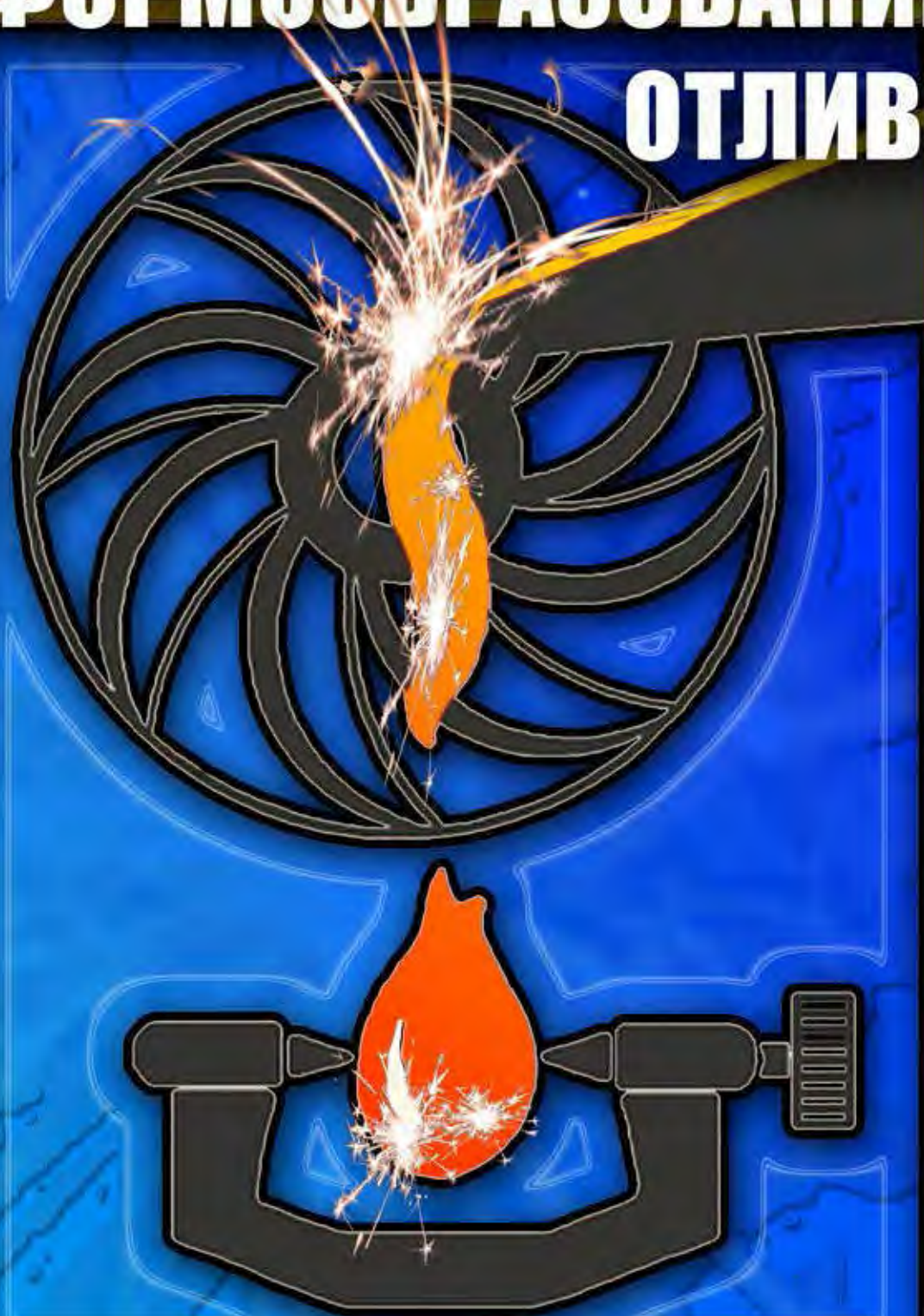


Татьяна Лысенко
Василий Ясюков
Игорь Прокопович

КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ОТЛИВОК



КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ ОТЛИВОК

МОНОГРАФИЯ

Составители:

Т. В. ЛЫСЕНКО, В. В. ЯСЮКОВ, И. В. ПРОКОПОВИЧ

Одесса

«Экология»

2019

Составители:

Т. В. Лысенко, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии и управления литейными процессами Одесского национального политехнического университета;

В. В. Ясюков, канд. техн. наук, доц., доц. каф. технологии и управления литейными процессами Одесского национального политехнического университета;

И. В. Прокопович, д-р техн. наук, доц., проф. каф. технологии и управления литейными процессами Одесского национального политехнического университета

Рекомендовано ученым советом Одесского национального политехнического университета. *Протокол № 7 от 17.04.2019 г.*

Рецензенты:

О. И. Пономаренко, д-р техн. наук, проф., проф. каф. литейного производства Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»;

В. Г. Могилатенко, д-р техн. наук, проф., проф. каф. литейного производства черных и цветных металлов Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»

Концепция управления формообразованием отливок : монография /
 К652 **сост. Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, И. В. Прокопович. — Одесса :**
 Экология, 2019. — 272 с.

ISBN 978-617-7046-74-4

В монографии изложены исследования по повышению геометрической точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей, выполненные под руководством доктора технических наук, профессора Ф. Д. Оболенцева на кафедре литейного производства Одесского политехнического института. Подробно изложены теория и практика композиционного литья, формообразование с применением холодноогельняемой керамики, керамики твердофазного спекания, разовых литейных форм.

Монография предназначена для инженерно-технических работников литейных цехов, сотрудников НИИ и вузов, а также студентов специальности 136 «Металлургия».

УДК 669:621.74.04

ОБОЛЕНЦЕВ

Федор Дмитриевич

1914 – 2002 гг.

(биографическая справка)

Оболенцев Федор Дмитриевич, родился 13 апреля 1914 г. (по новому стилю) в селе Алексеевка, Харьковской губернии. Скончался 19 декабря 2002 г. в г. Санкт-Петербург (Россия).

В 1933 г. поступил в Ленинградский политехнический институт на металлургический факультет по специальности «Литейное производство». С 1934 г. и до конца обучения в институте совмещал учебу на дневном отделении с работой в литейном цехе завода «Станколит» формовщиком, «земледелом», заливщиком. Окончил институт в 1938 г. В 1939 г. поступил в аспирантуру при кафедре литейного производства, научным



руководителем был утвержден академик Бардин И.П. В 1940 г. начал совмещать учебу в аспирантуре с научной работой на кафедре в качестве научного сотрудника.

В годы Великой Отечественной войны находился в блокадном Ленинграде; вместе с сотрудниками кафедры отливал корпуса гранат и мин для Ленинградского фронта. С открытием дороги жизни был эвакуирован на Урал, где работал в литейном цехе Магнитогорского металлургического завода технологом участка стального литья. При его участии под руководством доктора технических наук профессора Нехендзи Ю.А. была разработана и внедрена технология литья цельнолитой башни танка Т-34 вместо лито-сварного варианта, что позволило резко сократить трудоемкость изготовления этой детали и повысить ее качество.

В 1943 г. Федор Дмитриевич защитил кандидатскую диссертацию в Уральском политехническом институте.

В 1946 г. Ф.Д. Оболенцев возвратился в Ленинград на кафедру литейного производства в должности старшего научного сотрудника, работал вместе с такими корифеями литейного производства, как профессора В.А. Андреев, Ю.А. Нехендзи, Н.Г. Гиршович, П.П. Берг. В 1947 г. был избран доцентом кафедры и утвержден в этом звании.

В 50-е гг. прошлого столетия он привлек внимание исследователей постановкой новой тогда проблемы устранения вредного воздействия водорода на металл отливки. Работа над решением этой проблемы вылилась в новое научное направление.

В 1971 г. Ф.Д. Оболенцев защитил докторскую диссертацию. В том же году он возглавил кафедру литейного производства Одесского политехнического института, где проработал до 1985 г. В 1972 г. ему было присвоено ученое звание профессора. За годы работы в Одессе он создал настоящую научную школу по решению проблемы повышения точности и эксплуатационной надежности литых деталей. Итогом научной и науч-

но-педагогической деятельности явилась подготовка свыше 600 инженеров-литейщиков, более 20 кандидатов наук, 3 докторов наук. В периодической печати опубликовано 240 его печатных работ, среди них: «Качество литых поверхностей» (1961 г.); «Физико-химия и технология композиционного литья» (1984 г.); «Специальные способы литья: Справочник» (1991 г.).

На счету профессора Оболенцева 35 авторских свидетельств.

Много времени и внимания Ф.Д. Оболенцев уделял общественной работе в качестве председателя редакционно-издательского совета института, заместителя Председателя Одесского областного правления НТО «Машпром», председателя проблемной комиссии секции «Процессы литья» АН УССР. Говоря о Ф.Д. Оболенцеве нельзя не сказать о нем, как о преподавателе, наставнике молодежи, потому что этой работе он придавал первостепенное значение. Он был отличным лектором, а это важная предпосылка к завоеванию авторитета у студенческой аудитории. Наконец, личные качества – высокая культура, активная жизненная позиция, неутомимость – находили достойный отклик у студентов и сотрудников кафедры.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	9
Глава 1	
КОМПОЗИЦИОННОЕ ЛИТЬЕ	10
1.1. Композиционные отливки и области их применения	11
1.2. Физико-химические процессы в контактной зоне геометрических элементов композиционных отливок	14
1.2.1. Механические связи и их влияние на контактные процессы при формировании композиционных отливок	14
1.2.2. Формирование адгезионных связей между элементами композиционных отливок	16
1.2.3. Влияние диффузионных процессов на формирование связей между элементами композиционных отливок	18
1.3. Технология получения отливок с композиционным поверхностным слоем	25
1.3.1. Поверхностное легирование в литейных формах	25
1.3.2. Поверхностный слой, получаемый при применении пористых металлокерамических оболочек	27
1.3.3. Поверхностное армирование отливок твердыми оболочками	29
1.4. Технология получения объемноармированных отливок	31
1.4.1. Методы объемного армирования и их особенности	31
1.4.2. Влияние объемного армирования на механические и физические свойства отливок	33
1.4.3. Методы изготовления и свойства арматуры из неметаллов и металлов	35
1.4.4. Технология заливки объемноармированных отливок	37
1.5. Композиционное литье – экономичный метод формообразования деталей	38
1.5.1. Композиционное литье – средство повышения надежности	40
1.5.2. Композиционное литье – средство повышения технологичности	43
1.6. Примеры изготовления композиционных отливок	45
1.6.1. Композиционные отливки вставок пресс-форм литья под давлением	45
1.6.2. Композиционные износостойкие отливки, упрочненные металлокерамическими и литыми оболочками	48
1.6.3. Отливки из чугуна, армированные стальной проволокой и композиционными оболочками	51
1.6.4. Композиционные отливки с гальванопластическими и литыми элементами	53
1.6.5. Изготовление литых композиционных шарошек	56

1.6.6. Получение композиционных отливок с качественной поверхностью при использовании металлокерамических оболочек	60
1.6.6.1. Изготовление металлокерамических оболочек из горячих суспензий	60
1.6.6.2. Исследование процесса пропитки металлокерамических оболочек жидким чугуном	62
1.6.7. Пути повышения стойкости оснастки литья под давлением	65
1.6.8. Технология получения вставок пресс-форм с целью повышения стойкости	66
1.6.9. Износостойкие композиционные отливки, работающие в абразивных средах при высоких температурах	66
1.6.10. Снижение износа деталей при получении их методом композиционного литья	67
1.6.11. Изготовление гальванопластических оболочковых стержней для тонкополостных отливок	67
1.6.12. Формирование поверхностей раздела в композиционных отливках	71
1.6.13. Кинетика пропитки пористых металлокерамических оболочек	72
1.6.14. Композиционные методы получения тонкополостных отливок	74
1.6.15. Диффузионные процессы – основа формирования композиционных отливок	75
1.6.16. Применение высокопрочного чугуна для вставок пресс-форм литья под давлением	77
1.6.17. Эксплуатационная надежность и ресурсосбережение при применении композиционных отливок и специальных неметаллических форм	78
Глава 2	
ПОЛУЧЕНИЕ ОТЛИВОК В КЕРАМИЗИРОВАННЫХ ФОРМАХ ПО ПОСТОЯННЫМ МОДЕЛЯМ	80
2.1. ШОУ-процесс и КОМПОЗАЙТ ШОУ-процесс	80
2.2. Практическое использование технологии	86
2.2.1. Изготовление точнолитых вставок пресс-форм для литья под давлением цветных сплавов	86
2.2.2. Точнолитая оснастка и эффективность ее применения	88
2.2.3. Керамизированные формы для точного литья стеклоформирующей оснастки	89
2.2.4. Формирование отливок с тонкорельефной поверхностью повышенного качества	93
2.2.5. Диски триера, отливаемые в керамизированные формы	103
2.2.6. Формирование тонкорельефной поверхности отливок в керамизированных формах, получаемых по эталону	107
2.2.7. Особенности технологии изготовления точнолитых пресс-форм	113

2.2.8. Точнолитые рельефные пресс-формы.....	114
2.2.9. Использование кварцевой керамики для уменьшения шероховатости поверхности отливок.....	115
2.2.10. Физико-химические процессы на поверхности отливок при литье в керамизированные формы	115
2.2.11. Окисление поверхности стальных отливок при литье в керамизированные формы	117
2.2.12. Развитие методов керамизации литейной формы	121
Глава 3	
ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИКИ ТВЕРДОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ ОТЛИВОК.....	125
3.1. ГПСМО-процесс и его применение для изготовления фасонных отливок	125
3.1.1. Приготовление пасты	127
3.1.2. Изготовление форм	129
3.1.3. Тепловая обработка форм	132
3.2. Развитие теории и практики использования керамики твердофазного спекания	135
3.2.1. Легкоудаляемые стержни для тонкополостных отливок	135
3.2.2. Технология получения точных отливок.....	141
3.2.3. Геометрическая точность отливок при использовании солекерамики	142
3.2.4. Моделирование температурных полей отливок.....	145
3.2.5. Литье рабочих колес центробежных насосов с проточными полостями без механической обработки.....	146
3.2.6. Солькерамические стержни для отливок из алюминиевых сплавов	152
3.2.7. Теплофизическая защита стержней для получения тонкополостных отливок	155
3.2.8. Физико-механические свойства солекерамики	159
3.2.9. Особенности технологии изготовления солекерамических стержней.....	164
3.2.10. О применении легкоудаляемых стержней для тонкополостных отливок	170
Глава 4	
ПОЛУЧЕНИЕ ТОЧНЫХ ОТЛИВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗОВЫХ ПЕСЧАНЫХ ФОРМ	173
4.1. Управление качеством отливок в песчано-смоляных формах	173
4.2. Оптимизация технологических процессов получения отливок из железоуглеродистых сплавов путем синхронизирующего управления теплообменом в литейной форме	180
4.3. Получение отливок с качественной поверхностью при литье черных металлов в формы на терморезистивных связующих.....	204
4.4. Устранение газоусадочной пористости в отливках из широкоинтервальных сплавов	211

4.5. Кристаллизация отливок с использованием внешних факторов	216
4.6. Экзогенные включения в отливках.....	217
4.7. Применение керамических перегородок с обогревом для легкоотделяемых прибылей	218
4.8. Повышение качества проектирования специальных способов литья	220
4.9. Кинетика химических реакций при выплавке легированных сталей для пресс-форм ЛПД.....	230
4.10. Безотходная технология литья пресс-форм ЛПД в комбинированные формы.....	234
4.11. Исследование методов и сплавов, используемых для изготовления вставок пресс-форм ЛПД	235
4.12. Зубопротезные отливки высокого качества поверхности и размерной точности	239
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	246
Приложение А ПОЛУЧЕНИЕ ОТЛИВОК С ТОНКОРЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	253
Приложение Б СОЛЕКЕРАМИКА ТВЕРДОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ ЛИТЬЯ ТОНКОПОЛОСТНЫХ ОТЛИВОК.....	263

ПРЕДИСЛОВИЕ

Представленная на ваше рассмотрение работа носит весьма специализированный характер. Эта книга посвящена многолетним исследованиям ученых кафедры «Литейного производства» Одесского национального политехнического университета и обобщает 40-летний опыт научной деятельности в области управления формообразованием отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов.

В основу монографии положены идеи и выводы многочисленных учеников (студентов, аспирантов и докторантов), работавших под руководством доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой «Литейного производства» Одесского политехнического института (1971 – 1985 гг.) *Федора Дмитриевича Оболенцева*.

Представленный материал сосредоточен на важнейших вопросах литейного производства. Рассмотрены особенности композиционного литья – метода формообразования, который имеет большие потенциальные возможности по уменьшению отходов металла, материалоемкости машин, трудовых затрат.

Подробно изложены вопросы получения отливок в керамизированных формах по постоянным моделям. Представлены пути совершенствования ШОУ-процесса.

Большой раздел посвящен применению твердофазного спекания для получения отливок повышенной геометрической точности, а так же получению точных отливок с использованием разовых песчаных форм.

Следует отметить, что все материалы, приведенные в этой книге, носят не только научный, но и практический характер. По всем рассмотренным вопросам защищены кандидатские и докторские диссертации.

По мнению авторов-составителей, представленная работа будет интересна широкому кругу любознательных, пытливых читателей.

Авторы-составители выражают глубокую признательность и уважение ученым, опыт и знания которых мы использовали в своей работе.

Ясюков В.В., Лисенко Т.В., Прокопович И.В.

Глава 1

КОМПОЗИЦИОННОЕ ЛИТЬЕ

Композиционное литье – метод формообразования, который имеет большие потенциальные возможности по уменьшению отходов металла, материалоемкости машин, трудовых затрат. Это предопределяется тем, что при композиционном литье синтезируются отдельные элементы детали, которые могут быть выполнены наиболее эффективными методами формообразования для данного элемента, а также из оптимальных материалов в зависимости от предъявляемых требований к деталям. Такие элементы, установленные в литейную форму, после заливки основным (матричным) металлом объединяются в единое целое – композиционную отливку.

Композиционное литье по своей природе гетерогенно, что позволяет получать сумму служебных свойств нового качества, недоступного для отдельных элементов, составляющих композицию. Такие отливки могут быть получены как с поверхностным композиционным слоем, обладающим заданными служебными свойствами, так и путем воздействия на весь объем отливки, что позволяет заметно увеличить комплекс характеристик механических свойств.

Большое технологическое значение имеет процесс объединения отдельных элементов в единое целое расплавом, который после затвердевания является связкой этих элементов. Такой процесс известен как литейная сварка с разными приемами ее осуществления, которая в настоящее время незаслуженно применяется сравнительно мало при свободной заливке деталей. Однако этот процесс широко используется при изготовлении отливок литьем под давлением. При этом методе происходит узловая сборка литьем элементов различной конфигурации из разных металлов, выполняемых разнообразными способами с получением композиционной отливки, которую изготовить одним методом невозможно.

Термин «композиционные отливки» достаточно активно внедряется в практику литейного производства лишь в последние годы. Хотя, по существу, по этому методу отливки изготавливают давно под названием «армированные», «биметаллические», «поверхностно легированные»

Композиционное литье позволяет получать конфигурации, полости, толщины стенок, недоступные отдельным видам формообразования. Это открывает широкие возможности для конструкторов. Качество композиционного литья во многом зависит от получения однородной и управляемой по геометрическим параметрам контактной зоны двух элементов детали, где протекают сложные физико-химические процессы, часто при нестационарном тепловом режиме.

Разница между композиционным литьем и композиционными материалами прежде всего в том, что при композиционном литье обязательным матричным металлом явля-

ется жидкий металл, объединяющий после своего затвердевания элементы композиции. При изготовлении же композиционных материалов жидкая матрица почти не используется, а если и используется, то не для фасонных изделий. Кроме того, композиционное литье преследует технологическую цель – изготовление заготовки с конечной конфигурацией, в то время как композиционные материалы могут быть в виде простых плит, из которых механическими методами изготавливают фасонные детали. Это различие аналогично тому, которое существует, например, между производством стальных слитков и фасонных стальных отливок или между производством чушкового чугуна в доменных цехах и фасонным чугунолитейным производством.

1.1. Композиционные отливки и области их применения

Латинское слово «композиция» соответствует русскому «составление». Термин «композиция» правомерен для различных областей знаний (скульптура, музыка, литература, техника), но только в том случае, если объект (композиция) состоит из отдельных частей, которые сохраняют индивидуальность, но благодаря органической связи друг с другом формируют совместно новое качество, которого лишены отдельно взятые части (элементы, детали).

Опыт изготовления композиционных изделий существует с глубокой древности. При производстве украшений, посуды, оружия использовали сочетания благородных и неблагородных металлов, драгоценных камней и металлов, бронзы и железа и др.

При композиционном литье обычно сочетают разные металлы при условии, когда один из них в твердом состоянии, а второй – в жидком. Композиционные отливки под названием «биметаллические», «армированные» широко используют в машиностроении.

Композиционные биметаллические отливки получили применение при изготовлении подшипников скольжения и различных втулок. Известен метод изготовления подшипников с постоянной основой (несущей частью) из стали или чугуна, внутрь которой устанавливается стержень. При этом между стержнем и основой создается зазор, в который заливаются легкоплавкие антифрикционные сплавы, например, баббиты типа Pb-Sb, Sn-Sb, Pb-Sn-Sb, а также цинковые и алюминиевые. Для осуществления связи между стальной основой и заливаемым баббитом создается промежуточный слой из олова.

Биметаллические композиционные отливки могут быть изготовлены центробежным способом. При этом применяют сочетание сталь-бронза, чугун-бронза. Биметаллическое литье изготавливают и без применения центробежной силы. При использовании этого вида литья возможно:

1. Создать местное упрочнение и повышенную износостойкость;
2. Предохранить от хрупкого разрушения, особенно материалов карбидного класса и термосилидов;
3. Предохранить от коррозии;
4. Создать экономию дефицитных материалов;
5. Повысить технологичность изготовления отливок;
6. Получить новые свойства отливок.

Композиционное литье актуально для решения первого вопроса. Сплавы, например, алюминиевые и магниевые, при их достоинствах, имеют сравнительно малую твердость. Контакт их с более твердыми металлами приводит к износу или смятию. Целесообразно, сохраняя изделия из алюминия, создавать местное упрочнение, что возможно сделать за счет, например, стальных или чугунных вставок. Примером может служить поршень, изготовленный из алюминиевого сплава, где канавки для поршневых

колец выполняются из легированной стали или чугуна. Для получения такого композиционного поршня вставка закладывается в песчаную форму, а затем ее заливают алюминиевым сплавом. При быстром охлаждении алюминия возле вставки соединение ее с алюминием не происходит. Поэтому вставку предварительно прогревают в расплавленном алюминии, устанавливают в форму и заливают с перепуском. При этом создается промежуточный слой, а разогрев обеспечивает связь.

