

Ш 86 214

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

На правах рукописи

Коробейников Константин Алексеевич

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕГКОУДАЛЯЕМЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ
СТЕРЖНЕЙ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ СЛОЖНЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ ВОЛНОВОДОВ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ

05.16.04. - Литейное производство

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1992

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - кандидат технических наук
Рыбкин В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Кац Э.Л.

кандидат технических наук, доцент
Озеров В.А.

Будущее предприятие: ВНИИЛИТМАШ

Защита состоится "14" сентября 1992 г. на заседании
специализированного Совета К 003.15.13 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, В-5. 2-я Волжская ул. - 5

С диссертацией

Был отзыв

печатью, прос

Автореферат

УЧЕНЫМ

специализированного
кандидат техни

Тип. МТУ им.

объем 1,0 и.л.

М 86214

М 86814

Перспективным способом изготовления волноводов из алюминиевых сплавов, деталей радиоэлектронной промышленности, к которым предъявляются высокие требования по точности размеров каналов является литье по выплавляемым моделям. Работы, выполненные в МГТУ им. Н.Э.Баумана в области исследования формирования точности размеров отливок, позволили и готовить волноводы с линейными и радиальными каналами по 12 качеству точности без последующей механической обработки. Однако при изготовлении волноводов со сложными разветвленными каналами использование данного процесса осложняется рядом причин. Формирование таких сложных полостей в производстве осуществляется гигроскопичными карбамидными или керамическими стержнями. Использование керамических стержней более перспективно, но сравнительно низкая точность размеров стержней, в частности при Шоу-процессе, сдерживает их широкое применение. Решение задачи обеспечения точности размеров отливок волноводного класса со сложными разветвленными каналами, получаемыми по выплавляемым моделям с использованием керамических стержней, является актуальной, т.к. способствует улучшению характеристик радиоэлектронной аппаратуры, повышает производительность труда за счет устранения механической обработки каналов волноводов.

Целью настоящей работы является уменьшение трудоемкости при изготовлении сложных волноводов с использованием легкоудаляемых керамических стержней при обеспечении требуемой точности отливок.

Научная новизна: 1. Разработаны физическая и математическая модели термосилового взаимодействия применительно к технологическому процессу изготовления отливок литьем по выплавляемым моделям с использованием керамических стержней.

2. Установлены закономерности изменения размеров керамических стержней при их изготовлении в зависимости от состава материалов стержня и режимов процесса.

3. Показано, что конечный размер канала отливки при затруднении усадки, формируется по стержню и фактически соответствует размеру стержня перед заливкой.

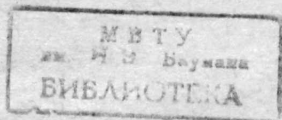
МГТУ им. Н.Э.Баумана



1086714

Коробейников К. А. Разрабо

I



Практическая ценность: 1. Разработан технологический процесс изготовления керамических стержней, отличающийся от известных более высокой стабильностью и производительностью, обеспечи-
лющий получение каналов волново- в сложной к. конфигурации по I2-I4
квалитетам СТ СЭВ I44-75.

2. Сконструирован, изготовлен и эксплуатируется измерительный
стенд, позволяющий в условиях соответствующих реальному техно-
логическому процессу проводить исследования изменений размеров
и температуры образцов из керамических модельных и других как
жидкотекучих, так и вязкопластичных самотвердеющих составов.

3. Разработан представлен в виде программы метод расчета раз-
мера и допуска на размер рабочей полости пресс-формы для полу-
чения керамических стержней, позволяющий в условиях производст-
ва устранить доводку пресс-формы.

4. Разработана программа для определения содержания жидкой фазы
в суспензии и коррекции ее состава.

Реализация работы: Результаты работы прошли промышленное опробо-
вание на НПО "Вымпел" в 1988 г.

Метод исследований изменения разм-ра стержней с примение-
нием измерительного тенда внедрен в учебный процесс и испыты-
вается при выполнении лабораторных работ по курсу "Специальные
способы литья".

Апробация работы: Материалы диссертации докладывались и обсу-
ждались на научных семинарах кафедры МТ-5 МГТУ им.Н.Э.Баумана в
1988, 1989, 1990 г.г.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 3 статьи.

