операций модифицирования или сумма сопоставимых затрат при изготовлении ОФ – C_2 , в который входят перечисленные выше показатели эффективности базового и модифицированного процессов изготовления ОФ.

Минимизация критерия C_2 составляет условие локального оптимума подсистемы 2.3; а объединение локальных оптимумов подсистем 2.1 и 2.3 составляет условие глобального оптимума всей системы керамики (ОФ) в целом.

При этом применён двухстадийный метод оптимизации, в котором проекторочный расчёт проводят по минимизации параметров качества керамики (условие локального оптимума подсистемы 2.1), а проверочный расчёт – по условию минимизации C_2 (условие локального оптимума подсистемы 2.3).

Последовательно приближая оба расчёта друг к другу, устанавливают оптимальные значения параметров качества ОФ и по-

казателей эффективности ЛВМ.

Представлен пример проектирования технологии изготовления ОФ для отливки "кольцо для наплавки клапанов".

В процессе расчёта использованы все соотношения подсистем 2.1...2.3; которые оптимизируются с помощью полученного последнего условия. Данный расчёт был выполнен на стадии предварительных работ по хозяйству 969-80 для Мелитопольского завода "Автоцветлит". Дальнейший окончательный расчёт экономической эффективности работ по упомянутой теме с незначительными расхождениями совпал с вышеизложенным расчётом, что явилось доказательством эффективности и корректности применённого в настоящей работе метода системного подхода.

В этой же главе рассматриваются некоторые вопросы формирования физико-механических свойств и структуры металла отливок за счёт реализации, главным образом, технологии безопочного прокаливания и заливки ОФ ЛВМ.

Осциллографируя различные точки плоской отливки, определяли температуры керамики в этих точках, подсчитывали скорости охлаждения отливок после безопочной заливки и сравнивали их с заливкой ОФ в опорном наполнителе. Качество металла оценивали на упомянутой отливке "кольцо для наплавки клапанов" из сплава ЭП616 по твёрдости, макро-, и микроструктуре (излому) в трёх точках: вблизи от питателя, на удалении от него и в срединной части.

Было установлено, что при безопочной заливке реализуются наиболее стабильные показатели твёрдости металла, а микроструктура характеризуется отсутствием новообразований в виде сложных карбидов и боридов.

Полученные результаты были объяснены тем, что при высоких скоростях охлаждения сплава после безопочной заливки происходит задержка выделения из матрицы упомянутых новообразований, и они остаются в растворённом состоянии. Поэтому в структуре сплава отсутствуют бориды и карбиды, и это стабилизирует твёрдость металла.

На базе полученных результатов разрабатывались другие способы модифицирования металла при ЛВФ с применением микроохла-

льников, ускоряющих процесс охлаждения отливок. При этом была повышена несущая способность отливок и снижена величина параметра их шероховатости.

Эти результаты были получены в большой степени, благодаря оригинальному устройству для ввода железного порошка в жидкий расплав, заливаемый в КФ. Это устройство было признано изобретением, и на него было получено а.с. СССР №469529 В22С 7/12 II/10.

Был признан изобретением и предложенный способ модифицирования металла (а.с. СССР №1218241 В22С 9/04 27/09), представляющий собой комбинацию методов литья вакуумным всасыванием, литья под давлением и ЛВМ. При этом на зеркало металла, заполнившего ФФ путём вакуумного всасывания, внезапно нагнеталось давление, и последний с силой выталкивался из стояка вниз. Таким образом на металл, заполнивший множество (куст) форм отливок, осуществлялся кратковременный металлодинамический удар. Это способствовало повышению качества (плотности) металла и улучшило заполняемость литейных форм.

Реализация этого способа обеспечила увеличение выхода годных отливок, снижение расхода электроэнергии, модельных и связующих материалов в среднем на 25% и трудоёмкости отделения отливок от кустов на 60%.

Представлены также сведения о разработанных новых способах внепечного модифицирования и легирования ряда сплавов.