Решение второго вопроса – предохранение от хрупкого разрушения – важно, например, для серых чугунов, которые, обладая хорошими литейными свойствами, одновременно обладают хрупкостью. Такими деталями являются чугунные тормозные вагонные колодки. При их хрупком разрушении куски могут попасть в другие узлы агрегата. Опасность такого попадания требует вставлять в колодку стальную армирующую пластину. Подобное армирование необходимо, например, для чугунных корпусов электромоторов, работающих в шахтах, где при попадании газов на искрящие щетки может произойти взрыв всего корпуса и соответствующее поражение осколками. Армирование предохраняет от осколочности.

Решение третьего вопроса можно показать на примере композиционной отливки – клапане двигателя внутреннего сгорания, где стальной шток предохраняет от хрупкого разрушения, а чугунная головка – от коррозии.

Решение четвертого вопроса – экономия дефицитных материалов – может быть проиллюстрировано примером использования армированного режущего инструмента. При этом возможно изготовление изделия из нескольких металлов. Например, фреза изготовлена из трех металлов: ножи – из литой инструментальной стали; корпус – из силумина (матричный металл), а втулка – из углеродистой стали.

Повышение технологичности при использовании композиционных отливок можно проиллюстрировать примерами:

- Цилиндр двигателя внутреннего сгорания с ребрами воздушного охлаждения, который трудно отлить из серого чугуна перлитного класса. Такой чугун обладает надлежащей износостойкостью, что необходимо для цилиндра, но недостаточной жидкотекучестью для получения ребер. Поэтому ребристую часть можно отлить отдельно из фосфористого чугуна, а затем эту ребристую часть использовать как арматуру при отливке цилиндра из чугуна перлитного класса;

- Чугунные плиты-холодильники для доменных печей. Внутри этих плит имеются каналы диаметром 40...50 мм, по которым циркулирует вода. Получение таких каналов при помощи стержней затруднено из-за сложности изготовления габаритных стержней малой толщины, а также вследствие сложности удаления таких стержней. Использование же стальных труб, которые после заливки остаются в холодильниках, заметно облегчает решение задачи. Такие композиционные плиты-холодильники более технологичны, а эксплуатация их более надежна в сравнении с плитами, каналы которых получают по стержням.

Получение в толстостенных отливках отверстий с чистой поверхностью вызывает трудности. Потому в ряде случаев отверстия не отливают, а выполняют механическими методами. Применение фасонной арматуры, оформляющей отверстие позволяет решить эту задачу. Фасонная арматура может быть штампованной из листа с применением, при необходимости, сварки.

Решение шестого вопроса можно показать на примерах:

- сочетание стальной трубы из котельной стали, по которой циркулирует пар под давлением 1,2 МПа с ребристой чугунной облицовкой, работающей при повышенных температурах в коррозионной среде, обеспечивает более высокую надежность по герметичности и хорошую коррозионную стойкость;

– армирование нижней части изложниц стальными бандажами приводит к значительному увеличению их стойкости;

– композиционные двухслойные кокили имеют стойкость в 8...10 раз больше, чем обычные чугунные.

Композиционным методом могут быть изготовлены турбинки для турбобуров, которые отливают по выплавляемым моделям в количестве нескольких миллионов штук в год. При композиционном методе литья турбинок турбобура лопасти могут быть изготовлены отдельно прокатом или непрерывным литьем. Готовые лопасти устанавливаются в форму и заливаются жидким металлом. Такой метод изготовления турбинок значительно производительней, чем литье их по выплавляемым моделям.

Стальная арматура увеличивает прочность чугунных отливок. При расходе арматуры всего 3...5 % от массы отливок статическая и динамическая прочность их увеличивается в 1,5...2 раза. Следует отметить, что упрочнение чугунных отливок за счет армирования применялось еще в 1725 г.; так на демидовском заводе (г. Невьянск), была изготовлена чугунная сторожевая будка, армированная стальными прутками. Имеются примеры сочетания углеродистой и легированной стали для армирования литого корпуса задвижки. При этом на стержень, перед его установкой в форму, надевается уплотняющее кольцо из стали 10X13, а деталь заливается сталью 25Л при температуре 1550...1580 °С. Такой корпус работает под газовым давлением 2,5 МПа при температуре 450 °С. Поэтому надежный контакт между армирующим кольцом и отливкой обязателен. На участках поверхности кольца загрязненных ржавчиной или маслом надежный контакт отсутствует, поэтому очистке поверхности и созданию защиты от окисления придается первостепенное значение. При армировании отливок удачно решаются требования одновременной жаростойкости и жаропрочности. Например, для подвесок трубчатых печей для нефтепереработки, цепей для цементных печей, матрица может быть выполнена из хромистых материалов, обеспечивающих жаростойкость, а арматура – на базе никелевых материалов, обеспечивающих жаропрочность.

Для деталей, работающих при высоких температурах, может быть использована композиция «металл – неметаллические материалы». Например, каналы из чугуна в устройствах для литья под давлением быстро изнашиваются. Если рабочая поверхность канала изготовлена из керамики $ZrO_2 \cdot SiO_2$, стойкость его резко увеличивается.

Сочетание керамики с металлом важно, например, для двигателей в местах дожигания газов. Полости этих деталей облицовывают теплоизолирующими вставками. При этом керамические вставки не растрескиваются из-за низкого коэффициента расширения. Материалом для таких вставок могут служить оксид алюминия, карбид кремния, плавный корунд.

Для изготовления теплообменников из меди для гарнисажной плавки титана, где требуется интенсивный теплообмен, можно использовать композицию «никель – медь». Никелевые трубки позволяют пропускать охлаждающую среду под давлением 3,2 МПа, а медь обладает высокой теплопроводностью. Контактная связь «никель – медь» хорошая.

При литье под давлением армирование дает большой эффект, особенно для цветных металлов, а также при сочетании цветных металлов с черными.

Форма арматур при литье под давлением, а также материал разнообразны. Арматуры делают в виде вкладышей, штифтов, втулок, гаек с резьбой, подшипников, трубок криволинейных и прямолинейных. Такая арматура может быть из разных металлических сплавов и неметаллов. Сама арматура может быть получена механической обработкой, пластической деформацией, литьем под давлением, по выплавляемым моделям, порошковой металлургией.

Узловая сборка литьем (УСЛ) представляет особый интерес, так как она в ряде случаев выгоднее, чем сварка, а также выгоднее, чем запрессовка или механические связи. Следует отметить, что УСЛ главным образом используют при литье под давлением цветных сплавов. УСЛ также возможно применять при литье в песчаные формы при свободной или центробежной заливке, при литье по выплавляемым моделям. Контакт арматуры с выплавляемой моделью и разогрев арматуры при прокаливании форм не приводит к ее заметному изменению, если прокалывание форм ведут в защитных средах. При применении кокилей для изготовления армированных отливок или для узловой сборки литьем наблюдается ухудшение контактной связи, что обусловлено быстрым охлаждением контактной зоны. Поэтому кокили требуют подогрева.

Одним из препятствий использования армированного литья в массовом производстве является отсутствие механизации установки арматуры. Однако в настоящее время разрабатываются предложения по механизации армирования.

В последнее время пополнились знания по свойствам композиционных отливок. Так, например, проведены исследования по теплообмену между арматурой и матричным металлом. Изучено влияние связей арматуры с матричным металлом на электрическое сопротивление, что важно для электромашиностроения.

Из изложенного материала, по применению композиционных отливок, следует:

- внедрение композиционных отливок является одним из наиболее прогрессивных направлений литейного производства;
- композиционные отливки приобретают совокупность свойств, способных улучшать эксплуатационные характеристики изделий при одновременном снижении трудоемкости их изготовления;
- использование композиционных отливок во многих случаях позволяет экономить цветные и высоколегированные сплавы.

При заливке под давлением и при свободной заливке имеются широкие возможности получения сложных композиционных отливок применением узловой сборки литьем. Решение проблемы композиционного литья возможно только на базе углубленного знания контактных процессов, происходящих при формировании композиционных отливок.

1.2. Физико-химические процессы в контактной зоне геометрических элементов композиционных отливок

1.2.1. Механические связи и их влияние на контактные процессы при формировании композиционных отливок

Решающими для композиционных отливок являются контактные процессы, осуществляющие связь между элементами. Связи могут быть разделены на: механические, адгезионные, диффузионные. При формировании таких связей часто происходят комплексные взаимодействия. Например, механические связи осуществляются за счет давления, которое может способствовать диффузионным процессам. Диффузионные связи между элементами могут оказывать влияние на величину напряжений, которые, в свою очередь, в определенных условиях влияют на механические связи.

Под влиянием усадки жидкого металла в месте контакта с арматурой создается нормальное давление, которое обеспечивает механические связи. Нормальное давление на твердую часть композиционной отливки при ее затвердевании может быть определено по формуле:

$$P_N = \frac{\frac{\delta}{d_K}}{\frac{1}{E_1} \left(\frac{1+K_1^2}{1-K_1^2} \right) \cdot \mu_1 + \frac{1}{E_2} \left(\frac{1+K_2^2}{1-K_2^2} \right) \cdot \mu_2}, \quad (1.1)$$

где δ – величина натяга, определяемого усадкой металла;

d_K – размер твердого элемента, охватываемого затвердевающим металлом;

$K_1 = \frac{d_K}{d_1}$, $K_2 = \frac{d_K}{d_2}$ – коэффициенты толстостенности пустотелой арматуры (трубки)

и охватывающей ее отливки;

E_1, E_2 – модули упругости материала отливки и арматуры;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона.

Так как для разъединения элементов нужно преодолеть силу трения между арматурой и отливкой, а коэффициент трения может быть создан за счет различных насечек любой величины, то сила трения может быть больше, чем прочность арматуры и отливки.

Тем не менее, механические связи не всегда являются достаточно удовлетворительным средством, так как даже при большом давлении остается граница раздела, а в зависимости от условий затвердевания между арматурой и отливкой может образоваться зазор. Например, при резьбовом соединении такой зазор может быть вследствие незаполнения впадин расплавом (рис. 1.1, *а*). В других случаях, даже при ламинарном течении расплава, но при несмачивании металлом поверхности поток имеет вид накатывающейся волны, и в этом случае тоже образуется зазор (рис. 1.1, *б*) между арматурой и отливкой. В этих зазорах могут быть газовые прослойки, препятствующие формированию, например, диффузионной связи. При таких зазорах могут ухудшаться эксплуатационные свойства отливок вследствие недопустимых вибраций; при наличии зазоров между армирующими трубками и стенкой в холодильниках ухудшается теплоотдача. Для ряда композиций зазор недопустим, так как ухудшается электропроводность, теплопроводность. Механические связи достаточны, если к ним предъявляются требования только прочностных характеристик или если арматура предохраняет от хрупкого разрушения. В том же случае, если от арматуры ожидают повышения других свойств, то только механических связей недостаточно. Поэтому характер связей должен быть выбран в зависимости от предъявляемых к деталям требований.

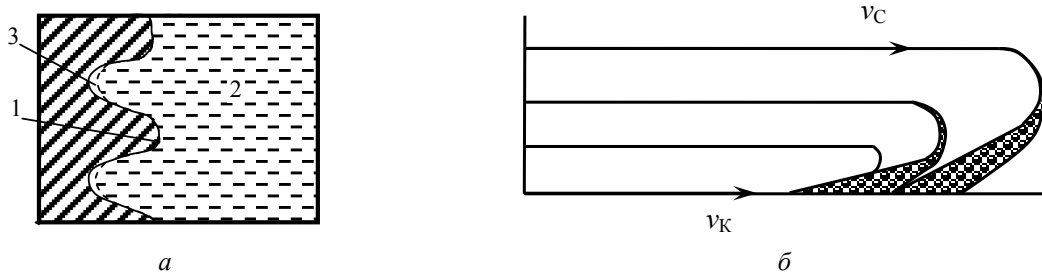


Рис. 1.1. Схема формирования зазора между арматурой и жидким металлом (*а*) при ламинарном течении металла (*б*): 1 – профиль резьбы; 2 – расплав; 3 – зазор; v_k – вектор скорости у контактной поверхности; v_c – вектор скорости в середине потока

Чисто механическая связь может быть, если арматура и матрица не взаимодействуют. Обычно же между арматурой и матрицей происходят те или иные физико-химические процессы, а, следовательно, имеется взаимодействие, и могут создаваться остаточные напряжения. Остаточные напряжения в композициях имеют двойное про-

исхождение: механические напряжения вследствие различной пластичности материалов и термические напряжения вследствие различия коэффициентов термического сжатия арматуры и матрицы. Если коэффициенты термического расширения арматуры и матрицы близки, то термических напряжений не создается. Например, в композициях на основе титана и его сплавов, армированных волокнами бора, карбида кремния, двуокиси алюминия, термические напряжения практически не возникают, так как коэффициенты линейного расширения титана и волокон из указанных материалов близки. Для уменьшения термических напряжений при армировании чугуна, следует для арматуры выбирать сталь, содержащую 6 % хрома, которая имеет одинаковый коэффициент термического расширения с чугуном. Если арматура и матрица обладают различными модулями упругости и различной пластичностью, то в системе также создаются напряжения. При осевом растяжении в системе создаются объемные напряжения из-за механического взаимодействия арматуры с матрицей. При этом арматура, вытягиваясь, уменьшает свое поперечное сечение и, если она связана с матрицей, которая препятствует уменьшению поперечного сечения, то в системе создаются перпендикулярные арматуре растягивающие напряжения.

При осевом растяжении композиционных материалов, вследствие различной сжимаемости арматуры и матрицы в соответствии с коэффициентами Пуассона, на поверхности раздела возникают поперечные напряжения. Радиальная компонента этих напряжений зависит от объемной доли арматуры, разницы коэффициентов Пуассона, модулей упругости компонентов.

Радиальные, тангенциальные и осевые напряжения в матрице на границе раздела с арматурой могут быть подсчитаны по имеющимся в литературе формулам. Из анализа этих формул следует, что величина напряжений зависит от характеристики компонентов (коэффициентов линейного расширения, градиентов температуры, объемного содержания арматуры).

1.2.2. Формирование адгезионных связей между элементами композиционных отливок

На формирование связей между твердой поверхностью арматуры и затвердевающим расплавом заметную роль играют адгезионные силы. Известно, что при контакте двух притертых твердых поверхностей создается сцепление, так как поверхностные молекулы сближаются на расстояние, когда начинают действовать силы межмолекулярного притяжения – силы Ван-дер-Ваальса.

При контакте расплава с твердой поверхностью такое сближение может быть осуществлено, если расплав смачивает эту поверхность. Мерой смачивания является краевой угол смачивания, который определяется условиями равновесия (рис. 1.2) лежащей на подложке капли, на которую одновременно действуют межфазные натяжения:

- «расплав (жидкость) – газовая фаза ($\sigma_{ЖГ}$)»;
- «расплав (жидкость) – твердая поверхность ($\sigma_{ЖТ}$)»;
- «твердая поверхность – газовая фаза ($\sigma_{ТГ}$)».

Из равновесия следует, что $\sigma_{ТГ} = \sigma_{ЖТ} + \sigma_{ЖГ} \cos \theta$ или

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ЖТ}}{\sigma_{ЖГ}} \quad (1.2)$$

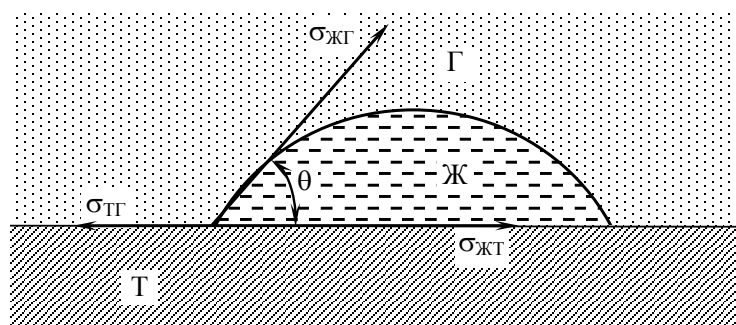


Рис. 1.2. Условия равновесия капли жидкости на твердой подложке

На межфазные натяжения можно влиять, а следовательно, влиять и на краевой угол смачивания. При этом, чем меньше краевой угол смачивания θ , тем больше адгезия расплава к твердой поверхности. Зависимость между поверхностным натяжением $\sigma_{ЖГ}$ и величиной адгезии W_A определяется уравнением Дюпре:

$$W_A = \sigma_{ЖГ} (1 + \cos \theta), \quad (1.3)$$

из которого следует, что работа адгезии жидкости к твердой поверхности зависит от величины поверхностного натяжения жидкости на границе с газом и от краевого угла смачивания твердого тела жидкостью. При условии, когда $\theta=0$ и $\cos\theta=1$, работа адгезии равна удвоенной величине поверхностного натяжения на границе с воздухом, т.е. $W_A = 2\sigma_{ЖГ}$. В тех случаях, когда смачивания не происходит, адгезия уменьшается, а при полном несмачивании $\theta=180^\circ$, $\cos\theta=-1$ и $W_A=0$. Контакта в этом случае между твердой поверхностью арматуры и расплавом происходить не будет.

Установлено, что работа адгезии зависит не только от сил Ван-дер-Ваальса, но и от химического взаимодействия, которое подтверждается прямыми наблюдениями. Реакция взаимодействия происходит по схеме



где Me' – металл оксида;

Me'' – смачивающий металл.

Если краевой угол смачивания на поверхности раздела «арматура – матрица» $\theta=90^\circ$, т.е. расплавленная матрица смачивает арматуру, то замечено хотя и незначительное, без образования каких-либо соединений, растворение арматуры и формирование связей. Это имеет место, например, при применении алюминиевых и никелевых матриц, армированных углеродными волокнами, что подтверждает значение химических процессов при смачивании.

Смачиванием можно управлять двумя путями:

а) изменением свойств смачиваемого твердого тела;

б) использованием адсорбционного эффекта – введением в смачивающий расплав межфазноактивных компонентов.

Из вышерассмотренного следует, что, управляя свойствами смачиваемого тела и используя межфазноактивные компоненты, можно достигнуть высоких адгезионных связей, что расширяет возможности композиционного литья, так как на арматуру могут быть нанесены промежуточные слои, которые улучшают связь арматуры с матричным металлом.

При получении композиционной отливки большое влияние на формирование адгезионных связей оказывают условия заполнения формы и охлаждения отливки.

Характер потока влияет на условия смачивания. При ламинарном потоке смачивание улучшается. Оказывает влияние на межфазное натяжение также состав литейной формы, от которого зависит состав газовой фазы. Влияние газовой фазы особенно велико, если она вступает с жидкостью во взаимодействие с образованием твердых оксидных пленок (Al_2O_3 , Cr_2O_3). Образование таких пленок зависит от состава металла. Например, даже при небольшом количестве в металле алюминия, вследствие избирательного окисления, на поверхности расплава образуется плотная пленка Al_2O_3 . Жидкий металл без оксидов (в условиях вакуума) не смачивает неметаллическую поверхность, но металл, покрытый оксидами типа FeO , MnO , хорошо смачивает поверхность из полуторных оксидов и кремнезема. Поэтому в зависимости от пары, вступающей в контакт и окружающей среды, краевой угол смачивания изменяется в широком диапазоне и, следовательно, адгезией можно управлять при изготовлении композиционных отливок.

Адгезионные связи при смачивании расплавом твердой поверхности могут быть сохранены при переходе расплава в твердое состояние в том случае, если усадка расплава будет способствовать сближению двух поверхностей. Если усадка не будет этому способствовать, то адгезионные силы при образовании зазора исчезнут.

1.2.3. Влияние диффузионных процессов на формирование связей между элементами композиционных отливок

Кроме механических и адгезионных связей, важную роль играют диффузионные связи. Диффузионное насыщение твердого металла можно производить средой, находящейся в твердом, жидком или газообразном состояниях. Первый случай возможен только при очень хорошем контакте поверхностей, достигаемом при их спрессовывании под высоким давлением. При изготовлении композиционных отливок обычно одна из контактирующих поверхностей находится в жидком состоянии. Газообразное состояние среды используют при химико-термической обработке, применительно к которой диффузионные процессы в металлах изучены наиболее подробно. Полученные общие закономерности при этом могут быть распространены с теми или иными уточнениями и на практику получения композиционных отливок.

Если твердый элемент – деталь окружена газовой фазой, содержащей диффундируемый элемент, то переход этого элемента в металл происходит в три этапа:

1. Диссоциация газа с образованием активных атомов диффундирующего элемента. Например,



Образовавшиеся атомы углерода или азота растворяются в металле, и чем больше степень диссоциации, тем активнее газ;

2. Адсорбция диффундирующего элемента;

3. Диффузия элемента. При этом образуется диффузионный направленный слой. Если элемент дает твердые растворы, то слой будет с постепенным (по параболической зависимости) уменьшением концентрации элемента от поверхности вглубь детали. Если же диффундируемый элемент «В» образует с металлом «А» систему сплавов с ограниченной растворимостью и химическими соединениями, то строение слоя будет определяться изотермическим разрезом диаграммы состояния этой системы при температуре диффузионного насыщения.

Различают два типа диффузионного перемещения атомов:

- самодиффузия – перемещение атомов собственной кристаллической решетки;
- гетеродиффузия – перемещение (растворение) инородных атомов в данной кристаллической решетке.

Гетеродиффузия (диффузия) происходит самопроизвольно из мест с высокой концентрацией элементов к местам с их малой концентрацией.

Самодиффузия связана с тепловым колебанием атомов под влиянием нагрева. При этом происходит флуктуация колебаний, и отдельные атомы приобретают энергию большую, чем средний уровень энергии атома. Эти атомы покидают равновесное положение в узлах, оставляя место незанятым. Атом, который расположен между узлами, называют дислоцированным атомом, а узел незанятый – вакансией. Равномерность расположения атомов нарушается, возникают упругие искажения кристаллической решетки.

В местах вакансий она сжата, а в местах дислоцированных атомов – расширена. В дырку (вакансию) может переместиться атом «А», а на место «А» переместится атом «В» и т.д. Для перехода атома «А» в дырку должна быть затрачена работа, которая называется энергией активации или теплотой разрыхления, и зависит она только от природы вещества. Повышение скорости диффузии с температурой обычно связывают с увеличением частоты колебаний и увеличением количества дырок. Количественно диффузия характеризуется коэффициентом диффузии ($\text{см}^2/\text{с}$). Зависимость коэффициента диффузии D от температуры выражается уравнением

$$D = A \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (1.6)$$

где A – коэффициент, зависящий от параметра кристаллической решетки и частоты колебания;

Q – энергия активации;

e – основание натурального логарифма;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Из приведенного уравнения видно, что коэффициент диффузии возрастает с температурой по закону экспоненты. В твердых растворах внедрения диффузия происходит легче в сравнении с твердыми растворами замещения, так как в последнем случае нужно вывести замещаемый атом из своего постоянного состояния. Поэтому энергия активации в этом случае больше. Например, для диффузии углерода в γ -железе (внедрение) энергия активации $Q=125,4$ кДж/г.атом, а при диффузии металлов в γ -железе (замещение) $Q=250,8$ кДж/г.атом. Коэффициенты диффузии при этом отличаются на несколько порядков. Например, коэффициент диффузии углерода в мягкой стали при 1100°C составляет $D=6 \cdot 10^{-7}$ $\text{см}^2/\text{с}$, а для молибдена при тех же условиях $D=6 \cdot 10^{-11}$ $\text{см}^2/\text{с}$. Анизотропность свойств металла проявляется и в диффузионном процессе. Границы зерен облегчают диффузию, так как они обычно имеют больше дефектов кристаллического строения. Если диффузия в зернах мала, то она может протекать по границам зерен.