Объем работы: Диссертационная работа состоит из введения,
6 глав, общих выводов и приложений. Содержит 124 страниц маши-
нописного текста, 2 таблицы, 45 рисунков, список литературы
из 108 наименований, приложений на 38 страницах.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы и ее цель, изложены
научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

Глава I посвящена анализу состояния вопроса и обоснованию выбора цели и задач исследования.

Выбор литья по выплавляемым моделям как способа изготовления волноводов, показал, что в производстве значительная часть сливо: волноводов имеет точность размеров по I4-I7 качеству СТ СЭВ I44-75, что не соответствует технологическим требованиям. В МГТУ им. Н.Э.Баумана разработан технологический процесс изготовления тонкостенных алюминиевых отливок, обеспечивающий получение волноводов, имеющих сравнительно простую конфигурацию каналов, типа "прямой волновод", "радиусный изгиб", с точностью размеров по I2 качеству СТ СЭВ I44-75, что решает проблему их получения без последующей механической обработки. Однако при изготовлении волноводов со сложными разветвленными каналами типа "угловой изгиб" или "тройник", использование данного способа затруднено. Для формирования таких сложных полостей в производстве применяются карбамидные гигроскопичные стержни, оформляющие полость модели, или предварительно изготовленные керамические и подобные им стержни, оформляющие непосредственно полость отливки. Несмотря на ряд преимуществ керамических стержней перед карбамидными они не нашли еще широкого применения в промышленности из-за трудностей, возникающих при их изготовлении и сравнительно низкой точности размеров.

Анализ литературы показал, что среди известных способов изготовления стержней для получения каналов волноводов наиболее приемлемым является Шоу-процесс. Использование данного процесса в производстве сдерживается прежде всего его нестабильностью.

Вопросы, связанные с повышением стабильности Шоу-процесса на этапе отверждения керамической суспензии, решались в работах Хмелева Ю.Г., Фирсова В.Г. и др., что позволило сделать его более надежным и управляемым, обеспечить необходимые эксплуатационные свойства стержней и форм. Однако более жесткие требования к производительности процесса изготовления керамических стержней, точности их размеров и разупрочняемости при получении волноводов, вызвало необходимость дальнейшего совершенствования Шоу-процесса. Особое значение при этом имеет получение с помощью керамических стержней точных размеров каналов, поскольку этот параметр во многом определяет качество волноводов.

Формирование размера и погрешности размера канала отливки

с использованием керамических стержней происходит при изготовлении стержня в пресс-форме с последующим удалением из него влаги во время сушки и прокаливания, а также при получении канала отливки в процессе заливки, последующего совместного охлаждения и выбивки стержня из отливки.

Результаты предварительного промышленного опробования показали, что наибольшая доля изменения размера и накопление его погрешности происходит в процессе усадки стержня в пресс-форме и последующей сушки. Множество факторов, влияющих на величину усадки стержней обусловили то, что существующие закономерности формирования размеров стержней достаточно сильно отличаются друг от друга и не позволяют ни одну из них использовать как универсальную.

Обзор литературы по формированию размера стержня и канала отливки в условиях их термосилового взаимодействия показал, что влияние данного процесса проявляется главным образом для сплавов с высоким модулем упругости при усадке на жесткий стержень. При этом трудности, возникающие при определении размера и напряженного состояния в условиях реального технологического процесса, а также сложность создания математических моделей, в полной мере отражающих тепловые и силовые процессы взаимодействия стержня и отливки оставляют данный вопрос во многом открытым.

На основании анализа работ были сформулированы задачи диссертационной работы:

1. Разработать процесс изготовления легкоудаляемых керамических стержней, удовлетворяющий требованиям производства волноводов.
2. Изучить закономерности формирования размеров стержней при их получении в пресс-форме, сушке и прокаливании.
3. Произвести оценку влияния термосилового взаимодействия стержня и отливки на конечный размер ее канала.
4. Разработать метод расчета размеров и допусков на размеры рабочих полостей пресс-форм, обеспечивающих заданную точность размеров каналов отливок и устранение операции доводки пресс-форм.

Глава 2 посвящена разработке технологического процесса изготовления легкоудаляемых керамических стержней, формирующих каналы волноводов при получении их литьем по выплавляемым мо-

делям.