В шестой главе изложены технологические аспекты научно-производственной проблемы работы и результаты внедрения в производство.

Анализируя и обсуждая выражения для параметров качества керамики, полученные в третьей главе, здесь сравниваются теоретические и экспериментальные оценки и возникающие при этом погрешности. Для минимизации последних осуществлён переход от значений p и q на бесконечности к значениям P и Q в окрестности зерна огнеупора, а усадка связующего ξ_0 была заменена усадкой суспензии ξ (тем самым, осуществлён переход от модели керамики с одним зерном к реальной керамике с множеством зёрен огнеупора).

В результате было получено восемь (два выражения для четвёртой оценки параметров качества керамики предназначены для случая: $P \ll Q$, что имеет гораздо меньшее распространение, чем $P \approx Q$ и поэтому ниже опущены) достаточно корректных выражений для параметров качества керамики в нижеследующем окончательном виде:

$$Ra_1 = 2(1+\mu) \left(\frac{-2\mu + \left(\frac{3-2c^2/h^2}{3-4\mu} - 1\right) \frac{c^2}{h^2}}{1-2\mu - \frac{4-3c^2/h^2}{3-4\mu}} - \frac{-2\mu + \left(\frac{1+c^2/h^2}{3-4\mu} - 1\right) \frac{c^2}{2h^2}}{-1+2\mu - \frac{2-1,5c^2/h^2}{3-4\mu}} \right) \frac{p_c h}{E}$$

$$Va_1 = 2(1+\mu)h(\varepsilon + \frac{p_c}{2E} \left(\frac{-2\mu + \frac{c^2(3-2c^2/h^2)}{3-4\mu} - 1}{1-2\mu - \frac{4-3c^2/h^2}{3-4\mu}} + \right.$$

$$\left. + \frac{2\mu + \frac{c^2(1+c^2/h^2)}{2h^2(3-4\mu)} + 1}{-1+2\mu - \frac{2-1,5c^2/h^2}{3-4\mu}} \right) p_c / E$$

$$Ra_2 = -(1+\mu)(P-Q) \left(1 - \frac{7-5c^2/h^2}{3-4\mu} \right) \frac{c^2}{2Eh}$$

$$Va_2 = 2(1+\mu)h(\varepsilon + (1-2\mu) \frac{P+Q}{2E} + \frac{P-Q}{2E} \left(1 + \frac{c^2(5-3c^2/h^2)}{4h^2(3-4\mu)} - 3 \right))$$

$$Ra_3 = -Va_3 = \frac{(1+\mu) \left(1 - \frac{7-5c^2/h^2}{3-4\mu} \right) \varepsilon c^2 / h}{1 + (1-2\mu) \frac{P+Q}{P-Q} - \frac{c^2(3-2c^2/h^2)}{h^2(3-4\mu)} - 1}$$

где: Ra_1 , Ra_2 и Ra_3 - первая, вторая и третья оценки параметра шероховатости поверхности керамики;

Va_1 , Va_2 и Va_3 - те же оценки параметра размерной точности керамики.

Первая оценка параметров качества керамики применяется для свободных поверхностей. Примерами могут служить открытые поверхности КФ и КС, все поверхности (кроме нижних (знаковых)) керамики после съёма с оснастки, а также боковые поверхности КС, затвердевающих в стержневом ящике (в условиях усадочного

зазора).

Вторая оценка используется при определении параметров качества нагруженных поверхностей керамики. Примерами могут служить опорные (нижние, знаковые) поверхности КС в оснастке или после съёма с неё, а также армированные или (и) подогреваемые поверхности КС или (и) КФ после съёма с оснастки.

Наконец, третья оценка используется при определении параметров качества ОФ и (или) КФ, затвердевающей на постоянной или выплавляемой модели.

На практике установлено, что на свободных поверхностях КС до или после съёма последних из стержневого ящика образуются трещины, а на нагруженных (опорных) поверхностях трещины отсутствуют. Сказанное относится к ситуации, реализуемой сначала при первой, а в дальнейшем – при второй оценках параметров качества керамики. Заметим, что при выводе соотношения первой оценки было положено: $p=0$ и $q \neq 0$ (условия, характеризующие свободную поверхность).