При изготовлении композиционных отливок наиболее подробно изучены контактные процессы для систем, используемых в машиностроении, где важна большая удельная прочность, а также при изготовлении композиционных жаропрочных отливок, к таким системам можно отнести:

- а) при применении алюминия в качестве матрицы Al-B, Al-C, Al-Fe;
- б) при применении магния в качестве матрицы Mg-B, Mg-C;
- в) при применении титана в качестве матрицы Ti-B, Ti-SiC, Ti-Al₂O₃;
- г) при применении никеля в качестве матрицы Ni-W.

Для машиностроительных деталей общего назначения, где широко применяются железоуглеродистые сплавы, изучены:

- а) чугун (матрица) – сталь углеродистая (арматура);
- б) чугун (матрица) – сталь легированная (арматура).

Изучаются также пары:

- сталь (матрица) – карбиды вольфрама (арматура);
- ферросилид (матрица) – сталь (арматура);
- алюминий (матрица) – медь (арматура).

Диффузионные процессы зависят от контактных пар, которые можно разделить на три группы:

1. Материал арматуры нерастворим в матрице, и они не вступают в химическую реакцию друг с другом;
2. Матрица и арматура растворимы друг в друге, но продукты взаимодействия не образуются;
3. На поверхностях раздела образуются новые продукты взаимодействия.

В первой группе возможны только адгезионные или механические связи. Эта группа характерна для систем металл-полимер, металл-стекло.

Вторая группа характерна для широкого круга железоуглеродистых сплавов, где главное значение имеют диффузионные процессы углерода в железо.

Третья группа наиболее распространена, в этой группе происходит образование новых оксидных соединений (Al_2O_3 , Cr_2O_3 и др), карбидов, шпинелей. Формирование контактных зон происходит по сложным зависимостям, определяемым скоростями реакций и диффузионными процессами элементов.

Сформированная тем или иным путем связь между элементами композиционной отливки должна обладать определенной стабильностью в процессе эксплуатации. Стабильность граничной зоны может отличаться от стабильности однородного металла, так как в зависимости от условий эксплуатации на поверхности раздела элементов композиционной отливки могут протекать химические реакции, процессы сфероидизации, агломерирование, ускоренная коррозия. Изменение арматуры может происходить уже в процессе изготовления отливки. Например, при изготовлении жаропрочной композиции на основе никеля или ниобия, армированных вольфрамовой проволокой при пропитке в вакууме, замечено, что вольфрамовая арматура частично растворяется, уменьшая ее объемную долю в композиционном материале. При высокотемпературных испытаниях такой композиции вольфрам продолжает растворяться в твердой фазе, снижая объемную долю арматуры в отливке.

Совместимость матрицы и арматуры (волокон) зависит от кинетики процесса, которая различна для различного состояния матрицы и волокна. Кинетика процесса определяется процессами диффузии, скоростями химических реакций. Знание кинетики взаимодействия необходимо для определения условий получения композиционных отливок и прогнозирования их эксплуатации, особенно при термоциклических нагрузках. Рост зоны взаимодействия может происходить вначале между жидкой и твердой фазами, а затем между двумя твердыми. Рост этой зоны контролируется диффузионными процессами, которые являются наиболее медленными.

Легирующие элементы снижают константу скорости K . Поэтому, управляя составом сплава, можно изменять кинетику процесса взаимодействия. В этом процессе медь, германий понижают константу пропорционально их количеству; кремний и олово не влияют; ванадий, молибден, алюминий сначала понижают, а затем повышают эту константу.

При исследовании условий разрушения композиционных материалов установлено наличие материалов с прочными поверхностями раздела (когда поверхность раздела

прочней, чем матрица и армирующий материал). В этих случаях разрушение начинается либо с матрицы, либо с волокон. Если поверхности раздела слабые, то с них и начинается разрушение. При этом возможно четыре типа разрушения:

- а) разрушение под действием нормальных растягивающих напряжений;
- б) разрушение от касательных напряжений, возникающих при разрыве волокна и перераспределении напряжений через поверхности раздела;
- в) разрушение от растягивающих напряжений зоны продуктов взаимодействия;
- г) разрушение волокон в результате их разупрочнения из-за реакции взаимодействия.

При изготовлении волокон они, как правило, получают с теми или иными дефектами. Если прочность волокна σ_B , то в месте порока (концентратора напряжений)

$$\sigma_B = \frac{\varepsilon_B}{10K_B} \quad (1.7)$$

где ε_B – величина деформации разрушения волокна;

K_B – коэффициент концентрации напряжений, который равен

$$K_B = 1 + 2\sqrt{\frac{l}{r}} = 10 \dots 20, \quad (1.8)$$

где l – глубина дефекта,

r – радиус кривизны на конце микротрещины.

Значительный интерес представляет упрочнение алюминия и магния углеродными волокнами. Взаимная растворимость системы «Al – C» ничтожно мала, при этом образуется карбид алюминия Al_4C_3 . При изготовлении композиционных отливок методом пропитки углеродные волокна до 1100 °С алюминием не смачиваются, но тем не менее при этой температуре волокна растворяются и теряют прочность. Если пропитка производится с никелевыми и медными покрытиями, то они также растворяются, и волокна разупрочняются благодаря образованию карбидов (при контакте влаги с такими карбидами они разлагаются с образованием ацетилена). Для преодоления несмачивания используют литье под давлением, но механические свойства таких отливок нестабильны и достигают всего лишь 30...40 % от возможной прочности, определяемой по прочности волокон.

В зависимости от температуры расплава и давления изломы отливок могут быть трех типов:

1. С выдергиванием волокон из матрицы, что свидетельствует о недостаточной связи между ними. Прочность такой композиции составляет всего лишь 250...300 МПа;
2. Щеповидный, подобный излому древесины. Прочность таких композиций достигает 660...700 МПа, что составляет 70...80 % от расчетной прочности;
3. Хрупкий, прочность составляет 200...250 МПа. Прочность на границе раздела за счет образования карбида алюминия не может быть обеспечена, так как карбидная зона растет в виде пластин и игл, а не в виде равномерной пленки на периферии волокна.

Для композиции «Al – C» важной задачей является разработка покрытий с хорошей адгезией, как к волокну, так и к матрице и предохраняющих волокна от разупрочнения. Взаимодействие волокон углерода с твердым алюминием при 500 °С практически не происходит, но при 600 °С уже наблюдается разупрочнение, и количество карбидной фазы увеличивается.

В системе «магний – углеродное волокно» образуются карбиды Mg_2C_3 , MgC_2 , последний при 600 °С превращается в Mg_2C_3 с выделением графита. Оба карбида разлагаются водой. Mg_2C_3 с образованием этилена, а MgC_2 , – ацетилена. При пропитке под давлением изломы получают первого типа (с вытягиванием волокон) либо щеповид-

ные. Волокна, вытравленные из композиций, по прочности не отличаются от исходных. Прочность волокон при нагреве композиций до 300 °С на воздухе не изменяется, а при нагреве в вакууме не изменяется до 550 °С. Разупрочнение идет, но менее интенсивно, чем при контакте с алюминием. При контакте с металлом углерода без образования химических соединений (никель, кобальт) процесс разупрочнения при низких температурах происходит вследствие растворения волокон.

Для железоуглеродистых сплавов можно представить следующие варианты контактных процессов:

- а) чугун (расплав) – сталь (твердый элемент);
- б) чугун (расплав) – чугун (твердый элемент);
- в) сталь (расплав) – сталь (твердый элемент);
- г) сталь (расплав) – чугун (твердый элемент).

Случай (а) используется для получения армированных чугуновых отливок. Случай (б) и (в) в настоящее время почти не используются, но имеется перспектива их применения, так как иногда выгодно расчленять детали, изготавливать их отдельные части с заданными свойствами, а затем объединять все элементы в единое целое. Случай (г) может быть применен при необходимости производить детали с вязкой сердцевиной и с твердой высокоуглеродистой поверхностью.

Для исследования условий формирования переходной зоны «сталь – чугун» можно использовать методику, заключающуюся в том, что стальную заготовку, покрытую легкоплавким шлаком, разогревают в индукторе и опускают в расплавленный чугун заданного объема на 1 см² поверхности твердой заготовки.

Заготовка нагревается до температуры 600...1200 °С. Жидкий чугун нагревается до температуры 1200...1500 °С. Заготовку погружают в чугун, и в таком виде происходит затвердевание. Изменение толщины переходного слоя в зависимости от температуры заготовки металл-основа и температуры чугуна представлено на рис. 1.3. Установлено, что в области I связь отсутствует. В контакте остается пленка шлака. В области II шлак отделяется, контактная связь осуществляется частично. В области III происходит полное контактное соединение.

Переход углерода из чугуна в сталь можно представить в такой последовательности:

- насыщение поверхностных слоев стального твердого образца углеродом из жидкого чугуна;
- переход поверхностного слоя стального образца в жидкое состояние;
- диффузия углерода из жидкого поверхностного слоя стали вглубь стального образца.

Одновременно происходит взаимная диффузия других элементов (Si, Mn, Cr).

При изотермической выдержке этот процесс будет протекать до полного растворения стального образца в чугуне с получением усредненного состава в зависимости от масс чугуна и стального образца.

При затвердевании же чугуновой реальной отливки, например, доэвтектического состава, происходит выделение избыточной фазы аустенита, который кристаллизуется на аустенитной подложке

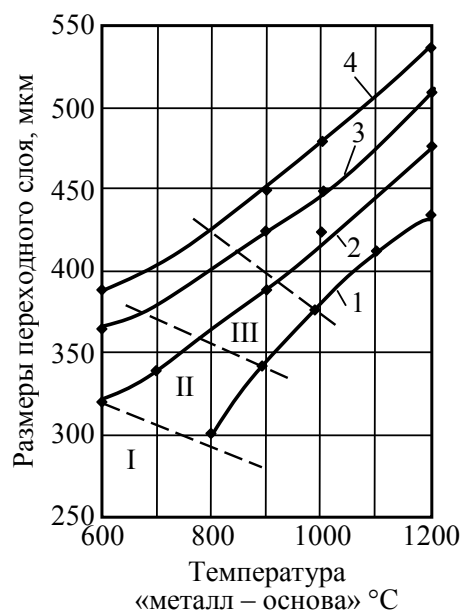


Рис. 1.3. Изменение толщины переходного слоя в зависимости от температуры заготовки «металл – основа» и температуры чугуна: 1200 (1); 1300 (2); 1400 (3); 1500 (4) °С

(стальная заготовка). При этом образуется первая зона стали, по составу соответствующая линии JE на диаграмме $Fe - C$.

Диффузия углерода вглубь стального образца приводит ко второй переходной зоне, которая соответствует заэвтектоидной стали. Вторая зона плавно переходит в третью зону, и структура соответствует эвтектоидной стали. Далее следует структура стального образца первоначального строения. Размеры зон зависят от содержания углерода в стальном образце. Так, например, для пары «армко-железо – серый чугун» размеры зон меньше, чем для пары «Сталь 45 – серый чугун». Распределение микротвердостей соответствует структурам от зоны I до зоны III (рис. 1.4). Диффузия других элементов, имеющих в чугуне, происходит только в I зоне, что связано с замедленной диффузией этих элементов в твердую сталь.

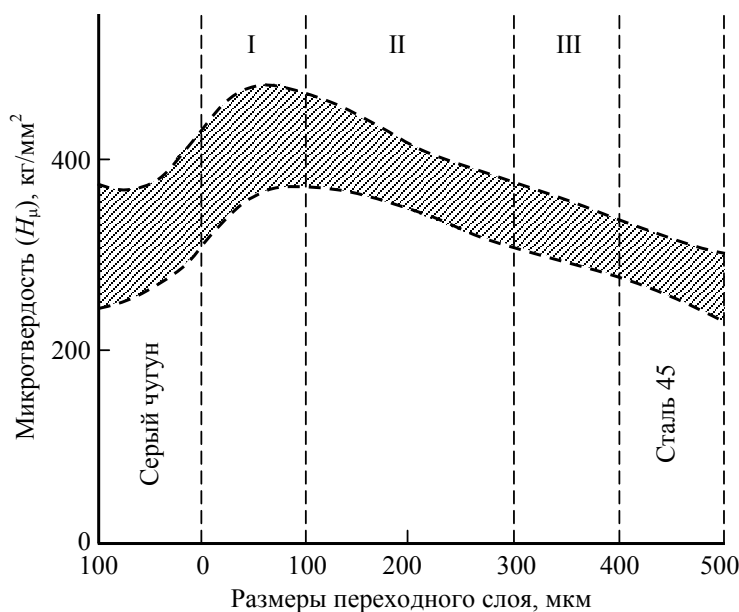


Рис. 1.4. Размеры переходного слоя композиционной отливки

На контактные процессы «чугун – сталь» оказывают влияние температурные параметры. В начальный момент, при контакте расплавленного чугуна с твердой поверхностью стали, устанавливается градиент температур, который тем меньше, чем выше температура заготовки. Через некоторое время градиент исчезает, и устанавливается контактная температура поверхности $T_{кп}$. Если $T_{кп}$ меньше температуры эвтектики $T_{эвт}$ контактная связь стали с чугуном полностью отсутствует. При $T_{кп} > T_{эвт}$ на 20...30 °С, обеспечивается хорошая контактная связь.

При более высокой температуре наблюдается растворение стали в чугуне.

Из этих исследований вытекает, что равновесная температура контактной поверхности может достаточно хорошо характеризовать полноту контактных процессов.

Для получения детали с контролируемыми размерами переходной зоны можно, задавшись допустимой степенью растворения стальной поверхности, определить необходимую контактную температуру. Диффузия углерода из чугуна в сталь при контакте твердой стальной поверхности с расплавом, кроме тепловых условий, зависит также от физико-химических процессов, которые определяются градиентами концентраций диффундируемых элементов, а также их активностью. При наличии в стали сильных карбидообразователей (Cr, V, W) диффузия углерода из чугуна облегчается. При наличии карбидообразующих элементов в чугуне наблюдается обратная диффузия углерода после затвердевания металла.

Чем больше карбидообразующих элементов, тем уже переходная зона и тем резче проявляются структурная и химическая неоднородность, определяющаяся градиентом химических потенциалов и активностью компонентов. Независимо от состава железоуглеродистых сплавов основным критерием полноты контактных процессов остается температура контактной поверхности и соотношение масс жидкого и твердого металла. Эти показатели определяют интенсивность теплового и физико-химического взаимодействия, что регламентирует процессы структурообразования в межфазной зоне. Максимальное значение контактной температуры находится в области «ликвидус – солидус», что проверено для железоуглеродистых сплавов с содержанием углерода 0,65...4,57 %. При этом достигается наилучшее диффузионное соединение.

На диффузионные процессы в контактной зоне твердый элемент-расплав оказывают влияние граничные барьеры. Такими барьерами могут быть со стороны расплава ламинарный подслои, корка затвердевшего металла, оксиды на поверхности, газовые включения водородного происхождения. Со стороны твердого элемента – слой оксидов, газовые пороки водородного происхождения, воздушная прослойка между твердым элементом и затвердевающим металлом.

Кроме диффузионных барьеров, на условия протекания диффузии оказывают влияние: форма углерода, находящегося в жидком растворе (ионы, частицы графита, молекулы карбида); разница концентраций активного углерода, находящегося в жидком растворе, и углерода, находящегося в твердом растворе, внедренного между атомами железа; время контакта расплава с твердой поверхностью; условия диффузии углерода в твердом металле, прогреваемом расплавами; наличие дефектов кристаллической решетки.

Диффузия элементов зависит от того, происходит ли процесс внедрения в решетку этих элементов (углерод, азот) или процесс замещения (хром, кремний и др. металлы). В первом случае диффузионные процессы проходят несравнимо быстрее. При этом углерод проникает в металл в момент его возникновения, например, из газовой фазы при диссоциации оксида углерода по реакции $2CO \rightarrow CO_2 + C$.

Наибольшей науглероживающей способностью обладают эвтектические составы, хотя при этом интервал затвердевания равен нулю. При дальнейшем увеличении содержания углерода уменьшается количество эвтектики и, следовательно, уменьшается науглероживающая способность. Кроме того, в заэвтектических составах выпадает цементит, диффузионная способность которого мала. Поэтому у заэвтектических составов ширина контактной зоны уменьшается.

Если необходимо соединить пару «сталь – сталь» с равным содержанием углерода, то, применив предварительно цементацию твердого стального образца, можно диффузионные процессы интенсифицировать. Можно также осуществить металлизацию твердого стального образца чугуном, который будет являться промежуточным слоем. При применении промежуточных слоев можно ускорять или затормаживать диффузионные процессы. Так, например, если осадить хром методом конденсации или электролитическим осаждением на твердую поверхность, то науглероживание такой поверхности происходит значительно интенсивнее. Наоборот, если твердый элемент покрыть никелем, то диффузия задерживается.

Из всего изложенного следует, что можно предложить комплекс мероприятий для управления переходной зоной между двумя железоуглеродистыми сплавами при изготовлении композиционных отливок, а именно: за счет перегрева чугуна созданием активных форм углерода и с последующей очисткой чугуна инертными газами и охлаждением его перед заполнением полости формы; за счет применения эвтектических чугунов, позволяющих создавать длительный контакт жидкой фазы с твердой стальной поверхностью; за счет устранения барьеров, применяя металл, лишенный водорода, устраняя ок-

сидные пленки, а также твердую корку и ламинарный подслои за счет ультразвука; созданием дефектов кристаллической решетки на поверхности твердого элемента.

1.3. Технология получения отливок с композиционным поверхностным слоем

1.3.1. Поверхностное легирование в литейных формах

Химико-термическая обработка машиностроительных деталей (цементация, азотирование, цианирование, диффузионная металлизация) применяется достаточно давно. Такую обработку деталей производят после их механической обработки. Для химико-термической обработки деталь помещают в среду, которая содержит большое количество того или иного элемента, диффундирующего в твердый металл. При диффузионной металлизации используют хром (хромирование); алюминий (алитирование); кремний (силицирование); бор (борирование) и т.д. Применяют комбинированные процессы: хромоалитирование, хромовольфрамирование и т.д. Химико-термическая обработка обычно значительно увеличивает твердость, но эта твердость распространяется на сравнительно малую глубину. Например, при нитрировании, хромировании, алитировании глубина слоя достигает 0,1...0,5 мм, а при цементации – от 1 до 2,5 мм. Металлизация может происходить в твердых, жидких и газообразных средах. При твердой диффузионной металлизации металлизатором является ферросплав, но к нему добавляют, например, хлористый аммоний (NH_4Cl). В результате образуются летучие AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4 . Эти соединения, контактируя с металлом, диссоциируют с образованием свободных атомов. Если деталь погрузить в расплавленный металл, то происходит жидкая металлизация, например, алюминием.

Газовая диффузионная металлизация производится в хлоридах различных металлов. Так как металлы образуют растворы внедрения, то процесс металлизации протекает очень медленно, и за одно и то же время при равных температурах эти процессы в сотни раз медленнее, чем цементация. Процесс диффузионной металлизации проходит при температурах 1000...1200 °С. Этот процесс сравнительно дорогой, и его используют для получения из железоуглеродистых сплавов жаростойких материалов. Очень высокой твердостью (до 2000 НВ) и высоким сопротивлением износу обладают борированные слои. Они образуют бориды FeB , Fe_2B , но борированные слои хрупкие.

Широкие возможности получения толстых металлизированных слоев из различных легирующих металлов открываются при изготовлении отливок. При этом уже в процессе заливки расплав вступает во взаимодействие с поверхностью формы, покрытой тем или иным ферросплавом в виде пасты. При этом жидкий расплав и поверхность формы вступают во взаимодействие, образуя на поверхности отливки композиционный слой.

По такому технологическому процессу изучалось поведение следующих феррорасплавов: низкоуглеродистого ферромolibдена, низкоуглеродистого и высокоуглеродистого феррохрома, низкоуглеродистого ферровольфрама, высокоуглеродистого ферромарганца, ферросициллия. Изучались также смеси из этих ферросплавов. В результате экспериментов, а также проведенных расчетов установлено, что легирующие элементы из обмазки в жидкую сталь диффузионным путем не поступают. Это доказывается расчетом. Используя уравнение Фика и вводя значения частных величин для данного процесса, установлена зависимость

$$\tau_m = \frac{h^2}{0,3D}, \quad (1.9)$$

где τ_m – время диффузии;

h – глубина слоя, на которую продиффундировал элемент для получения его концентрации 10 %;

D – коэффициент диффузии.

Механизм образования поверхностного легированного слоя следующий: паста под влиянием тепла стали расплавляется, на поверхности отливки в это время создается застывшая корка стали. Эта корка растворяется в расплавленной пасте из ферросплавов. Создается композиционный слой из смеси расплавленных ферросплавов и растворенной в нем корки металла. Такой слой удерживается на поверхности отливки.

В легированном слое наблюдается большое количество дефектов, что связано с перегревом расплавленной обмазки. Легированный слой имеет дендритный характер, свойственный литому металлу. Перегрев обмазки и длительное время контакта обмазки в жидком состоянии с жидкой сталью приводит к перемешиванию обмазки с жидким металлом, т.е. к переходу углерода и марганца в матричную сталь, а железа – в легированный слой. В результате этого получается толстый легированный слой.

Возможно применение смеси ферросплавов, что позволяет регулировать толщину легированного слоя. Легирование на вертикальных поверхностях затруднено, так как расплавленная обмазка стекает. Важно выбирать температуру плавления обмазки, чтобы она имела нулевую текучесть, т.е. температура должна лежать между ликвидусом и солидусом. Такая паста активно взаимодействует с основным металлом, но не будет растекаться. Если произойдет только спекание (агломерация), то образовавшаяся корочка отстанет, не соединившись с основным металлом.

При легировании ферромарганцем, феррохромом достигается значительное увеличение износостойкости различных деталей. Добавка к высокоуглеродистому хрому 4 % корунда повышает износостойкость в 15 раз. Тем не менее, несмотря на хорошую износостойкость смесей феррохрома с корундом, легирование этими смесями поверхности отливок не находит широкого применения. Это связано с затруднениями нанесения покрытий на поверхность форм, особенно, если последние имеют сложную конфигурацию.

Получение поверхностного легированного слоя может осуществляться методом пропитки слоя пасты матричным металлом. В этом случае слой пасты рассматривается как капиллярно-пористое тело. Исследования подтверждают большое влияние на глубину пропитки температуры подогрева пасты. В реальных формах внешним нагревом это осуществить трудно, но разогрев пасты за счет тепла перегрева металла возможен при относительном значении толщины пасты к толщине отливки 1:10. Прогрев при этом обеспечивается даже во время заливки чугуна до температуры 1150 °С, а стали до 1450 °С.