Выбрав в качестве базового Шоу-процесса, с учетом рекомендаций, приведенных в работах Иванова В.Н., Зарешкой Г.М., Хмелева Ю.Г. и др., связующим керамической суспензии использовали "дрол"зованный раствор этилсиликата (ГРЭС), а за основу наполнителя при соотношении в нем выделенной/ зерновой фракций 60/40% масс. приняли кварцевые огнеупоры. Для облегчения удаления стержней из каналов алюминиевых отливок использовали расплавленную добавку, выбор которой с учетом неэффективности, невысокой стоимости, растворимости и других свойств, показал, что данному комплексу требований лучшим образом отвечает гипс. Применение гипса строительных марок, содержащих щелочные примеси, позволило использовать его также как гелеобразователь суспензии, обеспечивающий высокую стабильность отверждения.

Указание в работах Кестнер О.Е., Дудалея Е.Н. и др. на необратимую усадку гипсовых стержней и форм при прокаливании, а также отсутствие необходимых данных по изменению размеров керамических стержней, содержащих полугидрат гипса и кварц, в процессе их прокаливания заливки и охлаждения, потребовали проведение дилатометрических и термографических исследований гипсо-кварцевых составов при двойном цикле нагрева-охлаждения.

Измерение размеров образцов керамических смесей при нагреве проводили на дилатометре ДКВ-2 по стандартной методике, используя для контроля изменения длины образцов измерительную систему 234 завода "Калибр" с точностью ± 50 мкм. Температуру измеряли термопарой град.ШП с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Запись изменения длины и температуры осуществляли на предварительно тарированном самопишущим потенциометре типа КСП-4 класса 0,25. Термографические исследования смесей производили на дериватографе Q-1500D.

Дилатометрия образцов при повторном нагреве до 800°C и их после ушем охлаждении показали, что кривые изменения размера имеют в этом случае линейный без необратимой усадки характер, а изменение соотношения кварца и гипса в составе керамики практически не отражается на величине температурного коэффициента линейного расширения сжатия (ТКЛР) керамики в интервале температур от 20 до 750°C . Термографический анализ также подтвердил, что изменений при нагреве до 800°C в смесях не наблюдается. Полученные результаты позволили установить приемлемую максимальную

температуру прокаливания гипс-кварцевой керамики (800°C) и послужили основанием для использования в составах стержней предварительно прокаленного гипса.

Сравнение dilatометрических характеристик образцов, содержащих 40 и 60% гипса в наполнителе показало, что величина необратимой усадки для непрокаленного гипса составляла соответственно 0,18 и 0,5%, а для прокаленного 0,02 и 0,12%. Таким образом, предварительное прокаливание гипса позволило в значительной степени уменьшить необратимую усадку керамики при прокаливании до 800°C , стабилизировать ее ТКЛР, и за счет этого обеспечить требуемую точность стержней.

Выбор оптимального количества гипса в составе керамики производили с учетом ее разупрочняемости после заливки, при выдержке в воде и нагрузок, действующих на стержни при запрессовке модельного состава и транспортировке. Прочность керамики определяли предельными напряжениями при испытании на изгиб. Испытания на разрывной машине РР-10/1 проводили при температуре от 20 до 22°C после основных операций процесса. Результаты этих испытаний и промышленного опробования процесса позволили определить кинетику изменения прочности от времени операции и оптимальное содержание гипса в наполнителе (от 40 до 60%), обеспечивающее как необходимую прочность при запрессовке модельного состава ($\sigma_{\text{изг}}^{\text{нм}} = 1,4\text{--}1,7 \text{ МПа}$), так и удаление стержней из каналов отливок на вращающемся в течение 5–10 мин после 30–60 мин выдержки в воде ($\sigma_{\text{изг}}^{\text{нм}} = 0,6\text{--}0,75 \text{ МПа}$).

Использование гипса в качестве гелеобразователя суспензии потребовало, в свою очередь, выбора состава ГРЭТС, обеспечивающего время затвердевания суспензии в пресс-форме в пределах 5–15 мин. Исследование длительности гелеобразования ГРЭТС производили на стандартных пробах по 10 и 20 мл для растворов с условным содержанием SiO_2 20 и 30% при изменении количества воды для гидролиза H от 0,3 до 0,8. Результаты исследований показали, что при одинаковой чувствительности (склонности к огеливанию) растворов с 20 и 30% SiO_2 , последние имели лучшие технологические и эксплуатационные свойства (живучесть раствора, прочность и усадка керамики и т.д.). Поэтому с учетом стабильности свойств был выбран ГРЭТС с 30% SiO_2 и $\text{H} = 0,45$, затвердевающий под действием гипса в течение 17–22 мин.