Анализ показал, что в правой части выражения для Ra_1 реализуются переменные (обусловленные изменяющимися при затвердевании величинами c/h и коэффициента Пуассона: $0,5 \geq \mu \geq 0$) ситуации, когда один из знаменателей становится $=0$; тогда $Ra_1 = \infty$. Сопоставляя последнее с упомянутым выше эффектом образования трещин, в настоящей работе делается важнейший вывод о закономерности образования трещин на свободных поверхностях керамики. На нагруженных поверхностях керамики (случай второй оценки) трещины не образуются, и $Ra_2 \neq \infty$.

В ситуациях третьей оценки параметров качества керамики (к которой относятся ОФ и (или) КФ, затвердевающие на модели) на облицовочных поверхностях трещин не образуется, так как они нагружены путём контакта с моделью. На наружных поверхностях керамики могут образовываться трещины, если такие поверхности являются свободными, тогда: $Ra_3 = \infty$. Сказанное подтверждает наблюдаемое на практике трещинообразование на КФ в зазоре между ней и опокой, а также на необсыпанных поверхностях ОФ ЛВМ. Сказанное относится не только к параметру Ra , но и к параметру Va , т.к. они взаимозависимы.

На основании изложенного в работе сделан второй важнейший вывод о том, что нагружение свободных поверхностей керамики является весьма эффективным средством подавления процесса образования трещин.

Оба важнейших вывода доказывают корректность первого научного положения настоящей работы, выдвинутого на защиту.

Дальнейший анализ выражения для третьей оценки параметров качества керамики позволил установить численные соотношения, иллюстрирующие необходимые и достаточные условия протекания двух взаимоисключающих процессов: образования и предотвращения (подавления) образования трещин в следующем виде:

$$-2 \left\{ \begin{array}{l} \leq \\ > \end{array} \right\} \frac{P+Q}{P-Q} \left\{ \begin{array}{l} \leq \\ > \end{array} \right\} - \frac{1}{3} \left. \begin{array}{l} \text{образование} \\ \text{подавление} \end{array} \right\} \text{ трещин}$$

В рамках полученных численных соотношений ОФ ЛВМ представляются как важный частный случай формирования керамики, когда достигается: $P=Q$. Подставляя последнее в выражение для третьей оценки, устанавливаем: $Ra_3 = Va_3 = 0$. Отметим при этом, что степень наполнения суспензии (СНС) ЛВМ меньше, чем у остальных керамических объектов, так что: $\sigma^2/h^2 < 0, \mu < 1+\mu$.

Изложенное выше позволяет управлять процессами трещинообразования в керамике на базе численного расчёта.

Первая из технологических задач управления решается в КФ путем достижения соотношения: $P=Q$. При этом устанавливается необходимость ликвидации усадочного зазора между КФ и опоклой. Для этого в работе рекомендована установка рёбер жёсткости по контуру наружной поверхности КФ, являющихся элементами опокли. Будучи помещёнными в массу КФ, рёбра препятствуют усадке последней и реализуют сцепление наружной поверхности КФ с опоклой, ликвидируя при этом усадочный зазор.

Рассматриваемое усовершенствование позволяет изменить рецептуру КФ в направлении снижения СНС (по аналогии с ОФ ЛВМ) для повышения жидкотекучести суспензии. Более жидкая суспензия может быть использована при изготовлении двухслойных КФ, применяя при этом экономичные тонкостенные керамические облицовки.

В КС $R=0$; а $\phi \neq 0$; поэтому: $R \neq 0$. Исходя из того, что варьированием силовыми нагрузками не удаётся подавить процесс образования трещин, последнее осуществляют, используя соотношение: $\sigma^2/\eta^2 = 0,8(1+\mu)$; т.е., за счёт регулирования СНС. При этом добираются: $\text{СНС}=1,2$; тщательно перемешивая материалы мелко- и крупнозернистой огнеупорной основы друг с другом. Сказанное математически отображается тем, что подстановка последнего соотношения в выражение для Rd_3 обращает его в 0. Данное обстоятельство широко используется на практике.