На пропитку оказывает влияние смачиваемость. При исследовании смачиваемости методом «падающей» капли установлено, что контактный угол для малоуглеродистого феррохрома, металлического хрома, оксида хрома составляет 130...135 °С. При выдержке капли угол смачивания уменьшается.

Поверхностное легирование требует знания тепловых режимов с тем, чтобы обеспечивалось оптимальное состояние легирующей пасты, что происходит при температуре нулевой текучести. Поэтому необходимо проводить подробные тепловые расчеты для различных условий, а именно для различных температур расплава, материалов пасты, толщины слоя пасты, толщины стенки отливки.

1.3.2. Поверхностный слой, получаемый при применении пористых металлокерамических оболочек

При поверхностном легировании ферросплавами частицы ферросплавов связывают органическими связующими или растворимым стеклом. Технологическим недостатком такого метода являются: трудности нанесения покрытия на сложные конфигурации поверхностей форм, наличие газотворной прослойки между стержнем и жидким металлом в виде достаточно толстого покрытия (после сушки покрытий в них остается много газотворных веществ, что часто приводит к образованию газовых пороков).

Для сложных конфигураций можно получать поверхностный композиционный слой при применении пористых металлокерамических оболочек (ПМКО). Получение композиционного слоя по этой технологии разделяется на две операции: а) получение пористой металлокерамической оболочки и установка ее в литейную форму; б) пропитка оболочки матричным металлом. Схема технологического процесса представлена на рис. 1.5, на котором видна пористая металлокерамическая оболочка (а) и пористая металлокерамическая оболочка, установленная в литейную форму, залитую расплавом (б). Расплав пропитывает поры ПМКО, которые превращаются в единое целое с отливкой, создавая на ее поверхности композиционный слой, состоящий из материала ПМКО и из пропитывающего матричного материала. По этой технологии получены реальные отливки с композиционным поверхностным слоем (*T*-образные пазы для столов металлообрабатывающих станков, распределительные валы и др.).

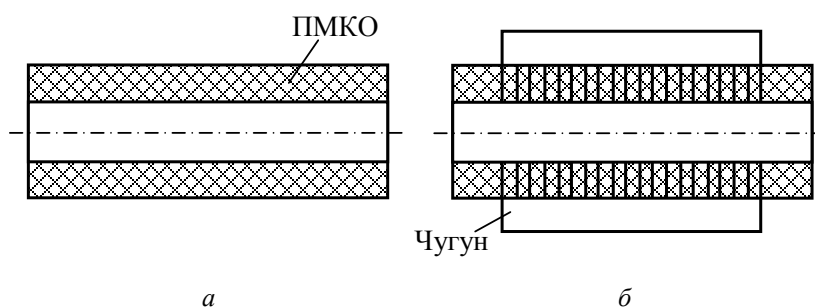


Рис. 1.5. Схема технологического процесса

Осуществлен также вариант процесса, когда ПМКО предварительно пропитывается металлом в изотермических условиях, а затем такая пропитанная оболочка устанавливается в литейную форму и соединяется с матричным металлом за счет механических или диффузионных связей. Пористые металлокерамические оболочки изготавливают по ГПСМО-процессу (горячее покрытие солеметаллических моделей с последующим обжигом), который будет описан ниже.

Заполнение пор оболочки жидким металлом может осуществляться двумя способами. По первому капиллярно-пористая оболочка устанавливается в литейную форму, внутри оболочка заполняется сухим огнеупорным порошком. При заливке формы чугуном происходит проникновение чугуна в поры оболочки. Материал оболочки вместе с проникшим в нее металлом формирует поверхность внутренней полости, которая получается 6-го класса по ГОСТ 2789-95, т.е. выше, чем поверхность оболочки до заполнения ее пор жидким металлом. Заполнение капилляров пористой оболочки в условиях нестационарного режима зависит от температуры оболочки с тем, чтобы для металла был создан режим нестывшей жидкости.

При исследовании условий проникновения легкоплавкой композиции в пористое тело было установлено, что, когда температура пористого тела равна или выше температуры расплава (режим нестынувшей жидкости), скорость проникновения расплава увеличивается с увеличением размера пор, что соответствует уравнению Невье-Стокса:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{r^2 \gamma_m}{8\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r \gamma_m l} - g \sin \varphi \right), \quad (1.10)$$

где l, r – длина и радиус капилляра, соответственно;

φ – угол наклона капилляра;

η, γ_m, σ – вязкость, плотность и поверхностное натяжение жидкости, соответственно;

τ – время движения расплава;

g – ускорение свободного падения.

Когда капиллярный потенциал $\frac{2\sigma \cos \theta}{r \gamma_m l}$ исчерпывается и капиллярное давление

будет равно гравитационному, т.е., если $\frac{2\sigma \cos \theta}{r \gamma_m l} = g \sin \theta$, то $\frac{dl}{d\tau} = 0$

Если капилляр мал, то скорость проникновения тоже мала, но капиллярный потенциал будет выше в соответствии с уравнением Журена $l = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \gamma_m g}$, и проникновение

расплава происходит на большую глубину. В том же случае, когда температура пористого тела меньше температуры расплава, скорость также будет тем больше, чем больше капилляр, но капиллярный потенциал с малыми капиллярами не реализуется из-за быстрого охлаждения расплава в капилляре, и проникновение происходит на малую глубину. При этом, чем больше разница температур пористого тела и расплава и чем больше теплопроводность пористого тела и расплава, тем на меньшую глубину происходит проникновение расплава. Металл в холодную металлокерамическую оболочку под действием только гидростатического давления практически не проникает, и связь с отливкой не будет осуществлена. Оценку полноты проникновения металла в поры оболочки производят по шлифам контактных зон, либо по прочности связи.

При изготовлении отливок по второму варианту капилляры оболочки заполняются предварительно до установки ее в литейную форму. Заполнение может производиться в условиях стационарного режима, например, погружением в расплавленный металл наружной части оболочки. При этом внутренняя часть оболочки, как и в предыдущем случае, заполняется огнеупорным порошком. Заполнение пор в оболочке происходит также в соответствии со скоростью ее прогрева. Таким способом можно заполнять капилляры оболочки, если температура ее плавления заметно выше, чем температура плавления расплава и капилляры оболочки расплав смачивает. Поры в оболочках, изготовленных, например, из железных порошков, хорошо заполняют сплавы на медной основе (бронзы, латуни).

Небольшие пленки металла, остающиеся на наружной поверхности, не приносят вреда, так как эти поверхности свариваются с основным металлом отливки. Оболочки с предварительным заполнением пор жидким металлом могут быть изготовлены малой толщины (2...3 мм), а при их оребрении они получают большую прочность и жесткость. При применении таких оболочек возможно получать полости отливок сложной конфигурации и малых сечений.

При пропитке пористых металлокерамических оболочек, изготовленных, например, из порошков железа ПЖ6М, нихрома ПХ20Н80 или др. и пропитываемых чугуном, процессы протекают интенсивно. При этом происходит взаимодействие с образованием но-

вых структур. Интенсивность процесса обусловлена большой контактной поверхностью матричного расплава и пористой металлокерамической оболочки, а также строением самого порошка, который обладает значительно большим количеством дефектов кристаллической решетки по сравнению с плотным металлом. Пропитка чугуном состава 3,5 % С, 1,5 % Si ПМКО из ПЖ6М позволяет получить структуру стали в соответствии с распределением углерода от заэвтектоидного до доэвтектоидного состава. При пропитке чугуном ПМКО из ПХ20Н80 можно получить высоколегированную сталь карбидного класса, обладающую высокой твердостью и с широкоуправляемыми свойствами.

1.3.3. Поверхностное армирование отливок твердыми оболочками

Для поверхностного армирования оболочки изготавливают механической обработкой, пластической деформацией из листового материала, а также гальванопластикой. Имеются примеры армирования алюминиевого поршня стальным кольцом с канавками для поршневых колец, что уменьшает износ, примеры получения фасонного отверстия в толстостенной стальной отливке, выполненной не механической обработкой, а за счет предварительно изготовленной арматуры. Также применяются оболочки из листовой стали 08сп, совмещенные с чугунной отливкой. Оболочка из стали 08сп применена для получения поверхности чугунной арматуры с обезуглероженным слоем. Это позволяет получить более технологичные методы эмалирования и улучшает качество эмалевого слоя в химическом машиностроении.

Для первого примера арматура изготавливается механической обработкой, а для двух последующих – штамповкой из листовой стали со сваркой. Технология получения такой арматуры каких-либо осложнений не вызывает. Успех применения армирования для этих примеров определяется формированием контактной зоны. Для первого примера – система «сталь – алюминий» – это достигается введением промежуточного слоя, в частности, лужения. Для второго (система «сталь – сталь») и для третьего примера (система «сталь – чугун») необходимо обеспечить контактные процессы, а также отсутствие коробления, которое может произойти при заливке. Предохранять от коробления можно за счет увеличения жесткости арматуры, а также за счет уменьшения температурных градиентов. Увеличение жесткости может быть достигнуто рациональной конструкцией (ребра, фланцы). Быстрое образование корки затвердевшего металла, что может быть достигнуто при отношении толщины стенки арматуры к толщине стенки отливки от 1:5 до 1:10, также увеличивает жесткость. При введении в полость арматуры наполнителей (сухой песок, оксид алюминия и др.) деформация арматуры уменьшается. При заполнении полости арматуры наполнителями следует предусмотреть средства предохранения ее поверхности от окисления, например, за счет покрытия графитовой краской на органических растворителях, так как в противном случае независимо от характера порошкообразного наполнителя происходит образование пригара. Это связано с тем, что при окислении происходит двухсторонняя диффузия атомов железа и кислорода и первоначальная граница твердой поверхности, которая контактировала с песчинками, смещается так, что песчинки погружаются в окалину.

Для протекания контактных процессов необходима не только температура на границе «расплав – твердая поверхность», равная нулевой текучести расплава, но и наличие градиентов концентраций диффундируемых элементов, в частности, углерода. При этом, чем больше градиент, тем шире контактная зона. Для получения чугунной отливки с обезуглероженной поверхностью, как это требуется для арматуры, которая подвергается эмалированию, используют стальные оболочки. Управление проникновением

углерода из чугуна в сталь имеет важное технологическое значение. Знание кинетики проникновения углерода в стальную оболочку от момента заливки до полного затвердевания позволяет выбрать толщину оболочки и условия ее охлаждения с тем, чтобы был обеспечен поверхностный слой без углерода.

Расчет коэффициентов диффузии из жидкого чугуна в сталь показывает, что они на порядок выше по сравнению с рассчитываемыми по параметрам коэффициентами диффузии, используемых обычно при определении глубины цементации. Это объясняется, главным образом, различием ионного радиуса углерода (0,22 нм) в расплаве и атомного (0,77 нм), участвующего в газовой фазе при цементации, а также наличием заряда в первом случае C^{+4} .

Значительным препятствием для диффузии углерода из расплава в твердый металл являются оксидные пленки, образующиеся при прогреве твердого элемента от внешних источников. Защитные покрытия на основе легкоплавких флюсов часто не помогают, так как они расплавляются и стекают, особенно с вертикальных стенок. Для минимального окисления целесообразно устанавливать в форму стальные оболочки без подогрева и проводить заливку за кратчайшее время с тем, чтобы окисление поверхности оболочки не успевало происходить. Стремясь разогреть оболочку до высоких температур для получения хорошей контактной связи, часто не учитывают, что при этом одновременно происходит окисление, что препятствует диффузионному процессу, и роль разогрева уменьшается.

Барьером на пути диффузии углерода из жидкого чугуна в твердую оболочку является газовая прослойка водородного происхождения. При этом, если стальная твердая оболочка содержит водорода больше, чем расплав, то происходит диффузия водорода из оболочки в жидкий чугун. Обычно листовая сталь имеет меньше водорода, чем расплавленный чугун, и такое явление не происходит, но при сочетании литой оболочки с расплавленным чугуном это явление может иметь место. Это же может произойти, если оболочка изготовлена гальванопластикой. Поэтому твердые элементы перед установкой в форму следует подвергать вакуумному нагреву для удаления водорода. Исследования переходных зон показывают, что происходит также существенное ухудшение контактных связей в том случае, когда заливка стальных элементов с исходным низким содержанием водорода производится чугуном с более высокой концентрацией водорода. Так, например, при заливке стальных элементов с содержанием водорода $1,5 \dots 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ чугуном, предварительно обработанным водяными парами до концентрации водорода $9,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$, на контактной границе появляются раковины. Эти раковины нарушают контакт, и диффузия прекращается или происходит только в тех местах, где контакт не нарушен. Для устранения этого влияния металл необходимо дегазировать в процессе плавки и не допускать поглощения металлом водорода при контакте его с литейной формой.

Барьером, как было указано выше, является затвердевающий слой жидкого металла на границе расплав-твердая оболочка, поскольку скорость диффузии в твердом металле на два порядка меньше, чем в жидком. Поэтому заливка с высоким перегревом может быть менее эффективной, чем заливка с меньшим перегревом, но с перепуском, что увеличивает время контакта расплава с твердой оболочкой.

При применении оболочек, изготовленных гальванопластикой, необходимо решать две задачи: изготовление самих оболочек и создание необходимых контактных связей.

Оболочки методом гальванопластики могут быть изготовлены двумя методами: по постоянным металлическим моделям и по разовым моделям, изготавливаемым из органических расплавов или неорганических солей. При применении постоянных моделей из нержавеющей стали с шероховатостью поверхности 10 и 11 классов по ГОСТ 2789-95

производится осаждение на эту модель гальванопластической оболочки. После этого, не удаляя модель, производится заливка. Например, при гальванопластической оболочке из меди заливка производится алюминием. При этом обязательно наличие диффузионных связей между оболочкой и матрицей с тем, чтобы удельное усилие выпрессовывания модели не превышало предельной прочности на срез матричного металла или переходной зоны. Таким методом можно изготавливать гальванопластические оболочки по разъемным моделям. После выпрессовывания модели поверхности отливки могут быть получены 10 класса по ГОСТ 2789-95. Этот метод допускает вставку в модель элементов, изготовленных, например, пластической деформацией (волноводные элементы, лопастные колеса). Для отливки сложной конфигурации можно применять разовые органические модели. При применении таких моделей необходимо обеспечить повышенную размерную точность и токопроводный слой. Повышенную размерную точность можно получить введением в органическую модель порошкообразного наполнителя или изготовить модель в виде оболочки с последующим введением в полость порошкообразного наполнителя с малым коэффициентом термического расширения.

Токопроводный слой на поверхности модели можно получить методом сенсбилизации (создание слоя радикалов SnOH^+) в растворе двухлористого олова, активирования в растворе двухлористого палладия с последующим химическим меднением.

Трудности формирования переходной зоны «медь – алюминий» из-за наличия оксидной пленки Al_2O_3 могут быть устранены применением промежуточного покрытия, например, цинка, вступающего во взаимодействие с медью и алюминием, или применением сплавов, содержащих цинк, который, диффундируя в медь, способствует формированию контактной зоны.

1.4. Технология получения объемноармированных отливок

1.4.1. Методы объемного армирования и их особенности

Объемное армирование отливок из черных и цветных металлов применяется издавна. Например, внутренние холодильники устанавливаются:

1. Для создания направленного затвердевания к прибыли. В этом случае охлаждение действует эффективно и позволяет сократить расход металла на прибыль при изготовлении массивных отливок, например, шаботов, станин прокатных станов и других подобных деталей. При применении арматуры на таких деталях при расходе металла на арматуру 5...6 % расход металла в прибылях сокращается на 25...30 %. В этом случае арматура применяется либо в виде прутковой стали того же состава, что и металл отливки, либо в виде литой фасонной арматуры. Исследования на моделирующих сталь органических расплавах показали, что арматура может рассеять усадочную раковину и заметно уменьшить размер прибыли. Установлено, что при разном размере прибыли и при отсутствии арматуры усадочная пористость глубоко распространяется почти на 2/3 образца, а при наличии арматуры видимой усадочной пористости не обнаружено. Эти результаты можно получить и без арматуры, но для этого нужна прибыль значительно больших размеров;

2. Арматура может иметь специальное назначение, например, для получения водоохлаждаемых каналов, которые выполнить в виде литых отверстий трудно. При применении же труб задача резко упрощается;

3. Особенно большое научное и технологическое значение получило армирование для упрочнения отливок, а иногда и для получения специальных физических свойств, например, для увеличения термостойкости, электропроводности и др.

Строение композиционных отливок по типу арматуры может быть разделено на две группы:

- армированные волокнистыми, слоистыми материалами;
- дисперсно-упрочненные.

К первой группе армирующих материалов относят металлическую проволоку, стеклянные, борные, углеродистые волокна, а также керамические волокна из оксидов, карбидные, нитридные. В качестве слоистых двухмерных материалов используют различные листы, фольгу.

В волокнистых материалах матрица скрепляет волокна в единый монолит и является средой, передающей нагрузку на волокна. При разрушении отдельных волокон нагрузка перераспределяется. Особенностью волокнистой, типичной для композиционной отливки структуры, является то, что высокопрочные с высоким модулем упругости волокна равномерно распределены в количестве 15...90 % в пластичной матрице. Зоны раздела являются, по существу, самостоятельными элементами структуры, так как в этих зонах протекают процессы перераспределения элементов и образование новых фаз. От переходного слоя зависит связь между матрицей и волокнами, и этот слой определяет уровень свойств композиционных материалов в целом.

Армирование прутковым или волокнистым материалом хотя и дает в ряде случаев большой эффект, однако изготовление арматуры и само армирование представляет технологическую сложность. Поэтому наряду с армированием волокнами разрабатываются методы введения в расплав тугоплавких дисперсных частиц.

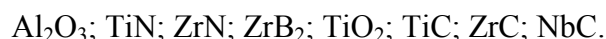
К дисперсноупрочняющим материалам относятся частицы, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней. Упрочняющее действие волокнистых, слоистых материалов по своей природе отличается от упрочняющего действия дисперсных материалов. Для получения упрочняющего действия волокон, пластин они должны сами обладать высокой прочностью и придавать соответствующие свойства всему композиционному материалу. Матрица при этом имеет подчиненное значение. В дисперсноупрочненных материалах ведущее значение имеет матрица, в которой ультрадисперсные нерастворяющиеся в матрице частицы создают эффективное торможение движению дислокаций вплоть до температуры плавления металла (это происходит и при дисперсном упрочнении, когда выпадает дисперсная фаза из твердого раствора).

В дисперсноупрочненных материалах имеет значение форма введенных частиц и отношение длины l к диаметру d . При этом, чем больше это отношение, тем эффективнее действие упрочнителя, т.е. эффективнее проявляется действие волокнистости.

Влияние геометрических параметров частиц при дисперсном упрочнении подчеркивает, что сами частицы не являются упрочнителями, а оказывают влияние на улучшение структуры матрицы косвенно.

Дисперсное упрочнение производят, например, оксидами, размер частиц которых равен 1,2 мкм. Для упрочнения никеля добавляют 2,5 % HfO_2 или ThO_2 .

Для алюминиевых сплавов такими дисперсными частицами могут быть:



Размеры частиц, используемых для упрочнения алюминия, составляют 1,5-8,0 мкм. При выборе материала упрочняющих частиц необходимо, чтобы:

- частицы были тугоплавкими и стабильными в расплаве матрицы (это достигается при низком коэффициенте диффузии составляющих частиц в металле матрицы);

- плотность частиц и матричного металла заметно не отличалась;
- межфазная энергия расплавленных частиц была пониженной.

Введение порошков в расплав имеет трудности даже при применении ультразвука и искусственного перемешивания. Поэтому применяют способ, когда порошки предварительно смешивают с матричным металлом (например, алюминием). После этого производится расплавление смеси и отливка из этой смеси детали. При таком способе достигается равномерное распределение упрочняющей фазы. Коагуляция частиц не происходит при концентрации их в матрице ($10^5 \dots 10^6$)/см³, частицы отличаются по размеру в 2...3 раза.

Для получения фасонных фигур литьем для некоторых конфигураций могут быть использованы сплавы с эвтектическим составом, которые при направленной кристаллизации могут дать структуру, сходную с композиционным волокнистым материалом, а также микроструктуру эвтектики с направленной кристаллизацией.

Упрочняющая фаза в этих системах имеет форму нитевидных кристаллов, равномерно расположенных в матрице и прочно связанных с ней. Свойства нитевидных кристаллов, извлеченных из эвтектического сплава, примерно такие же, как и нитевидных кристаллов, полученных осаждением из газовой фазы.

Изготовление деталей методом направленной кристаллизации производят путем расплавления шихты эвтектического состава с последующим охлаждением в форме с заданной скоростью. Примером таких композиций являются «Nb – Nb₂C»; «Ta – Ta₂C»; «Ni – NiMo»; Ni₃Al; Ni₃Nb и некоторые другие.

Наилучшие сочетания механических свойств были получены на псевдобинарных системах «Co – Ta – C» и «Ni – Al – Nb», а также на моновариантной эвтектике «Co – Cr – C». Эти материалы используются как жаропрочные сплавы. Жаропрочность этих композиций при 1100 °С превосходит в два раза жаропрочность лучших стареющих никелевых сплавов. Механические свойства эвтектических сплавов системы «Ni₃Al – Ni₃Nb» можно характеризовать так: предел прочности при растяжении при 20 °С 1000 МПа, при 1100 °С – 500 МПа, относительное удлинение при разрыве 0,6 %, длительная прочность за 100 ч при 1100 °С – 150 МПа, усталостная прочность на базе 10⁷ циклов при 870 °С – 400 МПа. Недостаток этих материалов – малая пластичность и плохая устойчивость при высоких температурах к окислению.

1.4.2. Влияние объемного армирования на механические и физические свойства отливок

Для улучшения свойств металлов обычно используют пластическую деформацию (это возможно и для заготовок, изготовленных литьем); фиксирование закаливанием твердых растворов, диспергированием выделяющихся из твердого раствора вторичных фаз.

За счет термомеханической обработки можно получать стали с прочностью при разрыве до 3000 МПа. Однако такие стали чувствительны к концентраторам напряжений, что затрудняет реализацию этой прочности в конструкциях. В последние годы интенсивно развиваются композиционные материалы, которые имеют высокие механические свойства, малую чувствительность к концентраторам напряжений, обладают сопротивлением к усталостному разрушению. Эти материалы по своей природе гетерогенные, состоят из матрицы того или иного металла и упрочняющих эту матрицу волокон, локализирующих развитие трещин.

Идея структуры такого материала применительно к неметаллическим материалам используется в различных областях техники и насчитывает многовековую историю.

Например, упрочнение строительных материалов (глины) органическими волокнами, упрочнение железной арматурой бетона (железобетон), упрочнение резины волокнами при производстве шин, армирование стекловолокном пластмасс, использование свойств долевых волокон древесины, соединенных клеем при производстве фанеры. Для реализации этих идей применительно к металлам возникли свои технологические и физико-химические особенности, которые интенсивно исследуются. Эффективность полученных результатов по композиционным металлам привела к огромному количеству исследований в этом направлении и к большому количеству информации.