Для ускорения и стабилизации процесса гелеобразования применяли нагрев пресс-формы, предварительно проведя серию экспериментов по влиянию температуры на время гелеобразования. В результате было установлено, что при нагреве ГРЭТС от 25 до 70°C скорость его затвердевания возрастала в 3,3-4 раза, а различие во времени твердения для составов с соотношением $M_{\text{гипса}}/M_{\text{ГРЭТС}}$ от 0,25 до 2,0 уменьшалось от 40 до 9 мин. С учетом выбранного количества гипса и особенностей процесса, определен оптимальный интервал температур нагрева пресс-формы от 40 до 60°C, обеспечивающий отверждение суспензии в течение 5-10 мин.

Формирование механических свойств керамических стержней в значительной мере происходит после их извлечения из пресс-формы при удалении жидкой фазы в ходе сушки или горения. С целью определения рационального способа обработки стержней проведена оценка их влияния на прочностные характеристики стержней, которая показала, что быстрая эвакуация растворителя при высокоскоростных способах сушки приводит к значительному снижению прочности стержней и короблению. Среди замедленных способов лучшие результаты по прочности и шероховатости поверхности стержней были достигнуты при их выдержке в воде с последующей сушкой на воздухе. Однако неравномерность гидратации гипса при его взаимодействии с водой и последующая значительная усадка стержней при прокаливании, явились причиной снижения их точности, в связи с чем, в качестве основного был принят способ сушки на воздухе, обеспечивающий, по сравнению с горением, устранение коробления и большую прочность стержней. Было определено, что начальный период удаления жидкой фазы, сопровождающийся усадкой керамики, необходимо проводить замедленными способами сушки, после чего без снижения механических свойств стержней можно использовать ускоренные способы. Удаление стержней из нагретой пресс-формы уменьшает склонность к образованию трещин на их поверхности, за счет увеличения влажностепроводности материала стержней, которое обусловлено образованием положительного температурного градиента в поперечном сечении стержней.

В главе 3 приведены результаты исследования усадки керамических стержней во время их выдержки в полости пресс-формы и последующей сушки на воздухе, а также изменения массы стержней в процессе сушки.

Для определения изменения размера керамического стержня при его формировании в пресс-форме и сушке разработан и изготовлен измерительный стенд, позволяющий контролировать размер и температуру образца как в полости пресс-формы, так и вне ее в условиях, соответствующих реальному технологическому процессу. Измерительный стенд оснащен приспособлением для дозирования и запрессовки составов в полость пресс-формы, закрепленной на подвижной каретке, удлиненным подвижным штоком, и резиновыми уплотнениями, для предотвращения выжимания при запрессовке жидкой фазы. Нагрев и поддержание температуры пресс-формы осуществляется с помощью ультратермостата с точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Контроль за размером образца производился при помощи измерительной системы модели 234 завода "Калибр". Измерение температуры - при помощи хромель-копелевой термопары. Регистрация изменения размера и температуры осуществлялась в автоматическом режиме на приборах КСП-4 класса 0,5. Максимальная температура пресс-формы составляла 100°C , диапазон измеряемых перемещений - от 0 до 3000 мкм, точность измерения температуры - $\pm 2^{\circ}\text{C}$, точность измерения размера - ± 50 мкм. Наличие запрессовочного приспособления позволяло исследовать составы с повышенной начальной вязкостью.

Измерение массы стержней в процессе сушки осуществлялось взвешиванием контрольных образцов на весах ВЛК-500г-М с точностью $\pm 0,01$ г.

Установлено, что при выдержке стержней в пресс-форме наблюдается их усадка, вызванная синерезисом геля связующего, величина которой зависит от скорости гелеобразования и длительности выдержки стержней в пресс-форме. В ходе экспериментов время выдержки изменяли от 20 до 180 мин, что вызвало различную усадку стержней перед их удалением из пресс-формы. Однако на значении полной усадки эта разница практически не отразилась, что позволило сделать вывод о незначительном влиянии гелеобразования на величину конечной усадки керамических стержней.