Ещё одна технологическая задача была решена на операции обсыпки ОФ. Предотвращая случаи уноса части керамической суспензии с обсыпавшихся модельных блоков, последние вводили в псевдооживлённый обсыпочный материал. После этого псевдооживление прекращали, возобновляя его после затвердевания каждого слоя. Таким образом затвердевание покрытия осуществлялось в уплотнённом объёме обсыпочного материала, т.е., когда $R \neq 0$. Модельные блоки при этом не обсыпались, и трещины не образовывались. При этом были отмечены побочные полезные эффекты: повышение толщины слоя, прочности ОФ и др. Предложенный способ был признан изобретением (а.с. СССР №944746 В22С 9/12), и внедрён на предприятии Г-4184 с экономическим эффектом около 10000 руб.

Анализ выражений для численных оценок параметров качества КФ обусловил уменьшение (измельчение) размера огнеупора для снижения величины Rd и Vd . Это обстоятельство использовано для получения и последующего применения в составе суспензий огнеупора улучшенного зернового состава, главным образом, по однородности. Последнее достигнуто на разработанной для этой цели мельнице, признанной изобретением (а.с. СССР №1369794 В22С 15/06). При этом однородность измельчённого огнеупора была получена за счёт совмещения на мельнице двух процессов: измельчения (истирания) и дробления. Реализация изобретения в промышленности позволила уменьшить параметр Rd на 20%.

Базируясь на известных способах предотвращения трещинообразования с помощью пор, в настоящей работе исследовалась пористая керамика. Были получены выражения для оценок пара-

метров качества пористой керамики, а также условия образования и подавления трещин. Из последних, в частности, следовало, что на свободных поверхностях пористой керамики реализуется процесс подавления трещин по сравнению с обычной керамикой, где в таких же условиях идет процесс образования трещин. Исследование показало, что параметры R_a и V_a пористой керамики больше, чем у обычной, поэтому применение пористой керамики для облицовочных покрытий не рекомендуется. Зато рекомендовано применение пористой керамики в не облицовочных (наружных, срединных и т.п.) покрытиях, для чего в работе рассмотрены теория и механизм остановки трещины с помощью пор, формируемых на пути её распространения. Предложен способ образования пор в покрытиях ОФ путём вспенивания суспензии инертным газом или сухим воздухом, признанный изобретением и внедренный на предприятии ИСКОЖ (г.Киров). Разработанный способ (а.с. СССР №139560) предполагается к внедрению на предприятии п/я М-5605; куда передана технологическая документация. Дальнейшие исследования проводились путём модифицирования (усовершенствования) отдельных операции изготовления керамики.

В частности, модифицировалась операция выплавки моделей из ОФ, наиболее материалоемкая в ЛВМ. При этом, используя аппарат расчёта напряжённо-деформированного состояния керамики, разработанный в подсистеме 2.2; была установлена величина внешнего давления выплавляющей среды (в известном способе выплавки моделей в автоклаве), которая затем использовалась на практике.

Большой объём исследований в работе относился к наиболее "хроноёмкой" в ЛВМ операции прокаливания ОФ, преимущественно, безопочного. Основными технологическими факторами данной операции являлись температура, время прокаливания и скорость нагрева керамики. Условия безопочного прокаливания и заливки ОФ являются наиболее тяжёлыми для последних, поскольку они подвергаются двойному тепловому удару: при загрузке в печь прокаливания - первый тепловой удар снаружи ОФ и при заливке жидким металлом - второй тепловой удар изнутри ОФ. Для определения напряжённо-деформированного состояния ОФ, подвержен-

ной внезапному тепловому удару, была применена методика расчёта динамических напряжений и смещений, разработанная выше, в четвёртом разделе. Было показано, что возникающие при внезапном тепловом ударе динамические напряжения и смещения не столь велики, чтобы существенно изменить напряжённо-деформированное состояние керамики. Результатом внедрения в производство, осуществлённое на Ижевском Механическом заводе, был отказ от практики зонного нагрева ОФ, а реализация высокой скорости их прогрева в процессе прокаливании дала заводу более 300руб. экономии на 1т годных отливок в год.