Однако вся эта информация мало затрагивает проблемы получения фасонных композиционных отливок, а, главным образом, рассматривает заготовки, получаемые пластической деформацией. Тем не менее, достижения технологии армирования и получение армирующих материалов с высокими свойствами могут быть использованы и для фасонных отливок. Эффективность применения стальной арматуры для повышения прочности чугуна отмечается в ряде работ. При расходе арматуры 3...5 % от веса отливок значительно увеличивается статическая и динамическая прочность. При использовании волокнистых материалов технологический процесс должен обеспечить равномерное распределение волокон и их изоляцию друг от друга слоем металла; малое взаимодействие волокон с матрицей, приводящее к понижению свойств волокон; отсутствие механических повреждений волокон.

При изготовлении композиционных отливок методом пропитки давление играет роль не только как гидродинамический фактор, способствующий заполнению промежутков между волокнами матричным металлом, но и как фактор, оказывающий влияние на физико-химические процессы, происходящие при взаимодействии матрицы с арматурой. Свойства композиционной отливки зависят от технологии ее изготовления, обеспечивающей необходимые связи. При недостаточных связях любая прочность волокон не увеличивает прочность композиции.

Разрушение композиционных материалов отличается от изотропных. Трещина, как и в изотропных, возникает в матрице, но при ее развитии встречает препятствие на границе матрица-волокно. При этом развитие трещины останавливается. Разрушение композиции – это ряд дискретных этапов, и эти этапы отличаются перераспределением напряжений в волокнах. Такие материалы обеспечивают одновременно и прочность и вязкость, что не достигается в обычных материалах, так как в композиционных прочность достигается за счет волокон (обычно высокопрочных), а вязкость – за счет матрицы и специфических условий разрушения композиционных материалов. Для всех традиционных материалов удельная жесткость E/γ (E – модуль упругости, γ – плотность) практически одинаковая, а в композиционных она увеличивается на 100...200 %.

Прочность композиций, армированных непрерывными волокнами, подчиняется правилам аддитивности, которое дает хорошие результаты при однородных по прочности волокнах, что справедливо, например, для металлических волокон - проволоки. При хрупких волокнах прочностные свойства имеют большой разброс. При недостаточной связи волокно-матрица, а также при соприкосновении волокон друг с другом происходит отклонение от правила аддитивности.

Работа разрушения композиции больше, чем сумма работ при разрушении ее составляющих. Это связано со специфическими условиями разрушения: вытягивание волокон из гнезда, что требует затрат работы; разрушение связи по поверхности раздела волокно-матрица; работа пластической деформации матрицы.

На свойства композиционных материалов существенное влияние оказывает межфазное взаимодействие. Композиционные материалы - система гетерогенная, термодинамически нестабильная. Поэтому взаимодействие между компонентами может протекать как

при изготовлении, так и при эксплуатации. Для создания связей матрица-волокно взаимодействие необходимо, но если взаимодействия приводят к появлению хрупких фаз, то это ухудшает свойства. Потеря прочности материала в целом и его волокон доказаны экспериментально. Например, в композиционных материалах титан-карбид кремния исходная прочность волокна 3200 МПа, а экстрагированные из композиционного материала волокна имели прочность всего 2100 МПа. Это связано с процессами взаимодействия волокно-матрица. Уменьшение взаимодействия может быть осуществлено за счет управления составом матрицы и применения покрытий армирующих волокон. Например, сплав титана с 6 % алюминия и 4 % ванадия интенсивно взаимодействует с борными волокнами – скорость реакции при 900 °С составляет $24 \cdot 10^{-7}$ см/с^{1/2}, а сплав состава «титан + ванадий (13 %) + хром (11 %) + алюминий (3 %)» с теми же волокнами имеет скорость реакции $9 \cdot 10^{-7}$ см/с^{1/2}, т.е. почти в 3 раза меньше.

Для композиций важно соответствие коэффициентов термического расширения матрицы и волокна. Например, высокомодульные, высокопрочные волокна имеют коэффициент термического расширения $4 \dots 9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, а алюминиевая матрица имеет коэффициент термического расширения $22 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. При термоциклировании композиций возникают остаточные напряжения, что приводит к разрушению поверхности раздела матрица-волокно или разрушению волокна. Поэтому коэффициенты термического расширения должны быть близкими по своему значению.

Из вышесказанного вытекают пути получения композиционных отливок с заданной структурой и свойствами, а именно: легирование матрицы для уменьшения взаимодействия и растворимости в ней армирующих волокон; создание барьерных слоев на волокнах для предотвращения взаимодействия последних с матрицей; низкотемпературные и скоростные методы изготовления композиционных материалов, при которых процессы взаимодействия не приводят к снижению свойств композиций; использование схем армирования, которые позволяют с максимальной эффективностью реализовать в композиционном материале потенциальные свойства волокон.

При изготовлении композиционных отливок определяющим компонентом являются армирующие волокна. Для получения композиционных отливок могут быть использованы:

- борные и углеродистые волокна;
- нитевидные кристаллы и волокна карбидов;
- проволока (бериллиевая, вольфрамовая, титановая, стальная), обладающая высокой прочностью.

1.4.3. Методы изготовления и свойства арматуры из неметаллов и металлов

Свойства композиционных отливок в значительной степени зависят от характера арматуры, которая должна обладать заданными физико-химическими свойствами с тем, чтобы она обеспечивала связь с матрицей, но при отсутствии разрушения волокна из-за взаимодействия. Кроме того, арматура должна обладать определенными физико-химическими свойствами с тем, чтобы они соответствовали матрице, не создавая напряжений в системе, если это специально не предусмотрено, как средство противопоставления внешним нагрузкам. Арматура может быть изготовлена из прутков с последующей вязкой, сварная, методом литья, специальными методами, например, волокна бора и карбида кремния получают осаждением из газовой фазы на нагретую до 1100...1200 °С вольфрамовую нить диаметром 10...12 мкм.

Углеродные волокна получают из полиакрилнитрильного (ПАН) гидроцеллюлозного волокна или волокон на основе нефтяных смол и пеков. Основой технологического процесса получения углеродистых волокон является термическое разложение органических исходных волокон в строго контролируемых условиях (исходные материалы, температура, скорость нагрева). Технология получения волокон оказывает существенное влияние на их свойства.

Углеродные волокна выпускают в виде нитей, лент, тканей. Использовать такие волокна для армирования трудно. Поэтому разрабатывают моноволокна диаметром до 100 мкм.

Металлические волокна (проволока) из сплава бериллия, вольфрама, молибдена, стали, титана получают волочением. Проволока может быть также изготовлена электрохимическим осаждением, вытягиванием из расплавов, осаждением из газовой фазы.

При получении проволоки волочением создается повышенная прочность благодаря наклепу, но эта прочность при нагреве уменьшается. Поэтому, если композиционные материалы работают при повышенных температурах, то для них используют проволоку, изготовленную из дисперсно упрочненных материалов. Например, созданы сплавы W-Nf-C; W-Nf-Re-C для вольфрамовой проволоки, предназначенной для армирования никеля. В этих сплавах упрочнителем является карбид гафния. Металлические проволоки сравнительно пластичны, что позволяет делать фигурную арматуру, а кроме того, металлические проволоки имеют малую дисперсию по свойствам. Проволоки используют диаметром от 0,05 до 1,2 мм с пределом прочности 3250...1600 МПа (уменьшение прочности проволоки связано с увеличением диаметра). Для армирования высокожаропрочных композиционных материалов используют проволоку из вольфрама и молибдена, которые при высоких температурах сохраняют жесткость. Например, вольфрам при температурах 20, 1000, 1400 °С имеет модуль упругости соответственно 410000, 368000, 347000 МПа. Недостатком тугоплавких материалов (вольфрам, молибден) является то, что они обладают низким сопротивлением к высокотемпературному окислению. Это затрудняет получение композиций при армировании этими материалами, а также и эксплуатацию композиций. Из такой проволоки стремятся делать ткани, что упрощает армирование. В тех случаях, когда между армирующим материалом и матрицей возможны интенсивные процессы взаимодействия как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации, а также для улучшения смачивания при пропитке, на арматуру наносится покрытие. При этом используются газофазные методы осаждения: химические, электрохимические. Отличительной особенностью этих методов является отсутствие или незначительное температурное взаимодействие на волокно.

Газофизическое напыление – процесс получения покрытий жидким металлом, распыленным газовой струей. При этом покрываемое изделие можно не нагревать. Прочность сцепления определяется механическим сцеплением частиц металла с шероховатой поверхностью; адгезионными силами; химическим воздействием; микросваркой с тонким поверхностным слоем. Значение каждого из этих видов связи зависит от конкретных условий нанесения покрытия. Прочность связи меньше, чем при других методах. При подогреве напыляемой поверхности сцепление заметно увеличивается. Следует отметить, что напыляемый слой обладает повышенной газонасыщенностью и твердостью. Это следует учитывать, если напыляемый слой рассматривать как промежуточный для осуществления связей между элементами композиции.

Электрохимические методы используются для покрытия нитей и заключаются в том, что волокна с катушки перематываются на металлическую оправку, которая служит катодом. Оправка частично погружена в электролит и совершает вращательное движение с заданной скоростью. Анод изготавливается из осаждаемого металла.

Таким способом на нити из углерода, бора, карбида бора, вольфрама, стальной проволоки, карбида кремния наносят никель. Качество покрытия зависит от температуры ванны, плотности тока, плотности электролита, геометрии электродов.

Медные покрытия также используют как промежуточный слой между матрицей и волокном. Осаждение металла производят из водных растворов.

Химические методы позволяют использовать нетокопроводные материалы. Этими методами можно наносить также тонкие слои на углеродные волокна. Химическая металлизация обеспечивает лучшую пропитываемость волокон жидкими расплавами. Сущность химического метода осаждения покрытий заключается в восстановлении ионов металлов до элементарного состояния на поверхности покрываемого вещества. Процесс происходит по реакции $M^{+n} + ne \rightarrow Me^0$. Процесс покрытия осуществляется в слабых или щелочных водных растворах при комнатной или более высокой температуре.

Для того, чтобы не происходило самопроизвольное разложение рабочего раствора, используются катализаторы. При осаждении на металл железа, никеля, кобальта, алюминия катализаторов не требуется, так как эти металлы сами являются катализаторами.

При осаждении на металлы и на углеродные волокна необходима специальная обработка (сенсбилизация) и активация поверхности. На процесс химического осаждения оказывает влияние кислотность раствора, соотношение компонентов, температура раствора, наличие активизирующих и стабилизирующих добавок.

Методом химического восстановления получают покрытия толщиной до 30 мкм и более. Часто для композиционных металлов используют никелирование, а для разных целей – меднение, хромирование, кобальтирование, серебрение.

Химическое никелирование углеродистых волокон используют в двух целях: никель, как матричный металл и никель, как технологическое покрытие, улучшающее пропитку волокон, например, алюминия. Скорость осаждения достигает 0,01...0,25 мкм/мин.

При химическом меднении углеродных волокон можно получать композиты с высокой теплопроводностью или электропроводностью, близкие к меди, но более прочные и с меньшим коэффициентом термического расширения.

1.4.4. Технология заливки объемноармированных отливок

Заливка объемноармированных форм требует особого подхода, так как такие формы имеют большое внутреннее сопротивление, и оно тем больше, чем выше заполнение объема арматурой. Расстояние между волокнами для алюминиевого литья часто достигает десятых долей миллиметров и даже при производстве таких отливок, как шаботы, расстояние между арматурой составляет 15...20 мм. Поэтому скорость заполнения должна быть повышенной при пониженной вязкости расплава. Применяют разветвленную двухэтажную литниковую систему, в то время как при отсутствии арматуры литниковая система могла бы быть упрощена. Необходимость получения упроченных деталей в различных направлениях требует в этих же направлениях располагать арматуру по двум, иногда и трем осям. Иногда создают сочетание армирующего материала с различной геометрией. Если при подводе металла вдоль арматуры сопротивление будет определяться трением потока об арматуру, то при наличии поперечно установленной арматуры возникают лобовые удары, изменение направления потока, что приводит к резкому увеличению суммарного сопротивления.

При малых расстояниях между арматурой и при высоком проценте объема арматуры (50...80 %) полость можно рассматривать как капиллярно-пористое тело, где при заполнении играют роль капиллярные силы.

При пропитке расплавом волокон необходимо, чтобы расплав смачивал волокна. В этом случае пропитку можно осуществлять при нормальном давлении. Облегчаются условия пропитки при вакуумном всасывании и под давлением. Свободной заливкой можно заполнять форму со сравнительно небольшим количеством волокон и при высокой жидкотекучести сплава. Если объем волокон занимает более 40 %, то при этом остается много свободных пустот.

Для получения сплава, армированного дискретными волокнами, армирующий материал вводят в металл при вращении. При этом волокна распределяются по всей массе металла, после чего скорость вращения снижается, и металл быстро охлаждается.

При применении ультразвука улучшается смачивание дискретных волокон расплавом, что способствует равномерному их распределению по объему матрицы. В этих случаях дискретные волокна распределяются хаотически; для ориентированного расположения используют электромагнитные поля.

Методом пропитки при нормальном давлении получают материалы с алюминиевой и магниевой матрицами. При этом используют одиночные волокна или пучки, покрытые матричным металлом. Этим же методом изготавливают композиции из волокон кварца (стекла) и алюминия объемами: алюминиевого сплава – 50 %; стеклянных волокон – 50 %. Пропитывают также магнием борное волокно, танталовую проволоку. Изготавливают композиты «алюминий – углеродное волокно», «алюминий – карбид кремния».

Получены материалы с внешним армированием для изделий, работающих на трение. Для этого в форму укладывают ткани из карбидов тугоплавких материалов (тантал, титан, вольфрам) и заливают алюминием. На поверхности изделий получают 70..80 % фазы с высокой твердостью, состоящей из карбидов и из сплава матрицы. Такие композиты имеют повышенную износостойкость.

Большинство материалов, служащих для армирования, склонны к окислению, что снижает их свойства. Кроме того, наличие оксидной пленки на поверхности волокон ухудшает смачивание и влияет на связь волокно-матрица. Поэтому пропитку целесообразно вести либо в защитной атмосфере, либо в вакууме. Пропитка в вакууме создает лучшие условия, так как отсутствует газовая фаза, препятствующая проникновению металла между волокнами, что особенно сказывается при нагреве этой газовой фазы.

Используется также метод вакуумно-компрессорной пропитки. При использовании комбинированных способов удается получить отливки с пропиткой, при которой отсутствуют усадочные поры, трещины, отсутствуют непропитанные участки. Этим способом получают разнообразные материалы с алюминиевой матрицей, а именно: «алюминий - борное волокно», «алюминий – стальная проволока», «алюминий – бериллиевая проволока», «алюминий – углеродное волокно». При использовании магниевой матрицы изготавливают «магний – борное волокно». С титановой матрицей изготавливают композиты с борным волокном, с оксидом алюминия, карбидом кремния, с бериллиевой проволокой. С никелевой матрицей изготавливают композиты с графитовым волокном, с вольфрамовой проволокой.

1.5. Композиционное литье – экономичный метод формообразования деталей

Благодаря поиску металлургов и машиностроителей-технологов современная техника располагает рядом материалов и технологических процессов, позволяющих полу-

чать машины, успешно используемые в разнообразных и сложных условиях – от недр Земли до космического пространства.

Однако высокие эксплуатационные свойства деталей часто достигаются дорогими и нетехнологичными методами. Поэтому актуальнейшей задачей современного машиностроения и его основной заготовительной базы – литейного производства – является решение проблемы повышения эксплуатационной надежности и технологичности отливок.

Одним из перспективных методов формообразования деталей, позволяющих решить эту проблему, является композиционное литье. При удачном сочетании основных свойств элементов композиции удается не только достичь экономии дорогих металлов, но и получить новое, более высокое качество готовых изделий, повысить их эксплуатационную надежность.

В настоящее время композиционные материалы переживают второе рождение. Широкое их использование позволяет существенно улучшить все характеристики конструкций, машин, транспорта, сооружений и резко снизить их материалоемкость.

Однако композиционные материалы с высокими механическими характеристиками используются пока, в основном, для ограниченного круга пластически деформированных металлов. Применение композиционных отливок при решении задач повышения надежности изделий и технологичности их изготовления может внести большой вклад в технологию машиностроения. Этот вопрос требует дальнейшей коллективной научной разработки.

Известные методы изготовления литых композиционных изделий и области их применения чрезвычайно разнообразны. На предприятиях и в лабораториях композиционные отливки получают практически всеми традиционными и специальными способами литья. В песчано-глинистые формы льют прокатные валки, кольца, втулки, трубы, штифты, цапфы, пластины. В кокилях осуществляют литье армированных отливок, наплавку катков, подшипников, литье поршневых композиционных деталей, зубчатых колес, кокилей, пуансонов, штампов, режущего инструмента, токопроводящих шин и пластин, клемм и других деталей.

Под давлением получают композиционные детали из литейных сплавов на основе алюминия, цинка и других цветных металлов: каркасы стоек, корпуса с подшипниками, корпуса фрез и другого режущего инструмента, корпуса сверлильных головок, точил, шпиндели паровой арматуры, детали весов, волноводы, магнитные блоки и пр. Под низким давлением отливают композиционные цилиндры, блоки, роторы и подшипники, отливки выпускных коллекторов, патрубков и дожигателей двигателей внутреннего сгорания.

Жидкой штамповкой изготавливают тонкостенные рабочие колеса из алюминиевых сплавов с лопастями из проката, поршни двигателей и компрессоров. Литьем по выплавляемым моделям удобно получать армированные отливки путем установки арматуры, непосредственно в модель на этапе ее изготовления. Электрошлаковым литьем отливают внутреннюю часть биметаллических валков. Центробежным способом получают композиционные отливки подшипников, гильз, гаек, зубчатых колес, оболочек, узлов, прокатных валков.

Важной областью применения композиционных изделий является технологическая оснастка, в том числе литейная. Получены двухслойные кокили чугуна-сталь, стойкость которых выше стойкости чугунных кокилей в 10 раз.

Непрерывно совершенствуется технология изготовления и расширяется номенклатура полых биметаллических отливок и отливок с композиционным поверхностным слоем. Перспективно применение композиционных отливок с рельефной поверхностью типа дисков триера, у которых участки поверхности получены штамповкой из листа.

В настоящее время получены композиционные отливки практически для всех пар сочетаний основных конструкционных металлических материалов. Однако объем реального внедрения литых металлических композиций еще явно недостаточен. Специалистам в этой области необходимо многое сделать, чтобы на деле реализовать основные преимущества композитов - надежность и технологичность.

1.5.1. Композиционное литье – средство повышения надежности

Поскольку износ и разрушение начинаются, как правило, с поверхности деталей, важнейшей задачей повышения эксплуатационной надежности является улучшение служебных характеристик поверхностного слоя отливок.

Процесс поверхностного легирования известен уже около 80 лет. Предложен способ легирования отливок путем нанесения на поверхность формы или стержня легирующих элементов в виде тонкой металлической пленки, образующейся при термическом разложении галидов и карбониллов соответствующих металлов. Для нанесения пленки пары указанных соединений в смеси с инертным газом продувают через полость нагретых литейных форм. Технология позволяет получить на поверхности формы несколько последовательно расположенных слоев или один слой из смеси различных металлов для сложного легирования.

В последнее время получило распространение легирование и армирование поверхности отливок с помощью пористых обмазок (вставок), расположенных в полости формы. Важными факторами, определяющими течение пропитки и растворения порошка в металле, являются температура, химический состав участвующих в процессе материалов и динамика течения жидкости в том месте отливки, где расположена вставка.

Поверхностное легирование на глубину до 3 мм проводят с помощью обмазок из железного порошка с жидким стеклом. При этом получение легированного слоя с качественной поверхностью возможно в случае применения легирующих обмазок, образующих слой, температура затвердевания которого выше температуры затвердевания основного металла. В противном случае кристаллизация начинается на границе между слоями и распространяется вглубь отливки, а остающийся жидким поверхностный легированный слой подвержен образованию газовых раковин.

В Одесском политехническом институте разработана технология получения деталей сложной конфигурации пропиткой жидким металлом пористых металлокерамических оболочек, полученных твердофазным спеканием порошков по ГПСМО-процессу. Такой способ изготовления отливок с композиционным поверхностным слоем обеспечивает получение гладкой поверхности, соответствующей 5 и 6 классам по ГОСТ 2789-95.

Как известно, растекание сплава по металлической подложке начинается при достижении последней температуры, равной 0,8 температуры солидуса сплава. Фильтрация жидкого чугуна и жидкой стали в пористые материалы также начинается при достижении легирующей обмазкой аналогичной температуры. Первой стадией пропитки пористых обмазок или вставок является их нагрев. При этом для осуществления качественной и полной пропитки необходимо использовать специальную атмосферу для предотвращения окисления порошка. Устраняют этот недостаток пропиткой заготовок из порошков окунанием в металл, находящийся под слоем флюса. Чтобы поверхность образца не покрылась наплывами, предложено погружать в металл только питатель - часть пористой заготовки, выполненную заодно с ней и из того же материала. Тело заготовки располагают над поверхностью металла, но целиком погружают в жидкий флюс,

плавающий на металле. Здесь заготовка, защищенная от окисления, нагревается. Пропитывающий металл поднимается по капиллярам питателя и заполняет поры заготовки.

Поверхностное легирование либо армирование при центробежном литье может быть осуществлено непосредственным введением армирующего компонента во вращающуюся отливку. Центробежные силы приводят к скоплению арматуры в поверхностном слое. Наиболее типичным примером такого процесса является технология центробежного литья армированных порошком карбида вольфрама шарошек буровых долот из стали 18ХН2МФЛ. Карбид вольфрама, более плотный, чем основной металл, перемещается к наружной части формы и заполняет объем зубьев шарошек.

Повышению эксплуатационной надежности способствует также замена цельнолитых изделий на объемные композиционные.

Истинная композиционная отливка определяется наличием металлической связи между отдельными ее частями. Образование такой связи зависит от ряда факторов. Основной из них – химический состав частей. К сожалению, эксплуатационные и технологические преимущества наиболее распространенных в композиционном литье сочетаний пар металлов и сплавов зачастую вступают в противоречие со способностью сплавов образовывать металлические связи. Поэтому приходится применять ряд специальных мер для создания условий, при которых такая связь возникает. К их числу относятся оптимизация температурных условий процесса, использование защитных и промежуточных покрытий, применение внешних воздействий, например ультразвука, вакуумная экстракция газов и т.п.

Исследования показывают, что до определенных температур нагрева твердых заготовок и жидкого металла сваривание пар полностью отсутствует. При повышении температуры наблюдается частичное сваривание, а затем – полное, сопровождающееся увеличением толщины переходного слоя.

Поскольку для создания оптимальных температурных условий вставки перед установкой в форму приходится подогревать, они часто нуждаются в защите от химического взаимодействия с окружающей средой. Так, например, флюсы системы бура-борный ангидрид-фторцирконат калия надежно защищают поверхность вставок при получении биметаллических отливок «сталь – чугун» от обезуглероживания и окисления, способствуют процессам, протекающим на границе раздела «твердый металл – жидкий расплав», уменьшают угол смачивания и способствуют растеканию жидкого металла. Такие флюсы устойчивы в широком интервале температур.