Отсутствие систематизированных данных по усадке керамики во время удаления жидкой фазы при использовании в качестве связующего ГРЭТС на органических растворителях, вызвало необходимость определить влияние данного фактора на усадку применительно к разработанному процессу. Результаты измерений показали, что зависимость усадки ϵ от количества испарившейся жидкой

фазы - ϑ имеет в основном линейный характер и может быть представлена формулой:

$$\varepsilon = K_{\text{ус}} \cdot K_{\text{исп}} \cdot (C_{\text{ж}} - B)$$

где: $K_{\text{ус}}$ - коэффициент усадки, характеризующий ее интенсивность в зависимости от потери жидкой фазы;

$K_{\text{исп}}$ - коэффициент испарения, определяющий часть влаги, которая удаляется при сушке из связующего (ГРЭС);

$C_{\text{ж}}$ - исходное содержание ГРЭС в суспензии;

B - часть ГРЭС, фактически не участвующая в усадке.

При прочих равных параметрах процесса изготовления стержней (состав наполнителя, температура пресс-формы и т.д.) значение $K_{\text{ус}}$, $K_{\text{исп}}$ и B с изменением $C_{\text{ж}}$ в пределах от 20 до 22,5% оставались постоянными, что подтвердило линейный характер зависимости $\varepsilon = f(\vartheta)$.

Так как для разработанного процесса содержание SiO_2 в связующем растворе и способ сушки имеют непосредственную связь с технологией изготовления и эксплуатационными свойствами стержней, данные факторы в ходе экспериментов не изменяли, выбрав в качестве переменных параметров фракционный состав наполнителя и температуру пресс-формы. В результате исследований было установлено влияние указанных параметров на значение $K_{\text{ус}}$, $K_{\text{исп}}$ и B .

Использование наполнителей с соотношениями пыл./зерн.

фракций 40/60, 60/40 и 80/20 % (величиной удельной поверхности $S_{\text{уд}}$ соответственно 145, 232 и 280 м²/кг), показало, что с увеличением количества пылевидной фракции пропорционально возрастает $C_{\text{ж}}$, обеспечивающее суспензии необходимую технологическую подвижность, а также величина $K_{\text{ус}}$. Зависимости $K_{\text{исп}}$ и $B = f(S_{\text{уд}})$ имели более сложный близкий к параболе вид, с точками минимума при $S_{\text{уд}} = 200$ и 207 м²/кг, что, очевидно, связано с характером изменения адсорбции геля ГРЭС и плотности упаковки наполнителя.

Влияние нагрева пресс-формы на величину усадки оценивали в интервале температур пресс-формы от 20 до 70°C. Различия усадки имели место в первые 5-7 мин, когда после извлечения стержней из пресс-формы они охлаждались до комнатной температуры. Это соответствовало около 15% всей испарившейся влаги и существенно образом не отразилось на значениях $K_{\text{ус}}$, $K_{\text{исп}}$ и усадки в целом.

В главе 4 по результатам решения на ПЭЭМ математической модели термосилового взаимодействия стержня с отливкой (термодинамической и деформационной задач), произведена оценка влияния термосилового взаимодействия на размер канала отливки при ее затрудненной усадке. Анализ силового взаимодействия при помощи номограммы формирования натяга для тонкостенных алюминиевых отливок при литье по выплавляемым моделям показал, что общая величина натяга определяется температурой стержня в момент начала линейной усадки отливки ($T_{\text{ст н.л.у.}}$), которая пропорциональна температуре стержня перед заливкой ($T_{\text{ст з}}$), а различие натягов, которое образуется при изменении $T_{\text{ст з}}$, реализуется в интервале температур, соответствующих максимальному прогреву стержней ($T_{\text{ст макс}}$).

Задача определения деформаций стержня и отливки при наличии между ними натяга является классической, однако решить ее аналитически невозможно, что обусловлено упруго-пластическим состоянием отливки, неосесимметричностью тел, нестационарностью процесса (тела меняют свои размеры во времени), и поэтому требует использования численных методов, среди которых одним из наиболее эффективных и хорошо разработанных является метод конечных элементов (МКЭ).

Решение задачи термосилового взаимодействия отливки и стержня со стержнем, оформляющим ее канал, осуществлялось на ПЭВМ ЕС-1840 с использованием пакета прикладных программ: разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана и предназначенного для анализа термодинамической (программа **TERMOD**) и деформационной (программа **DEFORM**) задач в плоской постановке.