Дальнейшие исследования проводились в направлении расширения области применения в ЛВМ экзотермических покрытий. Эта прогрессивная технология безопочного прокаливания и заливки ОФ с применением экзотермических добавок впервые в отечественной практике была разработана и предложена в кандидатской диссертации автора настоящей работы, а в последней представлены результаты расширения области применения новых методов и материалов ввода экзотермических добавок в суспензии и (или) обсыпочные материалы, признанные изобретениями (а.с. СССР №360142, 511135, 944744 и 1025480).

В работе излагаются результаты опробования и внедрения на производстве некоторых финишных и вспомогательных операций, признанных изобретениями (а.с. СССР №1006040, 1186359 и др.). Одним из замечательных результатов этих работ явился численный анализ и разработка конструктивных рекомендаций по оптимальному выбору толщины стенки цилиндрической КФ согласно соотношения:

$$1,1 \leq h/a \leq 3^{1/2} - 1$$

где верхний (левый) предел установлен из условия сохранения надлежащей точности расчёта ($\leq 5\%$), а нижний (правый) предел — из условия обеспечения невыхода на облицовочную поверхность КФ усадочных трещин, если на наружной поверхности последних реализуются ситуации их образования.

Наконец, в работе представлены сведения о разработке и внедрении на Апхабадском и Волгоградском заводах НЕФТЕМАШ прогрессивной технологии ЛВМ сравнительно сложных отливок с применением КС, упрочнённых методом армирования. Эти сведения под-

креплены (и подтверждены) расчётом толщины арматуры, построенным на базе решения задачи Ламэ с учётом усадки керамики.

В заключение представлена качественная (технологическая) и количественная оценки настоящей работы в целом. Последняя определяется экономической эффективностью работы, достигнутой в количестве более 1млн. руб. в год (в ценах до 1986г.), что свидетельствует о значимости выполненной работы в целом.

Качественная оценка работы представлена в виде оргграфа технологических операций процесса изготовления керамики, модифицируемых по результатам проведённых исследований. Показывается, что подавляющее большинство технологических операций модифицируется по одному и более раз, причём на уровне изобретений, положительных решений и (или) поданных заявок на патенты, что свидетельствует о новизне, существенных отличиях и полезности всей выполненной работы в целом, что подтверждено количественно.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны научные положения процессов формирования шероховатости поверхности и размерной точности керамики и показано, что при отсутствии дополнительных нагрузок названные процессы сопровождаются образованием трещин.

2. Установлено, что, варьируя величинами дополнительных нагрузок, осуществляемых с помощью различных технологических воздействий, удастся полностью подавить процесс образования трещин в керамике.

3. Установлено, что параметры качества керамики и отливок взаимосвязаны между собой, и представлено, что зависимость между ними является прямой.

4. Построена система соотношений, связывающих параметры качества керамики с технологическими факторами её изготовления, и определено, что главнейшую роль среди последних играют усадка и коэффициент Пуассона связующего, зернистость огнеупора, а также его распределение в связующем.

5. На базе построенных соотношений реализован системный подход к исследованию процессов формообразования керамики, и установлено, что это позволяет эффективно использовать достижения смежных наук, избежать многих ошибок и получить новые полезные результаты.

6. Разработаны научные положения определения оптимального количества слоёв оболочковой формы и порядка их формирования на модели, и указано, что оптимизация этих факторов производится на основании расчёта напряжённо-деформированного состояния многослойной оболочковой формы.