При изготовлении биметаллических отливок «сталь – бронза» лужение стальной втулки перед заливкой бронзы обеспечивает более прочную связь, чем покрытие флюсом на основе буры. Поэтому для обеспечения надежной металлической связи между частями композиционной отливки твердую вставку перед заливкой в некоторых случаях покрывают тонким слоем промежуточного металла. Так, вставки, из железных сплавов покрывают алюминием, кадмием, медью, оловом, цинком, двухслойным покрытием – хромом и никелем. Бронзовые вставки покрывают медью. Покрытия наносят, в основном, электролитическим осаждением (кадмий, хром, никель, медь, цинк) или окунанием (алюминий, олово).

Для совмещения процессов диспергирования оксидной пленки и рафинирования наплавляемой на сталь бронзы применяют ультразвуковую обработку. Ультразвук позволяет получить качественные соединения «сталь – бронза» без флюсов. При обработке расплава ультразвуком вдвое снижается содержание водорода в бронзе, измельчаются неметаллические включения. Ультразвук используют также для контроля степени свариваемости слоев биметаллической отливки.

В машиностроении получили распространение композиционные отливки системы алюминий-сталь с диффузионной связью. Наиболее характерным представителем деталей подобного типа является стальная гильза двигателей внутреннего сгорания с прилитыми алюминиевыми ребрами воздушного охлаждения. Добиться достижения диффузионной связи между столь разнородными материалами удастся путем разработки технологии, включающей операцию алитирования стальных вставок перед заливкой жидкого алюминия. Качество алитирования зависит от подготовки поверхности, выбора флюса, либо предварительной металлизации поверхности электролитическим осаждением. Важное значение имеет также химический состав стальной вставки и алитирующего сплава. Процесс биметаллизации заключается в погружении подготовленной вставки в алитирующий расплав, выдержке в нем определенное время и переносе алитированной вставки в пресс-форму, куда заливают алюминий.

Внедрены комплекс оборудования и технологический процесс литья заготовок алюминиевых поршней с нирезистовой вставкой. Благодаря применению специального комплекса высокопроизводительного оборудования, включающего механизм алитирования и манипулятор установки алитированной вставки в кокиль, удалось резко сократить трудоемкость работ и снизить брак.

Из-за неравномерной усадки составляющих композиций возникают значительные напряжения, приводящие к трещинам. Такое явление наблюдали, например, при изготовлении стальных бил, армированных износостойкими вставками из хромистого чугуна. Существуют способы устранения этой проблемы – предварительный нагрев вставок или перепуск жидкого металла. Более простой способ, пригодный, однако, только для композиционных отливок без диффузионной связи между слоями, заключается в создании промежуточного слоя между расширяющейся вставкой и сжимающейся залитой сталью, плавящегося до достижения температуры, при которой образуются трещины.

Совершенствуется технология изготовления композиционных прокатных валков центробежным способом. Определены гравитационные коэффициенты для расчета скорости вращения центробежных форм при литье валков. Установлено, что она должна быть различной для рабочего и внутреннего слоев. При центробежном суспензионном литье получают отливки с однородным мелкокристаллическим строением металла и высокими механическими свойствами.

Предложена технология получения двухслойных валков, в которых наружный рабочий слой отливают из легированного порошками непосредственно в форме сплава, а внутренний – из нелегированного.

Разработана технология получения композиционных материалов разного профиля из литых гранул алюминиевого сплава. За счет предварительного плакирования гранул тонкодисперсными порошками, обеспечивающими изоляцию их поверхности друг от друга при уплотнении, получают изделия, состоящие из скомпактированных волокон, прочно сцепленных друг с другом за счет внедренных в их поверхность частиц порошков. Такое композиционное изделие обладает более высокими механическими свойствами, чем обычное, получаемое прессованием из гранул.

Разработан способ изготовления композиционных деталей «сталь – бронза», который назвали «Метод совместного нагрева» (МСН). МСН предусматривает предварительное гранулирование наплавляемого металла, после чего бронзовые гранулы засыпают в полость между стальной вставкой и формой и нагревают до плавления. Центробежная биметаллизация с использованием гранул предусматривает ввод в полость вращающейся заготовки графитовых электродов, между которыми возбуждается электрическая дуга. Находящаяся в полости заготовки смесь гранул наплавляемого металла и

флюса расплавляется, а стальная основа разогревается. После достижения необходимых температур дуга отключается и отливка остывает.

При центробежном изготовлении крупногабаритных композиционных подшипников «сталь – оловянный сплав» (диаметром до 1500 мм и длиной до 800 мм) основные проблемы были преодолены при выборе оптимальной температуры заливаемого сплава и скорости вращения изложницы. Надежное сваривание компонентов (даже при предварительном лужении стальной заготовки) возможно при достаточно высоких температурах, что, в свою очередь, приводит к созданию неблагоприятных условий кристаллизации. С другой стороны, увеличение скорости вращения способствует свариваемости слоев, но сопровождается резким увеличением нежелательных ликвационных процессов в оловянном слое.

При изготовлении под давлением композиционных отливок «сталь – бронза» заливкой жидкой бронзы на стальную вставку температура последней оказывает двойное влияние на процесс образования диффузионной связи. Установлено, что чем выше температура стальной оболочки, тем медленнее растет корка в бронзовой части отливки, и тем легче она деформируется под давлением и плотнее прилегает к стальной части, обеспечивая более прочное соединение.

Композиционные заготовки пресс-форм для литья под давлением получали методом электрошлакового переплава составных электродов в медных водоохлаждаемых кристаллизаторах. Наибольшая экономия достигнута при использовании пресс-форм, в которых рабочая часть выполнена из легированных сталей (3Х2В8, 4Х4М2ВФС, Ди-22), а нерабочая из стали 45. Вначале формируют нерабочую часть заготовки, а затем на ней рабочую из легированной стали. Электрошлаковый переплав снижает содержание вредных примесей в металле, уменьшает размер неметаллических включений, благоприятно сказывается на структуре, повышает плотность изделия.

Надежность композиционных изделий важна и в тех случаях, когда две или более металлических составляющих находятся в коррозионной среде. При этом, подбирая корпусную часть композиционной отливки с более низким электродным потенциалом по сравнению с потенциалом материала вставки, последнюю можно защитить от коррозионного разрушения.

1.5.2. Композиционное литье – средство повышения технологичности

Процессы, сопровождающие формирование композиционных отливок, привели к возникновению модификаций известных литейных технологических приемов, а также к разработке и внедрению новых операций и режимов.

Технология литейной формы при изготовлении композиционных отливок заливкой жидкого металла на твердую вставку по сравнению с обычной технологией характеризуется рядом особенностей. К прочности песчаных форм предъявляются более высокие требования из-за необходимости выполнения транспортных операций при установке в форму нагретой вставки перед заливкой, а к огнеупорности – из-за применения повышенных температур заливки наплавляемого сплава. Учитывая повышенную охлаждающую способность вставки и жесткие температурно-временные параметры процесса, важное значение приобретает простота устройства и обслуживания. Конструкция формы должна также обеспечивать при заливке полное и последовательное удаление шлака с поверхностей вставок.

С другой стороны, применение композиционного литья позволяет изготавливать детали, которые традиционными литейными методами получать неэкономично или вообще невозможно, например, полые отливки со сложной конфигурацией полостей.

Армирование отливок полыми вставками открывает широкие возможности для получения таких деталей. Известно изготовление доменных холодильников заливкой стальных труб. При этом получают тонкие и длинные изогнутые каналы, которые не могут быть выполнены механической обработкой или с помощью песчаных стержней. Полые металлические вставки применяются и в тех случаях, когда песчаные стержни не обеспечивают требований, предъявляемых к размерам, чистоте поверхности и эксплуатационным свойствам внутренних полостей или отверстий отливок, а также, когда из-за малых сечений и сложной конфигурации стержней их трудно удалять.

Полости в отливках могут быть получены заливкой тонкостенных вставок (оболочек), изготовленных штамповкой, сваркой или литьем. Первым способом изготавливают полые вставки из стального проката. Для предупреждения деформации при контакте с жидким металлом их заполняют песком или металлической дробью. Аналогично готовят к заливке бронзовые и латунные оболочковые вставки. Однако таким способом трудно получать сложные разветвленные отверстия. Для этих случаев больше подходит метод изготовления вставок электролитическим осаждением.

Важной проблемой является вредное влияние водорода, который выделяется при электролизе, насыщает электролитический слой и приводит к дефектам водородного происхождения переходной зоны, что также снижает прочность связи. Это явление устраняют путем вакуумной экстракции водорода.

В особых случаях, когда из-за сложной конфигурации стержня не удастся получить гальванопластическую оболочку (тонкие глубокие каналы и т.п.), часть последней получают из проката. Такая оболочка сама является композиционным изделием, а изготовленная с ее помощью деталь представляет собой уже комбинированную композицию «прокат – электроосажденный металл – литая матрица».

Сложные отливки с комбинированными композициями являются дальнейшим этапом повышения технологичности изготовления деталей. Например, буровая шарошка, кроме армирующих рабочих зубья элементов, содержит также вплавленный центральный опорный стакан. Комбинированную композицию представляет собой и крупная алюминиевая отливка, армированная стальными трубами, покрытыми снаружи гальваническим или химическим никелем.

Сложная композиция получается в том случае, когда установку вставок в форму осуществляют с помощью жеребеек. Описаны чугунные конфорки, изготовленные с залитыми электронагревателями в виде стальных трубок, причем положение нагревателей в форме определяется жеребейками, предварительно приваренными к трубкам.

Композиционной может быть и сама легирующая вставка, если она получена, например, литьем. При этом перед отливкой легирующей вставки из сплава с относительно низким содержанием марганца в форму устанавливают шпильки так, чтобы их шляпки оставались внутри металла. После этого вставку устанавливают в форму и заливают высокомарганцовистой сталью.

Использование моделей, удаляемых при заливке, открывает новые возможности местного легирования и армирования. Таким способом можно обрабатывать не только поверхность, но и любой участок внутри отливки, например, добавками плакированного пенополистирола в выжигаемую модель. Для этого порошок феррохрома наносят на подвспененные гранулы, затем формируют их в плитки, которые используют для сборки модели. При этом «легированные» плитки размещают как на поверхности модели, так и внутри ее. Основной объем порошка феррохрома после затвердевания оказывает

ся в заданной зоне легирования, хотя и наблюдается частичный унос хрома в соседние зоны, образованные чистым пенополистиролом. Последнее обстоятельство учитывают, увеличивая количество легирующего элемента на 10...15 % против расчетного. Кроме основного назначения, легирующие добавки выполняют роль микрохолодильников, улучшая структуру и механические свойства отливок. Таким избирательным воздействием можно получать детали, легированный слой которых оказывается на поверхности после механической обработки, или детали с внутренней легированной зоной, выполняющей роль арматуры.

Одним из путей повышения технологичности изготовления деталей является замена части отливки простой или повторяющейся формы на элементы, полученные волочением или прокатом, а также непрерывным литьем. Технологичность готового изделия в этих случаях зачастую оказывается выше, чем у монолитного.

Особым видом композиционных отливок являются узлы, в которых чередуются слои магнитного и немагнитного материалов. К таким отливкам относятся роторы и статоры электродвигателей и другого электротехнического оборудования, а также специальная литейная модельная оснастка для формовки в магнитном поле. Применение для изготовления таких деталей методом композиционного литья позволяет резко сократить объем механических и сборочных операций, повысить производительность труда.

Экономичный метод формообразования деталей – композиционное литье – успешно развивается. В этом залог повышения эксплуатационной надежности отливок, залог возрастающей конкурентоспособности литья по сравнению с другими видами заготовительного производства.

1.6. Примеры изготовления композиционных отливок

1.6.1. Композиционные отливки вставок пресс-форм литья под давлением

Технология получения отливок литьем под давлением (ЛПД) имеет следующие преимущества перед другими специальными способами литья:

- широкая гамма сплавов для отливок;
- высокая геометрическая точность (размерная точность, качество поверхности, пространственные отклонения, точность конфигурации);
- максимальная приближенность конфигурации, размеров и массы отливок к готовой детали;
- снижение объемов механической обработки с одновременным сохранением зоны мелких дезориентированных кристаллов на поверхности отливок;
- высокая производительность литейного оборудования, предпосылки полной автоматизации процесса;
- возможность использовать для литья высокотемпературные сплавы и сплавы с широким интервалом кристаллизации;
- значительное улучшение санитарно-гигиенических условий труда, меньшее загрязнение окружающей среды.

Наряду с указанными преимуществами ЛПД имеет и ряд недостатков, в том числе следующие:

- габаритные размеры и масса отливок ограничены мощностью машины (усилием запираания);

– высокая стоимость пресс-форм, сложность и трудоемкость их изготовления, низкая стойкость, особенно при литье медных сплавов и сплавов черных металлов, что снижает эффективность процесса и ограничивает область его использования.

Служебные характеристики существующих инструментальных материалов (хромовольфрамованадиевая, хромомолибденованадиевая сталь) не позволяют значительно повысить стойкость пресс-форм и их элементов (вставки, стержни и др.), а в некоторых случаях и вовсе неприменимы. Поэтому возникает необходимость использования принципиально новых материалов, удовлетворяющих многообразным и противоречивым требованиям, предъявляемым к формообразующей оснастке ЛПД.

Одним из перспективных материалов для оснастки ЛПД отливок из высокотемпературных сплавов на основе меди и железа являются мартенситно-стареющие стали. По конструкционной прочности и технологичности эти стали превосходят ныне применяемые инструментальные материалы. Основой этих сталей являются сплавы железа с содержанием углерода менее 0,03 %, Ni – 8...25 %, легируемые Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами.

Высокая прочность достигается совмещением двух механизмов упрочнения: мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения (с образованием твердого раствора замещения) и старения мартенсита. Легирование твердого раствора также увеличивает прочность. Никель стабилизирует γ -твердый раствор, сильно снижая температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, которое даже при невысоких скоростях охлаждения протекает по мартенситному механизму. Закалка этих сталей протекает на воздухе при 800...860 °С. При нагреве легирующие элементы переходят в γ -раствор и при охлаждении не выделяются. Прочность сталей, например, 03Н12К15М10 после закалки достигает $\sigma_B = 900...1100$ МПа в сочетании с высокой пластичностью. Дальнейшее упрочнение стали достигается при старении (480...520 °С), при этом из мартенсита выделяются мелкодисперсные вторичные фазы (Ni₃Ti, NiAl, Fe₂Mo, Ni₃Mo и др.), когерентно связанные с матрицей.

Механические свойства стали 03Н12К15М10 после старения:

- предел прочности σ_B – 2500 МПа;
- условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – 2400 МПа;
- относительное удлинение δ – 6 %;
- относительное сужение ψ – 30 %.

Стали этого класса имеют малую чувствительность к надрезам, высокое сопротивление хрупкому разрушению, что обеспечивает высокую конструкционную прочность в широком диапазоне температур. Важным достоинством этих сталей является технологичность: неограниченная прокаливаемость, хорошая свариваемость, легкость обработки резанием после закалки, отсутствие коробления и обезуглероживания при термообработке. Таким образом, свойства мартенситно-стареющих сталей в большей степени удовлетворяют условиям работы пресс-форм и их элементов для ЛПД: термической усталости, термостойкости, необратимым формоизменениям, формостойкости и износостойкости. Однако механическая обработка резанием этих сталей по-прежнему остается длительным, дорогостоящим процессом.

Поэтому была создана технология получения литых композиционных пресс-форм ЛПД. Реализация свойств композиционных отливок определяется геометрическими параметрами и строением контактной зоны, что зависит от диффузионных процессов. Особое значение диффузионные процессы имеют при изготовлении композиционных отливок методом пропитки пористых металлокерамических оболочек матричным металлом, что и было заложено в основу данной работы.

В качестве базовой технологии получения пористой металлокерамической оболочки (ПМКО) принято плазменное напыление порошков металла в атмосфере аргона, который при наличии теплового и магнитного пинч-эффекта повышает температуру плазмы до 14000 К. Для создания окислительной, восстановительной, либо нейтральной среды плазмообразующего газа (при необходимости), рассчитывали энтальпию смеси газов по формуле:

$$H_{\text{см}} = H_1 \left(\frac{M_1 r_1}{M_{\text{см}}} \right) + H_2 \left(\frac{M_2 r_2}{M_{\text{см}}} \right) + \dots + H_n \left(\frac{M_n r_n}{M_{\text{см}}} \right), \quad (1.11)$$

где H_1, H_2, H_n – энтальпия компонентов смеси;

M_1, M_2, M_n – молекулярная масса компонентов смеси;

$M_{\text{см}}$ – молекулярная масса смеси;

r_1, r_2, r_n – объемные доли компонентов смеси.

Молекулярная масса смеси определяется по формуле:

$$M_{\text{см}} = M_1 r_1 + M_2 r_2 + \dots + M_n r_n. \quad (1.12)$$

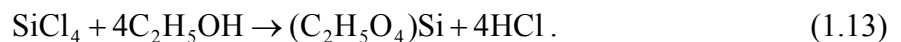
Состав смеси порошков подбирался исходя из химического состава выбранной мартенситно-старяющей стали: в нашем случае сталь 03Н12К15М10.

Для напыления использовали универсальную плазменную установку УПУ-3 с горелкой ГН-5Р, которые имеют следующие преимущества:

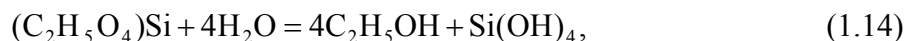
1. Универсальность – оболочка может наноситься из различных порошков на любой материал основы;
2. Легкость управления процессом: энергетические характеристики плазмы можно изменять в зависимости от требуемых параметров по толщине нанесенного слоя;
3. Возможность получения оболочек на сложной гравюре любой площади;
4. Поверхность литейной формы или стержня, на которую наносится оболочка, нагревается до температур не выше 1073 К, что позволяет сохранить геометрию и структуру гравюры;
5. Простота выбора плазмообразующего газа с целью снижения газонасыщенности и окисляемости порошков металла.

Литье вставок пресс-форм ЛПД производили в керамизированные формы по постоянным моделям.

В качестве опорного слоя применяли песчано-жидкостекольную смесь. Накладные тела для формирования зазора между моделью и опорным слоем изготавливали из полистирола методом свободного вакуумирования. В зазор заливалась суспензия, состоящая из диспергированных огнеупорных порошков (маршалит, циркон, электрокорунд и др.) и дисперсной среды – связующего-гидролизованного раствора этилсиликата. Технический этилсиликат марок 32, 40, 50 получали при взаимодействии четыреххлористого кремния с этиловым спиртом по реакции:



Для получения гидрата кремния $\text{Si}(\text{OH})_4$, связывающего огнеупорные частицы друг с другом, технический этилсиликат $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_4)\text{Si}$ подвергали гидролизу по реакции:



который после высыхания превращается в твердый стекловидный материал.

Последующие операции сводились к термообработке керамизированного слоя, нанесению на него полиалюмоэтилсилоксанового лака, напылению порошкообразной оболочки, сборке формы и заливке матричным металлом.

Литые вставки обрабатывались только по плоскостям смыкания с пресс-формой. Базой мехобработки служила плоскость смыкания матрицы с пуансоном машины ЛПД, либо (в зависимости от конфигурации гравюры) литая поверхность вкладыша. Рабочая полость вкладыша представляла однородную поверхность 7-го класса по ГОСТ 2789-95. Исследование термостойкости проводилось подсчетом циклов теплосмен (ц.т.) и показало количество ц.т. до появления трещин, сетки разгара на 50 % превышающее ц.т. вкладышей из стали 40Х5МФС при литье медных сплавов.

1.6.2. Композиционные износостойкие отливки, упрочненные металлокерамическими и литыми оболочками

Технология получения композиционных износостойких отливок предусматривает изготовление пористых металлокерамических оболочек (ПМКО) из порошков металлов, установку их в полость литейной формы и заполнение ее матричным расплавом. При этом на поверхности отливок формируется композиционный рабочий слой, свойства которого можно изменять в широких пределах в зависимости от материала металлокерамики. Предварительные эксперименты, направленные на подбор порошка металла, позволили обосновать целесообразность применения порошка сормайта, как дешевого и недефицитного износостойкого материала, в смеси с технологической связкой - железным порошком. Изготовление ПМКО включает приготовление термопластичного шликера (85 мас.% металлического порошка, 15 мас.% пластификатора), прессование из него сырцов с последующим обжигом. Парафин-полиэтиленовый пластификатор позволяет получать тонкостенные фасонные оболочки при давлении запрессовки шликера 1,0...2,0 МПа.

Особенностью обжига оболочек является удаление пластификатора и твердофазное спекание порошка. Обжиг проводится в засыпке адсорбента – оксида алюминия. Установлено, что углеводороды, служащие пластификатором, при высоких температурах обжига возгоняются и активно взаимодействуют с порошком металла – происходит науглероживание, особенно интенсивно при температуре выше A_{c3} . Науглероживание сормайта проявляется в увеличении микротвердости зерен и количества карбидов хрома, связывающих углерод.

Для уменьшения или устранения науглероживания необходимо вывести пластификатор из оболочки в адсорбент в жидком состоянии (при 370...390 К), а затем удалить его возгонкой из короба до температуры $\alpha \rightarrow \gamma$ – превращения железа. Для обеспечения перемещения пластификатора из ПМКО необходимо, чтобы адсорбционная способность засыпки была больше адсорбционной способности пластифицированных порошков металлов. Это достигается применением оксида алюминия дисперсностью 5...50 мкм, а металлического порошка – 100...300 мкм.

Увеличенная по сравнению с компактными материалами степень насыщения порошков металлов углеродом обусловлена высокоразвитой поверхностью и более высокой плотностью дефектов кристаллического строения. За счет изменения режима обжига получены ПМКО из железного порошка с содержанием углерода 0,15...0,55% (при более высоком содержании углерода ухудшается пропитка металлокерамики матричным металлом).

Особенностью получения ПМКО из порошка сормайта является их неудовлетворительная прочность после обжига, что объясняется наличием на поверхности зерен пленки оксида хрома, препятствующей спеканию. Поэтому в качестве связующего материала при спекании сормайта выбран порошок железа ПЖ4МЗ в количестве 30...40 %.

При этом металлокерамика имеет пористость 52...58 %, плотность 3200...3500 кг/м³ и достаточную технологическую прочность ($\sigma_B=3,7...5,0$ МПа).

Вследствие того, что порошки, входящие в состав ПМКО, существенно отличаются по химическому составу, при спекании протекают интенсивные процессы диффузии. Зерна железа, находясь в контакте с зернами сормаита, насыщаются хромом, углеродом и другими элементами и превращаются в легированную сталь, микротвердость их увеличивается в 2,5 раза.