Для решения нестационарной задачи численными методами ее свели к ряду стационарных. Весь интервал термосилового взаимодействия стержня и отливки был разбит на ряд шагов и для каждого шага размеры определяли сначала в зависимости от температуры без учета силового взаимодействия, после чего решая деформационную задачу находили реальный размер. Таким образом определяли движение границы стержня и отливки по мере их охлаждения находили конечный размер отливки при совместном деформировании. Выбивка стержня из канала отливки равносильна ее разгрузке.

Программой **TERMOD** производится определение значений температур в узлах при решении системы линейных алгебраических

уравнений полученных преобразованием дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности при заданных граничных условиях. Подготовка файла исходных данных включает разбиение поперечного сечения на конечные элементы, ввод граничных условий задачи, характеристик материалов, коэффициентов конвекции, теплопроводности и т.д. В результате выполнения программы получается файл, содержащий информацию о значениях температур в узловых точках в каждый из моментов времени, соответствующих выбранному интервалу интегрирования и шагу по времени.

Определение перемещений в узлах, осуществляется при помощи программы **DEFORM**, созданной в соответствии с вариантом МКЭ, основные положения которого с учетом специфики решения данной задачи изложены в отдельном разделе диссертации. В частности, построена конечно-элементная модель упругой плоской деформации; при помощи метода невязок решена физически нелинейная задача упруго-пластической деформации отливки.

В качестве исходных данных для запуска программы **DEFORM** используют характеристики материалов, граничные условия и результаты, полученные при решении программы **TERMOT**. После выполнения программы **DEFORM** получают файл, содержащий информацию о смещении узловых точек в направлении X и Y.

Относительно высокая сложность задач потребовала оптимизации расчетов. Сходство условий силового взаимодействия между стержнем и отливкой при различных значениях температуры стержня перед заливкой, позволило ограничить количество вариантов расчета по данному параметру тремя: $T_{ст\ 3} = (20, 200, 400)^{\circ}\text{C}$. При решении термодинамической задачи продолжительность интервалов расчета и шагов по времени выбирали в соответствии со скоростью охлаждения тел, а при решении деформационной задачи границы температурных интервалов для всех случаев $T_{ст\ 3}$ при совместном охлаждении отливки и стержня были выбраны одинаковыми, что существенно сократило общее количество расчетов.

Сравнение результатов решения термодинамической задачи с результатами экспериментов, полученными при последнем термометрировании форм литья по выплавляемым моделям, показало, что различие между ними во всех случаях не превышает 10% и подтвердило возможность использования результатов теплового расчета для решения упруго-пластической задачи.

По результатам деформационных расчетов определены абсолютные перемещения внутренней и внешней границы отливки на основных этапах процесса, а также значения относительного обжатия стержня при затрудненной усадке, относительного изменения размера отливки при выбивке стержня и реализации усадки отливки. Результаты расчетов показали, что обжатие стержня отливки при прогреве стержня до $T_{\text{ст макс}}$ происходило лишь в случае $T_{\text{ст з}} = 20^{\circ}\text{C}$. В то же время характер и величина деформаций стержня и отливки при их совместном охлаждении для всех трех значений $T_{\text{ст з}}$ были приблизительно одинаковыми. Так, при изменении $T_{\text{ст з}}$ от 20 до 200°C величина обжатия уменьшалась в $1,38-1,44$ раза; при дальнейшем увеличении до 400°C практически не изменялась.

На величину деформации в значительной мере влияла конфигурация отливки в поперечном сечении. При этом наиболее нагруженными и сжатыми оказались углы стержня, где относительное обжатие к концу охлаждения составляла $0,055-0,06\%$, тогда как в середине сторон деформация изменялась от 0 до $0,0346\%$. После удаления стержня из полости отливки, деформация разгрузки приблизительно в $1,25$ раза превышала величину обжатия стержня. Средняя по длине суммарная деформация канала отливки под влиянием силового взаимодействия, составила для протяженной стороны $0,054\%$ при различии между краем и серединой $0,128\%$. Для короткой стороны эти значения равнялись соответственно $0,11$ и $0,0328\%$. Применительно к прямоугольному сечению канала волновода $15 \times 35 \text{ мм}$ среднее изменение размера 15 мм составило $0,0085 \text{ мм}$, при разнице $0,0192 \text{ мм}$. Для стороны 35 мм эти значения равнялись соответственно $0,04$ и $0,011 \text{ мм}$. Величина суммарной деформации отливки составляла $8-14\%$ от натяга (разницы усадки отливки и стержня) и соответствовала литературным данным.