7. Разработана методика расчёта на ЭВМ напряжённо-деформированного состояния многослойной оболочковой формы в виде алгоритмов, блок-схем и программ, и показано, что в расчётных соотношениях учтены: исчерпывающее множество внешних воздействий, нелинейность модуля упругости и коэффициента Пуассона.

8. Разработаны научно-методические положения определения множества свойств керамики и технологических факторов её изготовления, и представлено, что в условиях разработанного системного подхода это обеспечивает улучшение качества отливок и значительное повышение эффективности литья.

9. На четырёх промышленных предприятиях расширена область применения прогрессивной технологии безопасной заливки оболочковых форм литья по выплавляемым моделям с экзотермическими покрытиями, и установлено, что экономический эффект при этом составляет не менее 0,2 млн. руб.

10. На трёх заводах нефтехимического машиностроения опробована и внедрена технология изготовления отливок с применением керамических форм и стержней, упрочнённых методом армирования, и установлено, что данная технология обеспечивает до 0,3 млн. руб.

11. На ряде предприятий нашей страны внедрены частные технологические процессы изготовления отливок, построенные на базе модифицирования отдельных операций изготовления форм и стержней, и установлено, что при этом улучшается качество отливок и увеличивается эффективность литья.

12. Новизна, существенные отличия и полезность настоящей работы защищены десятью авторскими свидетельствами (а также по данным девятью заявками на патенты и положительными решениями по двум из них), а общая её экономическая эффективность составляет почти 1,2 млн. руб. в год, из которых более 1 млн. руб. (в ценах до 1986г.) внедрены в производство.

Основное (главным образом, научное) содержание диссертационн

ной работы опубликовано в учебном пособии:

1. Писарев И.Е. Изделия из специальной и строительной керамики/Ред. В.А.Васильев; Волгоград: 1993.- 106с.

и отображено в нижеследующих работах:

2. Распределение температуры по сечению керамической оболочки при безопочной термической обработке и заливке/И.Е.Писарев, Г.А.Ильин, В.А.Кучумов и Т.Е.Соловьёва//Известия ВУЗов.Машиностроение.- 1972.- №3.- С.31-34.

3. О безопочной и опочной заливке керамических форм/И.Е.Писарев, Г.А.Ильин, В.А.Кучумов и Т.Е.Соловьёва//Производственно-технический бюллетень.- 1972.- №5.- С.10-12.

4. Об образцах для определения свойств керамической оболочки в литье по выплавляемым моделям/И.Е.Писарев, Г.А.Ильин, В.А.Кучумов и Т.Е.Соловьёва//Производственно-технический бюллетень.- 1972.- №6.- С.46-47.

5. Писарев И.Е. и Жевтунов П.П. Упрочняющие обмазки в литье по выплавляемым моделям//Керамические формы и стержни для получения отливок повышенной точности.- М.: МЦНТИ им. Ф.Э.Дзержинского, 1972.- С.59-60.

6. Писарев И.Е. Комплекс оборудования для исследования свойств керамики в литье по выплавляемым моделям//Заводская лаборатория.- 1972.- №8.- С.996-997.

7. Писарев И.Е. Методика исследования керамики в литье по выплавляемым моделям//Новые формовочные материалы в литейном производстве.- Волгоград: Ниж.-Волж. МОЦНТИП, 1972.- С.63-66.

8. Физико-химическое исследование формирования керамической оболочки при нанесении огнеупорных покрытий и их прокаливании: Отчёт о НИР (заключит.)/Моск. Высш. техн. уч-ще им. Н.Э.Баумана (МВТУ им.Баумана); Руководитель П.П.Жевтунов.- тема АМ-573; №ГР 35657136; инв.ИБИ9199.- М., 1972.- 88с.

9. Писарев И.Е. Свойства двухслойных керамических оболочек//Литейное производство.- 1972.- №10.- С.11-13.

10. Расчёт температуры при обжиге экзотермических обмазок/И.Е.Писарев, Г.А.Ильин, В.А.Кучумов и Т.Е.Соловьёва//Известия ВУЗов.Машиностроение.- 1972.- №8.- С.118-121.