Расчет эффективных коэффициентов диффузии легирующих элементов в γ -железо по данным микроанализа показывает, что они на один-два порядка выше коэффициентов диффузии в компактных материалах и близки значениям граничной диффузии. Интенсивная диффузия элементов при спекании может привести к заметному выравниванию концентрации углерода, хрома, никеля, кремния, марганца по сечению ПМКО и потере свойств исходных порошков. Так, например, в гексагональном карбиде (Cr_7C_3) железо может замещать до 50 % хрома, то есть карбиды теряют свои первоначальные твердость и износостойкость. Поскольку глубина диффузионного проникновения элементов зависит от температуры нагрева и продолжительности выдержки при высоких температурах, то для получения ПМКО из смеси порошков сормаита и железа рекомендован режим обжига – твердофазное спекание при 1270...1370 К в течение 1,0...1,5 ч.

Условием получения композиционных отливок с применением ПМКО является качественная пропитка металлокерамики матричным расплавом. Установлено, что процесс пропитки состоит из связанных между собой стадий:

- смачивание поверхности ПМКО матричным расплавом и взаимодействие на границе раздела двух фаз;
- движение и затвердевание расплава в капиллярах.

Смачивание ПМКО наступает при прогреве ее до температуры 0,8 матричного металла, и после этого начинается пропитка оболочки под влиянием капиллярного давления и металлостатического напора. Кроме того, расчеты показывают, что при этой температуре пробег атомов железа за счет самодиффузии на границе раздела достигает значений, обеспечивающих прочную связь. В форме матричный металл интенсивно охлаждается, поэтому продолжительность пропитки оболочки должна быть меньше продолжительности стадии отвода теплоты перегрева расплава. При этом чрезмерный перегрев матричного чугуна недопустим, так как сормайт в ПМКО и серый чугун имеют близкие по величине температуры плавления и возможно полное разрушение металлокерамического скелета и распределение зерен по всему объему отливки. В этом случае цель применения ПМКО не будет достигнута.

Предложена математическая модель процесса теплообмена в многослойной системе «стержень – ПМКО – расплав – окружающая среда» при пропитке в форме пористой металлокерамической втулки. Модель представлена следующим образом: при прогреве ПМКО выше температуры $0,8T_{пл}$ ($T_{пл}$ – температура плавления) матричного металла происходит смачивание и растекание чугуна по поверхности и начинается проникновение в капилляры. Движение расплава по капиллярам ПМКО продолжается вплоть до достижения температуры нулевой жидкотекучести. Анализ термических условий формирования композиционной отливки сведен к решению задачи теплопроводности численным методом (методом прямых). Расчетные зависимости позволяют найти значения температуры после заливки формы в любой точке системы.

Особенностью пропитки чугуном ПМКО из сормаита являются плохие смачивание и пропитка, ввиду наличия на поверхности пленки оксида хрома. Смачивание и растекание наступает только после восстановления оксидной пленки углеродом матричного чугуна, а это требует длительного контакта расплава с ПМКО (0,5...1,0 ч), что обеспе-

чить в литейной форме сложно. При соблюдении тепловых условий пропитки улучшение смачивания и пропитки металлокерамики из сормайта достигается за счет обработки ее бурой и введения в состав ПМКО порошка железа, хорошо смачиваемого чугуном. При этом краевой угол смачивания уменьшается и чугун растекается по поверхности ПМКО, проникает в открытые поры и дальше по капиллярам.

Для получения алюминиевых отливок с повышенной твердостью и износостойкостью, их поверхности также упрочняли ПМКО из сормайта с железным порошком. Из-за того, что пленообразующие сплавы не смачивают ПМКО, пропитка их под действием капиллярных сил не происходит. Поэтому пропитку оболочек осуществляют путем внешнего давления на алюминиевый расплав методом жидкой штамповки.

Микроструктура композиционных отливок формируется в процессе пропитки ПМКО матричным металлом и последующей кристаллизации. Движение жидкого металла по капиллярам металлокерамики сопровождается интенсивной диффузией, в результате чего происходит изменение химического состава контактирующих фаз, оплавление и частичное растворение зерен ПМКО. Это приводит к образованию новых структур и свойств поверхностного слоя отливки, отличающихся от свойств спеченной металлокерамики и пропитываемого металла. Чугун, по мере продвижения по капиллярам, теряет часть углерода и легируется хромом, никелем и марганцем, диффундирующим из зерен сормайта.

В зерна легированной стали (видоизмененные в ходе спекания зерна порошка железа) из сормайта проникают углерод, кремний, хром, никель, марганец и дополнительно из чугуна – углерод и кремний.

Композиционный слой отливки состоит из перлита с колониями хромистых карбидов в количестве 45...55 %; фазовый состав представляет α -железо, карбиды хрома (Cr_3C_2) и легированный цементит, что обеспечивает повышение твердости и износостойкости поверхности чугунных отливок в заданном месте. Переходная зона отливки характеризуется ледебуритной структурой, вследствие насыщения матричного чугуна легирующими элементами из ПМКО. Отмечено, что чем больше порошка сормайта в ПМКО, тем большую протяженность имеет ледебуритная зона, переходящая затем в структуру половинчатого чугуна (перлит и 10 % ледебурита) и далее серого чугуна с перлитной матрицей. В переходной зоне отмечено постепенное снижение концентрации легирующих элементов по направлению к матрице. Композиционный слой имеет высокую твердость на всем протяжении, в переходной зоне наблюдается повышение твердости, что связано с формированием ледебуритной структуры, а затем идет ее снижение в направлении к матрице. Изменяя соотношение порошков железа и сормайта в составе ПМКО можно регулировать твердость поверхностного слоя отливок в пределах 330...500 НВ. Увеличение твердости композиционного слоя до 550 НВ получено при применении низколегированного матричного чугуна. После закалки в масле с температуры 1090 К твердость возрастает до 640 НВ. Композиционный слой на отливках, упрочненных ПМКО из сормайта с железом, позволил увеличить износостойкость чугунных деталей в 1,8...2 раза.

При пропитке ПМКО из сормайта с железом алюминиевыми сплавами диффузионные процессы между расплавом и зернами ПМКО практически отсутствуют. Структура композиционного слоя состоит из карбидной эвтектики ($H_{50}=5700...8000$ МПа), карбидов хрома ($H_{50}=11000...13000$ МПа) и зерен феррита ($H_{50}=1030$ МПа) в матрице сплава АК7. Средняя твердость композиционного слоя, армированного ПМКО из смеси порошков сормайта и железа, составляет 130...140 НВ, что в 1,8 раза выше твердости матричного сплава АК7.

Результаты исследования антифрикционных свойств и износостойкости композиционных отливок свидетельствуют о сравнимости значений коэффициентов трения алюминиевого композиционного сплава ($f_{\text{кс}}=0,07$, при нагрузке $P=2$ МПа) с коэффициентами трения оловянистой бронзы Бр.012 ($f_{\text{бр}}=0,04$), а скорость изнашивания композиционного слоя на порядок меньше по сравнению с бронзой. Важно отметить, что величины коэффициентов линейного расширения алюминиевого композиционного сплава ($\alpha_{\text{кс}}=20 \cdot 10^6$ 1/К) и матричного сплава АК7 ($\alpha_{\text{АК7}}=27 \cdot 10^6$ 1/К) близки в области температур 290...770 К.

Особым вопросом является создание износостойкого недефицитного материала для инструмента, работающего в условиях абразивного износа при повышенных температурах, например, развертки стеклянных трубок. Решение этого вопроса за счет применения композиционных отливок, упрочненных металлокерамическими оболочками из порошков сормаита и железа, оказалось невозможным. При этом установлено, что с уменьшением количества железного порошка в ПМКО износостойкость композиционных отливок растет. Поэтому логичен переход к изготовлению композиционного инструмента, состоящего из стальной арматуры с точной оболочкой из сормаита. При оценке износостойкости деталей из литого сормаита установлено, что наилучшие эксплуатационные свойства имеет сплав с повышенным содержанием углерода (до 6 %). Однако, такие чугуны эвтектического типа склонны к транскристаллизации и, как следствие, в структуре имеются массивные первичные карбиды повышенной хрупкости. Измельчение структуры сормаита достигали при применении композиционных отливок путем создания условий объемной кристаллизации тонкостенных оболочек (толщиной 5...8 мм), охлаждаемых со стороны формы и стальной арматуры, служащей холодильником. Металлографический анализ показал, что в оболочках из высокоуглеродистого сормаита отсутствуют столбчатые кристаллы и структура представляет собой аустенито-хромисто-карбидную эвтектику с включениями первичных хромистых карбидов в виде игл многогранной формы. Суммарная площадь сложных хромисто-железных карбидов составляет 60 %. Переходный слой на границе «сормайт – стальная арматура» имеет структуру легированного перлита, поскольку формируется в условиях интенсивной диффузии углерода и легирующих элементов из расплава в арматуру при кристаллизации и охлаждении отливок. Ширина переходного слоя составляет 60...80 мкм. Таким образом, получены композиционные отливки с твердостью рабочей поверхности 61...63 HRC при сохранении более мягкой феррито-перлитной структуры стальной арматуры.

Вследствие того, что высокоуглеродистый сормайт поддается только механической обработке шлифованием, разработана технология получения отливок с низкой шероховатостью поверхности (5 и 6 классу по ГОСТ 2789-95) литьем в керамизированные формы.

1.6.3. Отливки из чугуна, армированные стальной проволокой и композиционными оболочками

Технология получения армированных отливок предусматривает изготовление армирующего каркаса из стальной проволоки, установку каркаса в полость литейной формы и заливку ее чугуном. Армированная отливка имеет максимальную прочность при использовании проволоки минимально допустимого диаметра. При этом должны быть сохранены ее основные исходные свойства в композиционной отливке и обеспечена диффузионная связь матрицы (чугуна) и арматуры (стали). В качестве армирующей

щих каркасов, применяются тканые и плетеные сетки из мягкой низкоуглеродистой проволоки.

Установлена высокая технологичность применения стальных плетеных одинарных сеток из проволоки любой жесткости, которые легко принимают необходимую конфигурацию при установке их в полость литейной формы. Это связано с возможностью перемещения отдельных проволочных элементов относительно друг друга.

Для определения оптимальных параметров процесса армирования построена физическая модель элементарной ячейки армированного металла и математическая модель процесса теплообмена в системе «арматура – матрица – окружающая среда». Элементарной ячейкой упорядоченной модели макроструктуры армированной отливки является цилиндр радиуса R_1 и единичной высоты, по оси симметрии которого расположено цилиндрическое армирующее волокно радиуса R_0 .

Анализ термических условий формирования композиционной отливки сведен к решению задачи теплопроводности для цилиндра (армирующего волокна) при граничном условии третьего рода. Последнее учитывает изменение теплосодержания матрицы и теплоотдачу от матрицы в окружающую среду.

Это решение получено методом функционального ряда. Расчетные зависимости позволяют найти значения температуры в любой момент времени и в любой точке армирующего элемента, а также закон изменения температуры и затвердевания матричной фазы.

С помощью полученного решения выполнены расчеты и построены графики для определения степени армирования, удовлетворяющей условию качественного контакта чугуна с поверхностью стали.

При этом установлены количественные закономерности влияния армирующего элемента на кинетику затвердевания и, как следствие, на структуру и свойства матричной фазы и отливки в целом. В частности, показано, что влияние арматуры на кинетику затвердевания матрицы оказывается несущественным, если степень армирования $m=d/H < 0,4$; где d – диаметр арматуры, H – шаг армирования.

Металлографические исследования структуры армированных образцов показывают, что взаимовлияние арматуры и матрицы на изменение их структур проявляется в пределах переходного слоя, толщина которого лежит в пределах 100...350 мкм, имеет структуру от перлитно-цементитной до феррито-перлитной и определяется диффузией углерода из расплава чугуна в арматуру на стадии отвода теплоты перегрева.

Армирование заметно влияет на увеличение предела прочности чугуна на разрыв, изгиб и сжатие. Например, при применении в качестве арматуры плетеной сетки из канатной проволоки диаметром 1 мм с объемной долей арматуры в отливке 25 %, прочность чугуна СЧ 20 увеличивается в два раза, предел прочности на изгиб составляет 800...1000 МПа против исходного значения 360 МПа, а предел прочности на сжатие увеличивается на 40 %.

Армирование положительно влияет на термостойкость чугуновых кокилей. Установлена прямая связь механических свойств и термостойкости армированных чугунов с различной структурой. Для оценки термостойкости армированных чугунов использовали параметр

$$Z_0^1 = \frac{0,8\sigma_A m^2 + \sigma_M(1 - 0,8m^2)}{\alpha[(0,8m^2 E_A + E_M(1 - 0,8m^2)]}, \quad (1.15)$$

где σ_A и E_A – прочность и модуль упругости арматуры, соответственно;

σ_M и E_M – прочность и модуль упругости материала матрицы, соответственно;

α – коэффициент теплоотдачи;

$$m = \frac{d}{H} - \text{степень армирования};$$

d – диаметр арматуры;

H – шаг армирования.

При выводе критерия Z_0^1 использовано правило аддитивности.

Для повышения износостойкости чугунных отливок, а также для создания устойчивой технологии изготовления отливок с тонкими внутренними полостями предложено использовать композиционные оболочки. Предложен оригинальный способ изготовления композиционных оболочек из пластифицированных порошков железа и меди совмещенным индукционным нагревом в адсорбенте, что приводит к образованию каркаса из железного порошка и пропитке его расплавом меди. Формирование каркаса состоит из двух этапов: удаления пластификатора и твердофазного спекания частиц порошка. Для сохранения конфигурации заготовки необходимо обеспечить равномерное удаление пластификатора, что достигается управлением скоростью нагрева и выбором опорного адсорбирующего материала. Температурный режим второго этапа определяет полноту спекания металлических порошков.

При совмещенном процессе спекания каркас из железного порошка пропитывается расплавленной медью. При этом отпадает необходимость в герметизации контейнера, так как пропитка протекает в восстановительной атмосфере.

Движение меди в порах железного каркаса можно интенсифицировать применением ультразвука. При этом наиболее важным для пропитки является величина зазора между излучающей поверхностью и каркасом, так как по мере увеличения зазора происходит резкое падение ультразвукового давления.

Заливка композиционных оболочек чугуном в литейной форме приводит к диффузионному соединению чугуна с железной составляющей композиционной оболочки. Влияние меди на процесс соединения матрицы с арматурой не является существенным.

Одним из объектов использования композиционных оболочек являются чугунные детали с износостойкой рабочей поверхностью - подшипники скольжения, детали гидроаппаратуры с тонкими полостями и каналами.

1.6.4. Композиционные отливки с гальванопластическими и литыми элементами

Исследованы факторы, влияющие на формирование качественной диффузионной связи между матричным чугуном и литыми (без последующей механической обработки) элементами из железоуглеродистых сплавов. При получении композиционных отливок пресс-форм для изделий из органических масс и стекла определили условия, влияющие на протекание диффузионных процессов между никелевой оболочкой и матричным чугуном, а также медной оболочкой и матричным алюминием. Это температура заливки матричного металла и подогрева твердого элемента, их химический состав, поверхностные явления на границе контакта жидкого и твердого металлов.

Толщина переходной зоны увеличивается по мере повышения содержания углерода в расплаве и достигает максимума в чугуне эвтектического состава.

В системе твердый элемент-матричный металл к диффузионным барьерам, кроме оксидных плен, можно отнести также пороки водородного происхождения. При более высоком содержании водорода в стальном элементе по сравнению с матричным чугуном наблюдается диффузия водорода из глубины элемента к более прогретой поверх-

ности и молизация его на границе жидкой и твердой фаз. Это приводит к уменьшению эффективной площади их контакта.

Ухудшение качества соединения наблюдается и в том случае, когда заливка стальных элементов с исходным низким содержанием водорода производится чугуном с более высокой концентрацией водорода. Таким образом, при изготовлении композиционных отливок необходимо применять дегазированный металл и негасительные формы.

На толщину переходной зоны оказывает влияние также скорость диффузии, которая в затвердевшем слое матричного металла на два порядка меньше, чем в жидком. Для увеличения времени контакта жидкой фазы с твердым элементом используют перепуск заливаемого металла, а также воздействие ультразвука. Установлено, что после обработки ультразвуком переходная зона увеличивается на 20 %.

При малом градиенте концентрации углерода переходная зона не образуется даже при большом соотношении толщин «матричный металл – твердый элемент» и высокой температуре заливки. Для управления толщиной переходной зоны в этих случаях целесообразно использовать промежуточные слои. Например, цементация стального элемента на глубину до 300 мкм позволяет получить надежное соединение элементов композиции. Наоборот, предварительное никелирование стального элемента уменьшает толщину переходной зоны, что объясняется более низкими параметрами диффузии углерода в никеле.

При использовании гальванопластических оболочек изучены особенности образования переходных зон между медью и матричным алюминием, а также между никелем и железоуглеродистыми расплавами. Установлено, что для образования качественной связи гальванопластических оболочек с матричным металлом, их необходимо предварительно подвергать водородному отжигу.

Предварительное электролитическое покрытие медной оболочки цинком толщиной 40...50 мкм позволяет получить прочное и пластичное соединение с матричным алюминием благодаря образованию в переходной зоне слоя латуни. Качественное соединение с медной оболочкой обеспечивается также при применении цинкосодержащих сплавов. Для расчета коэффициентов диффузии цинка из расплава в твердую медь в этом случае изучали изменение химсостава в переходных зонах образцов, полученных при разных температурах и времени выдержки. Параметры диффузии определены с использованием уравнения Аррениуса:

- коэффициент диффузии $D_0 = 2,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$
- энергия активации – $Q = 169,33 \text{ кДж/моль}$.

Анализ результатов расчета показывает, что среднее значение энергии активации близко к литературным данным для твердофазной диффузии, а значение предэкспоненциального множителя выше. Последнее обусловлено более высокой плотностью дефектов кристаллического строения гальванопластической меди, что подтверждают результаты рентгеноструктурного анализа. По полученным данным плотность дефектов в гальванопластической меди на два порядка выше, чем в компактной. Данные о диффузии жидкого цинка в твердую медь ($\text{Zn}^{\text{ж}} \rightarrow \text{Cu}^{\text{тв}}$) использованы при расчете времени и температуры для получения необходимой толщины переходной зоны. Физико-механическими исследованиями установлено, что никелевые оболочки предпочтительней заливать чугуном, т.к. при заливке сталью происходит оплавление никеля и снижение его механических свойств.

При использовании точнолитых элементов композиции целесообразно отливать их в прокаленные керамические формы. Они не содержат газотворные составляющие, в том числе и конденсированную влагу. Однако, при применении керамических форм из-

за окисления поверхности отливок при медленном охлаждении происходит увеличение шероховатости. Ускорение охлаждения отливаемых элементов достигнуто при применении кокиля с керамической облицовкой на основе циркона. Это позволяет получать стальные элементы с шероховатостью поверхности по 6 классу ГОСТ 2789-95 и размерной точностью по 12 и 13 квалитетам.

При заливке матричным металлом твердых элементов также происходит окисление их рабочей поверхности. Для предотвращения окисления разработан состав керамической суспензии с графитом, позволяющий сохранить исходную шероховатость поверхности литого элемента после заливки матричным металлом.

При применении гальванопластических оболочек получены композиционные отливки с шероховатостью поверхности полости по 10 классу (ГОСТ 2789-95) и с размерной точностью по 9 квалитету.

Высокая геометрическая точность достигнута гальванопластическим формованием оболочек по металлической модели с шероховатостью поверхности 11 класса и заливкой алюминием до извлечения модели из оболочки с последующим удалением ее из композиционной отливки. Расчетами установлено, что удельное усилие, необходимое для извлечения модели, значительно меньше прочности связи алюминия с медной оболочкой.

В условиях мелкосерийного производства для изготовления отливок сложной конфигурации целесообразно применять разовые модели на основе парафина. При этом необходимо наличие достаточной размерной точности и токопроводящего слоя. Размерная точность моделей достигнута благодаря стабилизации усадки модельного состава за счет ввода порошкообразного наполнителя с низким коэффициентом термического расширения (КТР), например, двуокиси титана в количестве 60...80 масс. частей. Анализ процессов формирования разовых моделей с порошкообразным наполнителем позволил предложить математическое описание зависимости величины усадки от физических свойств компонентов модельного состава:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\alpha_H - 1,15 \cdot 10^{-5} \sqrt[3]{\gamma_H \left(\frac{1}{C_H} - 1 \right)}}{0,025 - 2,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[3]{\gamma_H \left(\frac{1}{C_H} - 1 \right)}}, \quad (1.16)$$

где: $\frac{\Delta l}{l_0}$ – усадка модельного состава;

$$\Delta l = l_0 - l_m;$$

l_0 – линейный размер пресс-формы;

l_m – линейный размер разовой модели;

α_H , γ_H и C_H – КТР, плотность и концентрация наполнителя, соответственно.

Усадка парафиновых моделей протекает и при комнатной температуре на протяжении двух суток после изготовления за счет релаксации внутренних напряжений. Поэтому сокращение времени выдержки модели перед гальванопластическим покрытием также позволяет повысить геометрическую точность гальванопластических элементов.

Придание электропроводности крупным моделям с гладким рельефом осуществляют путем покрытия их медным порошком в кипящем слое, а малогабаритным тонкорельефным – путем химического меднения.

Для устранения коробления гальванопластических оболочек, полученных по органическим моделям, заполняют полость легкоплавкими солями. При этом соль не долж-

на расплавляться до момента образования затвердевшего слоя металла на границе с гальванопластической оболочкой. Изыскание составов таких солей в связи с высокими скоростями протекания теплофизических процессов проводят на основе численных экспериментов.

Оптимизация процессов получения отливок выполнена путем реализации трехфакторного плана экспериментов. В качестве факторов X_n , определяющих прочность соединения на разрыв, выбраны:

- X_1 – температура заливки чугуна T_3 ;
- X_2 – соотношение толщин стенок чугуна и никелевой оболочки Δ ;
- X_3 – температура подогрева никелевой оболочки T_n .

По результатам опытов получено уравнение регрессии:

$$Y = 151,1 + 37,7X_1 - 7,6X_2. \quad (1.17)$$

Анализ полученного уравнения регрессии показывает, что на прочность соединения никель-чугун существенно влияет температура заливки и соотношение Δ , а подогрев формы в интервале 290...570 К практически не влияет (X_3 исключен как незначимый фактор).

С помощью метода крутого восхождения получены следующие оптимальные значения факторов: $T_3=1740$ К, $\Delta=4,7$.

Разработанная технология изготовления композиционных отливок с фасонными оболочками, полученными по разовым моделям, обеспечивает размерную точность по 11 качеству, которая уступает на два качества точности отливок с оболочками, полученными по постоянным моделям. Шероховатость поверхности при этом также на два класса ниже.

1.6.5. Изготовление литых композиционных шарошек

Трехшарошечное долото – наиболее распространенный инструмент для бурения скважин. Большие и все возрастающие масштабы буровых работ, переменные свойства пород (от крепких до мягких), особенно при глубинном бурении, большие скорости вращения при высоких осевых нагрузках требуют все возрастающей эксплуатационной надежности от долота, и, в первую очередь, от главной его части – шарошки.