Таким образом, влияние силового взаимодействия отражается прежде всего на неравномерности изменения размера канала по периметру, что необходимо учитывать при назначении допуска на рабочий размер оснастки. В то же время среднее по длине сторон изменение размера в результате сжатия стержня и реализации накопленных в отливке упругих напряжений не превышает $0,11\%$, что составляет около 8% от общего изменения размера и в расчетах при назначении рабочих размеров оснастки во внимание может не приниматься.

В главе 5 приводится метод расчета размеров и допуска на размер пресс-формы для изготовления керамических стержней, который позволяет свести к минимуму систематическую погрешность размера канала отливки и устранить необходимость в доводке пресс-форм. Основой для создания метода послужили результаты экспериментальных исследований изменения размера керамического стержня и расчета размера канала отливки, формирующегося в условиях затрудненной усадки.

На языке ФОРТРАН-77 была разработана программа "Расчет размеров и допусков на размеры пресс-форм для изготовления керамических стержней", исходными данными для которой являются размер отливки по чертежу, параметры процесса, а также их отклонения от номинальных значений. После выполнения программа создает файл, в котором, помимо рабочих размеров пресс-форм и допусков на них, приводятся доли влияния эталонных параметров процесса в суммарном относительном изменении размера и относительной погрешности общего передаточного коэффициента, что позволяет в случае необходимости дать рекомендации по изменению процесса с целью корректировки размеров отливки и повышению их точности.

Определение указанных величин применительно к разработанному технологическому процессу показало, что при средней суммарной усадке $\varepsilon_{\Sigma} = 1,54\%$ и общем передаточном коэффициенте $K = 0,9846$, основная доля изменения размера — от 80 до 93% происходит при сушке от 5 до 18% при прокаливании стержня. В свою очередь накопление погрешностей с учетом деформаций поперечного сечения отливки на 64-75% обусловлено отклонениями содержания жидкой фазы в суспензии и в меньшей мере колебаниями других факторов: температуры пресс-формы — 7-11%, удельной поверхности фракционного состава наполнителя — 4-7% и т.д.

Результаты расчета показали, что одним из основных условий получения точных каналов отливок при использовании керамических стержней является постоянство содержания жидкой фазы в суспензии, а это, в свою очередь, обеспечивается как высокой точностью дозирования компонентов, так и контролем состава суспензии перед использованием. Наиболее простым и надежным способом контроля является определение содержания твердой и жидкой фазы в суспензии по ее плотности. На языке ФОРТРАН-77 разработана прог-

рамма "Определение и коррекция состава суспензии", позволяющая по плотности исходной суспензии установить ее состав и, в случае, если он отличается от заданного, сделать рекомендацию по его изменению.

В главе 6 приводятся результаты промышленного опробования процесса изготовления легкоудаляемых керамических стержней с последующим получением по ним в процессе литья по выплавляемым моделям волноводных узлов трех наименований со сложной конфигурацией каналов. Керамические стержни получали в соответствии с разработанной технологией запрессовки суспензии в нагретую до $50 \pm 5^\circ\text{C}$ металлическую пресс-форму. После удаления стержней из оснастки и сушки на воздухе, стержни устанавливали в полость пресс-формы для изготовления выплавляемых моделей. Дальнейшие операции соответствовали стандартному процессу литья по выплавляемым моделям. Выплавление моделей из форм производили в среде горячего воздуха при температуре $150 \pm 20^\circ\text{C}$, прокаливание форм в опоках с применением опорного материала при температуре $750 \pm 50^\circ\text{C}$. Формы заливали сплавом АЛ9 при температуре расплава $720 \pm 20^\circ\text{C}$. После охлаждения формы на 30-60 мин помещали в воду, а затем на вибростенде в течение 5-10 мин очищали отливки от керамики.

В ходе опробования производили измерения размеров пресс-форм концевыми мерами с точностью 0,001 мм, стержней - микрометром с точностью 0,005 мм, каналов отливок - штангенциркулем с точностью 0,05 мм. Статистическая обработка результатов измерений показала, что среднее изменение размера (усадка) стержней при сушке составила 1,3% при расчетной 1,43%, а изменение размера при прокаливании и заливке 0,3% при расчетной 0,27%, т.е. изменению размеров стержней и отливок с погрешностями порядка 10% соответствовало расчетному. Точность размеров пресс-форм находилась в пределах 8-9, стержней II-III, отливок I2-I4 квалитетов СТ СЭВ 141-75. Достигнутая точность отливок отвечала требованиям к точности деталей по чертежу. Ожидаемый экономический эффект от внедрения технологического процесса изготовления волноводов с использованием легкоудаляемых керамических стержней в расчете на годовую программу (по состоянию на 1989 г.) составляет 5134,5 руб.