11. Влияние способов прокаливании форм на свойства отливок

по выплавляемым моделям/И.Е.Писарев, Г.А.Ильин, В.А.Кучумов и Т.Е.Соловьёва//Литейное производство.- 1973.- №10.- С.45-46.

12. Единый образец для определения свойств оболочек/И.Е.Писарев, Г.А.Ильин, В.А.Кучумов и Т.Е.Соловьёва//Литейное производство.- 1973.- №10.- С.32-33.

13. Писарев И.Е. Улучшение качества точных отливок//Исследования и резервы в литейном производстве.- Волгоград: Ниж.-Волж. МОЦНТИП, 1974.- С.43-44.

14. Выбор диаметра для истечения порошка при суспензионном литье стали в керамические формы/И.Е.Писарев, В.Н.Панфёров и Ф.А.Тюкин//Химическое и нефтяное машиностроение.- 1974.- №5.- С.22.

15. Писарев И.Е. Ликвидация трещин в оболочковых формах при прокаливании//Литейное производство.- 1975.- №5.- С.19.

16. Опыт освоения керамических стержней повышенной прочности на основе этилсиликата-40 для отливок рабочих колёс насосов/Ю.Г.Хмельов, А.Н.Фетисов, И.Е.Писарев и Г.П.Ким//Прогрессивные технологические процессы производства отливок из различных сплавов.- Пенза: Изд. Саратовского ун-та, 1976.- С.75-76.

17. Писарев И.Е. Определение физико-механических свойств материала форм и старжей с учётом пористости керамики//Химическое и нефтяное машиностроение.- 1977.- №5.- С.26-27.

18. Писарев И.Е. Термостойкость этилсиликатных оболочек. //Литейное производство.- 1977.- №3.- С.34.

19. Писарев И.Е. Распределение напряжений в оболочковой форме//Резервы повышения эффективности литейного производства.- Волгоград: Ниж.-Волж. МОЦНТИП, 1977.- С.59-63.

20. Разработка, исследование и внедрение технологии безопочного прокаливания и заливки оболочковых форм по выплавляемым моделям (для отливок колец клапанов двигателей автомобилей): Отчёт о НИР (заключит.)/Волгоград. инж.-строит. ин-т (ВолгИСИ); Руководитель к.т.н.Писарев И.Е.- тема 969-80; МР 8003688903; инв. №0282005802.- Волгоград, 1981.- 146с.

21. Писарев И.Е., Мушиц В.И. и Ивахов И.С. Безопочное прокаливание и заливка этилсиликатных оболочковых форм//Литейное

производство.- 1984.- №9.- С.26-28.

22. Писарев И.Е. Одна оценка шероховатости поверхности оболочковых форм литья по выплавляемым моделям//Известия ВУЗов.Машиностроение.- 1985.- №5.- С.110-116.

23. Писарев И.Е. О размерной точности оболочковых форм по выплавляемым моделям//Известия ВУЗов. Машиностроение.- №7.- 1985.- С.97-101.

24. Писарев И.Е. и Писарев О.И. О шероховатости поверхности оболочковых форм и керамических стержней//Депонированные научные работы.- М.: ВИПТИ, 1988.- №10(204).- С.139.

25. Писарев И.Е. и Писарев О.И. Ещё раз о шероховатости поверхности оболочковых форм и керамических стержней//Известия ВУЗов. Машиностроение.- 1990.- №2.- С.110-116.

26. Писарев И.Е. О назначении обсыпного материала при изготовлении оболочек форм по выплавляемым моделям//Методы контроля и исследований в производстве отливок по выплавляемым моделям.- М., 1992.- С.38-44

27. А.с. №360142 СССР МКИ² В22С 9/04, В22С 9/00. Упрочняющее покрытие керамических форм/И.Е.Писарев, П.П.Левтунов и В.А.Васильев//Бюлл. изобрет.- 1972.- №36.- 2с.