Общие выводы

1. Разработан технологический процесс изготовления легко-удаляемых керамических стержней для оформления сложных полостей в алюминиевых отливках. Использование в качестве разупрочняемого и гелеобразующего компонента керамической суспензии предварительно прокаленного строительного гипса в сочетании с нагревом пресс-формы позволило:

- повысить скорость и стабильность процесса отверждения суспензии;
- уменьшить вероятность образования трещин на поверхности стержней при их сушке на воздухе;
- устранить необратимую усадку гипсокаршевой керамики при прокаливании, стабилизировать ее ТКЛР и за счет этого повысить точность размеров стержней и каналов отливок.

2. С помощью разработанного измерительного стенда установлены закономерности изменения размеров керамических стержней при их изготовлении в зависимости от состава материалов стержня и режимов процесса. Определено, что при выдержке стержней в полости нагретой пресс-формы происходит усадка стержней, обусловленная синерезисом геля связующего и практически не влияющая на значение полной усадки, которая для выбранного техпроцесса определяется содержанием в суспензии жидкой фазы, фракционным составом наполнителя и температурой пресс-формы.

3. Разработаны физическая и математическая модели термосилового взаимодействия применительно к технологическому процессу изготовления отливок литьем по выплавляемым моделям с использованием керамических стержней.

В результате решения на ПЭВМ математической модели термосилового взаимодействия стержня с отливкой (термодинамической и деформационной задач в плоской постановке) установлено, что при затвердевании усадки тонкостенных алюминиевых отливок с прямоугольным сечением канала влияние силового взаимодействия отражается прежде всего на неравномерности изменения размера (деформации) канала по периметру - от 0,032 до 0,128 % или от 0,011 до 0,019 мм при допуске на размер $\pm 0,15$ мм и в меньшей степени на измерении среднего размера канала от 0,054 до 0,11 %, что составляет менее 8% от общего изменения размера.

4. Установлено, что конечный размер канала отливки при затруднении усадки формируется по стержню и фактически соответствует размеру стержня перед заливкой.

5. Разработан и реализован в виде программы метод расчета размеров и допусков на размеры пресс-формы для изготовления керамических стержней, оформляющих полости алюминиевых отливок, который учитывает особенности формирования размера на этапах сушки, прескаливании стержней, заливки и охлаждения отливки и позволяет в значительной мере уменьшить систематические погрешности размеров каналов отливок, устранить доводку пресс-форм, а также определить величину случайных погрешностей в зависимости от параметров процесса.

6. Технологический процесс изготовления литьем по выплавляемым моделям алюминиевых волноводных узлов со сложной конфигурацией каналов прошел промышленное опробование на НПО "Вымпел". Статистическая обработка измерений пресс-форм, стержней и каналов отливок трех наименований показала, что изменения размеров с погрешностями порядка 10% соответствовали расчетному, а достигнута точность каналов отливок находилась в пределах 12-14 квалитетов СТ СЭВ 144-75 и отвечала требованиям по чертежу. Ожидаемый экономический эффект за счет использования керамических стержней в расчете на годовую программу по состоянию на 1989 г. составил 5134,5 руб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Юсипов Р.Ф., Коробейников К.А. Использование гипса в составе легкоудаляемых керамических стержней при получении алюминиевых отливок по выплавляемым моделям / МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М., 1990. - 3 с. - Деп. во ВНИИТЭМР 12.02.90. №64 - мш 90.

2. Юсипов Р.Ф., Коробейников К.А. Разработка технологического процесса изготовления легкоудаляемых керамических стержней для получения сложных разветвленных полостей в алюминиевых отливках литьем по выплавляемым моделям / МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М., 1990. - 8 с. - Деп. во ВНИИТЭМР 12.02.90. №65 - мш 90.

3. Рыбкин В.А., Коробейников К.А. Расчет размеров полостей алюминиевых отливок, получаемых с использованием керамических стержней. // Методы контроля и исследования в производстве отливок по выплавляемым моделям: Материалы научно-технического семинара МДНТП. - М., 1992. - С. 78-84.