28. А.с. №511135 СССР МКИ² В22С 9/04. Обсыпный материал /И.Е. Писарев//Бюлл. изобрет.- 1976.- №15.- 3с.

29. А.с. №944744 СССР МКИ² В22С 9/00. Способ изготовления многослойных оболочковых форм/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин, И.М.Ушман и А.А.Домини//Бюлл. изобрет. 1980.- №17.- 5с.

30. А.с. №944746 СССР МКИ² В22С 9/12. Способ упрочнения многослойных оболочковых форм/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин, А.А.Домини и И.М.Ушман//Бюлл. изобрет.- 1980.- №27.- 4с.

31. А.с. №1006040 СССР МКИ² В22С 9/04. Способ отделения керамики оболочковой формы от блока отливок/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин, И.М.Ушман и А.А.Домини//Бюлл. изобрет.- 1983.- №11.- 2с.

32. А.с. №1025480 СССР МКИ² В22С 9/04. Способ изготовления многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин, И.М.Ушман и А.А.Домини//Бюлл. изобрет.- 1981.- №24.- 12с.

33. А.с. №1139560 СССР МКИ² В22С 9/04. Способ изготовления

оболочковых форм, получаемых по выплавляемым моделям/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин и О.И.Писарев//Бюлл. изобрет.- 1983.- №6.- 3с.

34. А.с. №1186359 СССР МКИ² В28С 9/04. Способ исправления дефектов оболочковых форм/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин и О.И.Писарев//Бюлл. изобрет.- 1983.- №39.- 5с.

35. А.с. №1215841 СССР МКИ² В28С 9/04. Способ литья по выплавляемым моделям/И.Е.Писарев, В.М.Рогожкин и О.И.Писарев//Бюлл. изобрет.- 1988.- №4.- 4с.

36. А.с. №1369794 СССР МКИ² В02С 15/36. Устройство для измельчения материалов/И.Е.Писарев, О.И.Писарев, А.И.Кобзарев, В.А.Васильев и др.//Бюлл. изобрет.- 1986.- №9.- 6с.

37. Положительное решение от 29.09.92г. по заявке от I4. 07.91г. №5019154/02-047137 Способ изготовления оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям Писарева И.Е. и Писарева О.И.

38. Положительное решение от 29.09.92г. по заявке от 08. 07.91г. №5020154/02-061155 Способ упрочнения многослойных оболочковых форм и устройство для его осуществления авторов Писарева И.Е. и Писарева О.И.

39. Заявка на выдачу патента России №4843052/33-061452 от 05.06.91г. Способ изготовления керамических изделий. Писарев И.Е. и Писарев О.И.

40. Заявка на выдачу патента России №5036449/02-0104970К от 03.03.92г. Керамическая форма. Писарев И.Е.

41. Заявка на выдачу патента России №5036449/02-0104970К от 03.03.92г. Способ изготовления керамических форм. Писарев И.Е.

42. Заявка на выдачу патента России №5043900/02-0160970К от 01.04.92г. В28С. Защитное покрытие. Писарев И.Е.

43. Заявка на выдачу патента России №5055992/33-0255500К от 27.05.92г. KNOW NOW (Способ изготовления изделий из строительной керамики и керамики для точного литья). В28С. Писарев И.Е.

44. Заявка на выдачу патента России №5048349/33-29156ДВ от 18.06.92г. G01N 33/00. Способ изготовления керамических

форм и вещество для его осуществления. Писарев И.Е. и Васильев В.А.

45. Заявка на выдачу патента России №5041736/33-015890 от 01.04.92г. В22D. Способ определения коэффициента Пуассона керамических масс и устройство для его осуществления. Писарев И.Е.

46. Заявка на выдачу патента России №3003422/02-0035080K от 20.01.93г. В22C. Способ определения коэффициента Пуассона оболочковых форм литья по выплавляемым моделям и устройство для его осуществления. Писарев И.Е. и Васильев В.А. .