Одна из проблем технологии оснащения шарошки зубками – большая трудоемкость процесса. Механическое крепление зубков предусматривает сверление, развертывание и селекцию отверстий в корпусе шарошки, шлифовку и селекцию нескольких десятков порошковых зубков, ручное наживление их молотком в отверстиях и последующую запрессовку на прессе. Суммарная трудоемкость сборки составляет 56 % от общей трудоемкости изготовления шарошки. Объединение зубков литым корпусом не требует столь высокой точности от диаметра зубков и позволяет значительно снизить затраты труда. Однако изготовление отливки шарошки осложняется ее конфигурацией, не позволяющей свободно извлекать модель из формы. Немногочисленные технологические решения связаны с применением сложных разъемных моделей и необходимостью устанавливать зубки в гнезда форм изнутри. Такие способы применимы для получения только крупных шарошек и не обеспечивают надежного закрепления зубков в форме.

Основной причиной, препятствующей применению литых шарошек, является низкая вязкость литого металла, которая определяет способность корпуса сопротивляться ударам и усталости. Повышенные требования к свойствам металла корпуса диктуются конструкцией корпуса, имеющего многочисленные отверстия для зубков и другие кон-

центраторы напряжений. Вместе с тем, при оснащении литой шарошки объемно-армированными зубками со стальным хвостовиком корпус шарошки практически монолитен вследствие образования диффузионного соединения зубков с корпусом и идентичности материалов хвостовика и корпуса. Работа разрушения литых образцов на 60% выше, чем образцов из проката. При испытании на выносливость гладких образцов из композиционных отливок и образцов из проката долотной стали с концентратором напряжений, предел выносливости отливок в 1,44 раза выше, чем образцов из проката. Это позволяет сделать вывод об удовлетворительном качестве литого корпуса.

При использовании порошковых зубков из твердого сплава образование диффузионного соединения между зубками и корпусом не позволяет считать корпус монолитным, так как свойства порошкового твердого сплава отличаются от свойств стали; конструкционная прочность такого корпуса будет существенно отличаться от прочности корпуса с объемно-армированными зубками.

Низкая вязкость литого металла является следствием недостаточного питания отливки в двухфазной зоне, а также засоров и газовых раковин, как экзогенного, так и эндогенного характера. Для получения здоровой отливки с высокими механическими свойствами корпуса шарошек отливают в кокили, охлаждаемые водой и сжатым воздухом; в прибыль подают воздушное давление от компрессора. Давление в прибыли подавляет образование газовых раковин и оказывает многообразное действие на кристаллизацию металла: измельчает дендриты, способствует лучшему питанию отливки. Ускоренное охлаждение уменьшает глубину двухфазной зоны, что снижает пористость металла, измельчает зерно. Исследования, проведенные на стали У8Л, показывают, что плотность стали повышается до 7820 кг/м^3 , прочность металла – на 32 %, относительное сужение – на 57 %, ударная вязкость – на 100 %.

Эти характеристики позволяют применять полученные отливки для изготовления шарошек, работающих в мягких и средних породах.

Для обеспечения надежного закрепления зубков в корпусе шарошки необходимо формирование диффузионного соединения между зубками и корпусом.

При заливке стали на твердосплавный порошковый зубок происходит образование диффузионного соединения; переходная зона без видимых дефектов. Однако зубок после заливки становится хрупким. Изучение микроструктуры показывает, что в теле зубка образуются кристаллы двойных железвольфрамовых карбидов (η -фаза) диаметром 40...80 мкм, которые располагаются на глубине до 2,0...2,5 мм от границы с отливкой. Переходная зона «сталь – твердый сплав» состоит из скопления кристаллов η -фазы; с удалением от границы с зубками в стали она образует эвтектику $\gamma+\eta$. Установлено, что кобальтовая связка твердого сплава в переходной зоне почти полностью отсутствует и обнаруживается в твердом сплаве на глубине 2,5...2,7 мм.

Эти данные позволяют сделать вывод о миграции железа в порошковый твердый сплав. Карбид вольфрама растворяет некоторое количество железа, хрома, а вольфрам и углерод из твердого сплава диффундируют в сталь, что приводит к образованию η -фазы. Миграция железа и диффузия вольфрама и углерода являются причинами хрупкости твердого сплава и переходной зоны.

Изучали влияние основных технологических факторов литья на интенсивность диффузии и путь миграции, которые косвенно оценивали по ширине переходной зоны и глубине залегания кристаллов η -фазы. Получены соответствующие выражения:

$$\frac{\Delta}{d} = 0,004 \left(\frac{M}{m} \right)^{0,436} \cdot \left(\frac{T_3}{T_\Phi} \right)^{0,505} ; \quad (1.18)$$

$$\frac{L}{r} = 9,279 \cdot 10^{-3} \left(\frac{M}{m} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{T_3}{T_\phi} \right)^{0,897}, \quad (1.19)$$

где Δ – ширина переходной зоны;

L – глубина миграции;

d – диаметр зубка;

r – радиус зубка;

M – масса отливки;

m – масса зубка;

T_3 – температура заливки;

T_ϕ – температура формы перед заливкой.

Из этих формул видно, что обе величины зависят от интенсивности нагрева зубков. С целью уменьшения ее применяли медные холодильники. Это позволило полностью предотвратить миграцию железа и уменьшить ширину переходной зоны примерно в 10 раз. Получена зависимость ширины переходной зоны от технологических факторов:

$$\frac{\Delta}{d} = 2,45 \cdot 10^{-4} \left(\frac{m_x}{m} \right)^{-1,09} \left(\frac{m_x}{M} \right)^{-0,99}, \quad (1.20)$$

где m_x – масса холодильника.

Критические значения величины m_x/m и m_x/M равны соответственно 0,09 и 10,072. Их увеличение приводит к несвариванию зубков с отливкой вследствие несмачивания зубка сталью. Вместе с тем, микроструктура переходной зоны содержит компактные включения хрупкой η -фазы. Сравнительный анализ диаграмм состояния систем Co-W-C и Ni-W-C показывает, что при замене кобальта никелем вероятность образования η -фазы снижается, а образовавшиеся кристаллы ее будут меньших размеров. Нанесение на зубок никелевого покрытия толщиной 60 мкм предотвращает образование η -фазы в теле зубка, размеры кристаллов η -фазы в переходной зоне уменьшаются в 4...5 раз. Покрытие толщиной 200 мкм полностью предотвращает образование компактных включений η -фазы. Покрытие зубка никелем не устраняет миграции, поэтому для получения качественного соединения стали и зубка необходимо совместное применение никелевого покрытия и принудительного охлаждения. Прочность связи зубка с отливкой в этом случае в 1,4 раза выше, чем при механическом креплении.

Соединение стали со стальным хвостовиком объемно-армированного зубка требует, напротив, разогрева зубка до более высоких температур, что сложно по технологическим причинам. Для интенсификации образования диффузионного соединения применяют цементацию зубков и покрытие их никелем. При заливке сталью никелевое покрытие расплавляется, и никель диффундирует в зубок; углерод в цементованном слое способствует диффузии никеля в железо. В присутствии никеля более активно протекает диффузия атомов железа из отливок в зубок и из зубка в отливку. После затвердевания образуется переходная зона глубиной в 5 раз больше, чем толщина покрытия; структура зоны – аустенит, массовая доля никеля в котором около 12 %. Прочность связи объемно-армированных зубков с отливкой в 1,8...2,2 раза выше, чем механической.

Для обеспечения высокой контактной выносливости поверхности качения формируют втулками из проката долотной стали, обладающей высокой степенью чистоты по неметаллическим включениям. Выбор технологических параметров литья, обеспечивающих сваривание корпуса и втулки, осуществляется расчетным путем. Температурное поле многослойной среды «форма – облицовка – отливка – втулка – стержень» описывали дифференциальными уравнениями теплопроводности Фурье при граничных

условиях 4-го рода. Это позволило исследовать изменение температуры вблизи границы отливки и втулки. Критерием образования соединения выбрали проплавление втулки на глубину 50 мкм. С целью облегчения проплавления поверхностного слоя втулку цементировали. Расчетным путем установлено, что расплавившийся поверхностный слой втулки затвердевает после того, как кристаллизуется прилегающий к нему слой металла отливки. При этом неизбежно должны образовываться усадочные дефекты, однако на практике этого не происходит. Расчет диффузии углерода показал, что при контакте цементованной втулки с расплавленным металлом углерод интенсивно диффундирует в отливку. Вследствие этого в поверхностном ее слое температуры ликвидуса и солидуса металла снижаются, интервал кристаллизации расширяется. В результате фронт кристаллизации движется по направлению к центру отливки и усадочные дефекты не образуются. Между отливкой и втулкой образовывается диффузионное соединение.

Технология получения композиционного слоя (КС) из релита (наплавочный материал, наносимый на поверхность детали в целях резкого повышения износостойкости, а также восстановления размеров изношенных деталей). Состоит из порошковой смеси карбидов W_2C+WC в эвтектической пропорции; температура плавления сплава 2525 °С) со сталью на калибрующей поверхности стальной отливки шарошки включает изготовление оболочки (релит со связкой), установку ее в полость формы, заливку матричного металла. При этом на поверхности отливки формируется слой, содержащий зерна релита в металлосвязке из железоуглеродистого сплава.

Для получения оболочки готовят термопластичную пасту из пластификатора (сплав парафина с полиэтиленом) и порошков релита, железа и других металлов.

Оболочки устанавливают в форму и заливают сталь при температуре 1600...1610 °С. При заливке составляющие оболочки взаимодействуют с матричным металлом с образованием на поверхности отливки КС. Формирование КС происходит вследствие расплавления связующего теплом жидкой стали. Железный порошок, науглероженный при спекании, имеет температуру плавления ниже, чем заливаемая сталь. Релит частично растворяется в ней, уменьшаясь в размерах. Вольфрам и углерод релита образуют с железом η -фазу. Она выпадает по границам зерен релита, а также образует в межзеренном пространстве эвтектику с железом $\gamma+\eta$. Переходная зона между КС и отливкой имеет дендритную структуру; глубина зоны составляет в среднем 500...700 мкм.

На свойства КС большое влияние оказывает наличие в структуре металлосвязки η -фазы хрупкой составляющей.

Количество ее регулируется тремя способами:

1. Изменяя пористость оболочек и, таким образом, тепловые условия взаимодействия релита с расплавом стали;
2. Легируя матричный металл в межзеренном пространстве КС, уменьшая его способность растворять релит;
3. Формируя в межзеренном пространстве КС матричный металл такого состава, в котором растворимость релита была бы больше, чем в железе.

Радикальным средством, предотвращающим образование η -фазы, является плакирование зерен релита защитными пленками. При наличии на его поверхности химически осажденного никеля толщиной 10 мкм, двойные карбиды в структуре металлосвязки почти полностью отсутствуют.

Для получения отливок с повышенной стойкостью против абразивного износа без ударов разработана технология изготовления пластин из литого композиционного материала путем инфильтрации серым чугуном в форме оболочек из пористых порошковых твердых сплавов с релитом. Пластинами затем облицовывают литейную форму и

заливают в нее сталь. Пористые порошковые твердосплавные оболочки из релита с железным порошком, толщиной до 6 мм, пропитывают в форме путем перепуска над ними чугуна. После заливки чугуном металлосвязка КС имеет микроструктуру белого доэвтектического чугуна. Зерна железа, насыщенные углеродом из чугуна, растворяются в матричном металле и не сохраняют своей структуры. Вольфрам, диффундировавший из релита, образует с γ -железом и углеродом легированный цементит (υ -фазу), входящий в состав ледебуритной эвтектики; встречаются участки двойной $\gamma+\eta$ и тройной эвтектики $\alpha+\eta+\upsilon$. В месте контакта с матричным чугуном образуется переходная зона глубиной 400...700 мкм, имеющая структуру ледебурита. Микротвердость ледебурита составляет 9000...12000 МПа, что объясняется наличием в нем вольфрама, массовая доля которого около 6 %.

Литые композиционные пластины устанавливаются в форму и заливают сталью. При контакте со сталью образовывается переходная зона со структурой мартенсита. После отжига она распадается на феррито-цементитную смесь.

Испытания на износ при трении по закрепленному абразиву и при ударе по закрепленному абразиву показывают, что наибольшей стойкостью против чисто абразивного износа обладают композиционные слои, полученные инфильтрацией пористых оболочек из порошков релита и железа чугуном, а также оболочек из порошков меди и релита сталью. Однако они обладают наименьшей стойкостью против ударно-абразивного износа. Наибольшей стойкостью против ударно-абразивного износа обладают композиционные слои, полученные с применением порошков никеля, меди и ферромарганца (т.н. твердого припоя).

1.6.6. Получение композиционных отливок с качественной поверхностью при использовании металлокерамических оболочек

Многие эксплуатационные свойства литых деталей зависят от шероховатости их поверхности и структуры поверхностного слоя. При получении отливок с малой шероховатостью поверхности в ряде случаев возможно не производить их механическую обработку и сохранить мелкозернистый поверхностный слой – так называемую «литейную корочку». Это позволяет повысить стойкость литых деталей, например, формообразующей оснастки.

Структуру поверхностного слоя отливки можно улучшить его легированием при контакте жидкого металла с поверхностью литейной формы, содержащей легирующие элементы. Однако, в этом случае поверхность отливок получается грубой, что снижает эффект легирования.

Для получения отливок с заданной структурой поверхностного слоя и гладкой поверхностью разработан технологический процесс изготовления композиционных отливок с применением пористых металлокерамических оболочек.

1.6.6.1. Изготовление металлокерамических оболочек из горячих суспензий

Горячая суспензия состоит из 80...85 мас.% металлического порошка и 20...15 мас.% органического пластификатора и имеет малую седиментационную устойчивость из-за большой разницы в плотности наполнителя и пластификатора, что затрудняет изготовление фасонных оболочек.

Изучение кинетики расслаивания горячей суспензии осуществляли, измеряя величину ее электрического сопротивления в различных уровнях.

Наименьшей устойчивостью обладают суспензии, в которых пластификатором является чистый парафин. Добавка стеарина незначительно повышает устойчивость суспензии, и только при мелком порошке. Полиэтилен существенно увеличивает вязкость парафина и седиментационную устойчивость суспензии. Такие суспензии следует применять для изготовления тонкостенных оболочек, когда требуется повышенная температура заливки.

Текучесть суспензии зависит от температуры, состава и содержания пластификатора и размера частиц наполнителя. Суспензии на мелком порошке имеют более высокую текучесть, чем на крупном по двум причинам. Во-первых, они более устойчивы, а во-вторых, мелкие частицы имеют округлую форму, а крупные – осколочную, что затрудняет их перемещение при движении суспензии.

Величина усадки зависит от температуры суспензии и содержания полиэтилена в пластификаторе.

Оболочки изготавливаются запрессовкой суспензии под давлением $(0,5...1,5) \cdot 10^5$ Па в пресс-форму либо намораживанием на соляной стержень.

При понижении температуры суспензии толщина намораживаемой оболочки увеличивается, но при этом ухудшается воспроизводимость суспензией поверхности соляного стержня. Поэтому, температура суспензии должна быть не ниже 90 °С.

После намораживания соляной стержень удаляется из внутренней полости оболочки растворением в воде. Стержни можно изготавливать из солей «137» (KNO_3 (55 %) и NaNO_2 (45 %)), «218» (KNO_3 (55 %) и NaNO_3 (45 %)) и мочевины, которые хорошо растворяются в воде.

Процесс обжига оболочек состоит из двух этапов - удаление пластификатора и твердофазное спекание частиц порошка. При нагревании пластификатор плавится и оболочки теряют механическую прочность. Для сохранения геометрической формы оболочек обжиг проводится в засыпке адсорбента.

Стеарин оказывает существенное влияние на скорость удаления пластификатора в образцах из мелкого порошка. Стеарин, взаимодействуя с металлом порошка, образует соли жирной кислоты, т.е. мыла с общей формулой $(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})\text{Me}$. Молекулы мыла обладают резко выраженной дефиальностью, вследствие чего они адсорбируются на поверхности частиц дисперсной фазы. Концентрация молекул мыла в адсорбционном слое достаточно велика, поэтому адсорбционные оболочки обладают значительной вязкостью, что замедляет скорость удаления пластификатора. При повышении температуры обжига начинается диссоциация молекул мыла, и скорость удаления пластификатора увеличивается.

После удаления пластификатора начинается второй этап обжига оболочек – твердофазное спекание частиц порошка металла, которое происходит в результате протекания диффузионных процессов в контактных зонах.

Особенностью металлокерамики, полученной из горячей суспензии является значительная пористость (50...60 %), образующаяся после удаления пластификатора, и малая, но достаточная для технологических целей прочность $(0,5...2,5 \cdot 10^7$ Па).

Консолидация металлокерамики происходит в результате припекания частиц с образованием «шеек» в местах контакта.

Полученные пористые металлокерамические оболочки устанавливаются в литейную форму, при заливке которой поры металлокерамики заполняются жидким металлом.

1.6.6.2. Исследование процесса пропитки металлокерамических оболочек жидким чугуном

Необходимым условием заполнения пор металлокерамики жидким чугуном в литейной форме, является прогрев оболочки до температуры, не ниже температуры кристаллизации расплава. Аналитический расчет температурного поля в системе «чугун – металлокерамика – форма» осуществляется решением дифференциального уравнения теплопроводности Фурье методом конечных разностей. Анализ расчетных данных показывает, что необходимый для пропитки прогрев металлокерамики сложно обеспечить только за счет перегрева чугуна, в особенности при небольшой величине толщины слоя расплава R и толщине металлокерамики r . В таких случаях эффективно применять предварительный подогрев формы, либо перепуск металла.

На рис. 1.6 приведена номограмма, с помощью которой при известном отношении R/r , можно определить величину подогрева формы и перегрева чугуна, обеспечивающих прогрев металлокерамики и ее пропитку.

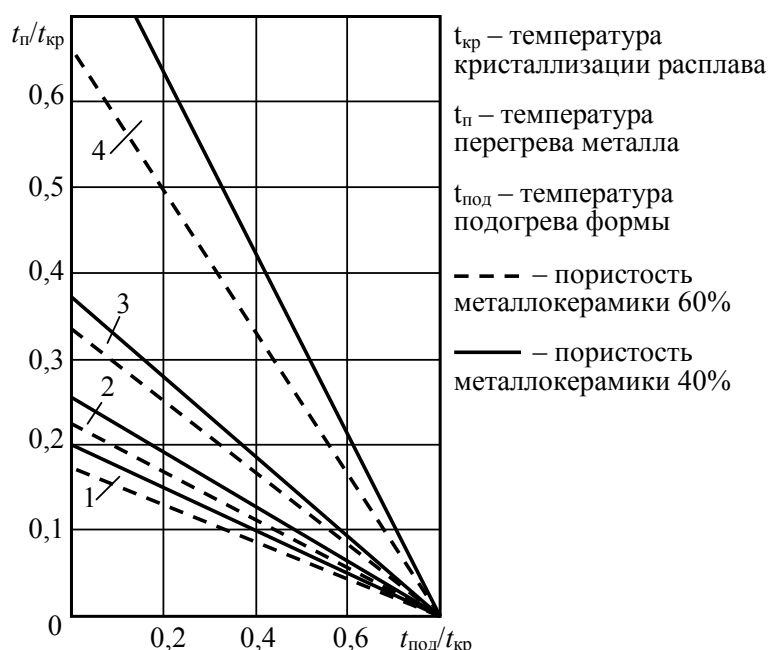


Рис.1.6. Номограмма для определения температур перегрева чугуна и подогрева формы, обеспечивающих прогрев и пропитку металлокерамики при различном отношении R/r : 10 (1); 5 (2); 3 (3); 1 (4)

Экспериментальное исследование пропитки металлокерамики серым чугуном подтвердило правильность расчетных данных. Получены уравнения регрессии для отливок с различным отношением R/r :

$$R/r = 1, \quad y = 3,0 + 1,6X_1 + 0,7X_2; \quad (1.21)$$

$$R/r = 2, \quad y = 4,18 + 2,16X_1 + 1,18X_2 + 0,54X_1X_2; \quad (1.22)$$

$$R/r = 3, \quad y = 5,51 + 2,57X_1 + 0,76X_2 - 0,3X_3; \quad (1.23)$$

$$R/r = 5, \quad y = 6,19 + 2,7X_1 + 1,15X_2 - 0,73X_3, \quad (1.24)$$

где y – глубина пропитки металлокерамики;

X_1 – температура заливки чугуна;

X_2 – температура подогрева формы;

X_3 – средний размер частиц металлокерамики.

Анализ уравнений показал, что при изготовлении композиционных отливок с отношением $R/r < 2$, глубина пропитки зависит от температур заливки чугуна и подогрева формы. Причем, коэффициент влияния первого фактора ($A_1=0,016$) на глубину пропитки на порядок больше, чем второго ($A_2=0,003$).

При изготовлении отливок с отношением $R/r > 2$, механизм влияния переменных факторов на параметр оптимизации меняется. Значимость приобретает коэффициент регрессии при третьем переменном факторе, т.е. размер частиц порошка. С увеличением толщины слоя чугуна коэффициент влияния фактора X_3 повышается. При уменьшении размера частиц порошка (в исследуемых пределах) глубина пропитки увеличивается, в связи с чем можно утверждать, что пропитка металлокерамики происходит под действием капиллярных сил.

Прочность соединения композиционного слоя с основным металлом отливки зависит от температуры заливки чугуна и отношения R/r .

При повышении температуры заливки выше $1450\text{ }^\circ\text{C}$ прочность связи композиционного слоя с чугуном у отливок с отношением $R/r=10$ уменьшается. Как показали исследования микроструктуры переходной зоны, это связано с полным растворением поверхностного слоя оболочки в жидком чугуне. В результате химический состав металла в этой зоне близкий к составу основной массы чугуна. При испытаниях на сдвиг разрушение происходит по основному металлу, прочность которого меньше, чем металла в композиционном слое.

Для интенсификации процесса заполнения пор применяется внешнее воздействие на расплав: центробежное давление и ультразвук.

Применение внешнего воздействия эффективно при пропитке металлокерамики из крупного порошка (средний размер частиц $15 \cdot 10^{-5}$ м). Глубина пропитки в этом случае в 2...2,5 раза больше, чем при обычной заливке.

Движение жидкого металла в порах металлокерамики сопровождается диффузией, в результате чего происходит изменение химического состава контактирующих фаз, оплавление и растворение зерен металлокерамики. Это приводит к образованию новых структур и свойств поверхностного слоя отливки, отличающихся от свойств металлокерамики и пропитывающего металла.

Если время контакта твердой и жидкой фаз достаточно большое, то частица металлокерамики полностью растворится, в противном случае произойдет лишь оплавление ее на некоторую глубину.

Время проникновения углерода расплава жидкого чугуна в центр частиц металлокерамики рассчитывали с учетом экспериментальных данных об изменении температуры в системе расплав-оболочка (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Время проникновения углерода в центр частиц металлокерамики из порошка железа

Температура, $^\circ\text{C}$	Коэффициент диффузии углерода, $\text{см}^2/\text{с}$	Время проникновение углерода в центр частиц (с), диаметром:	
		$3 \cdot 10^{-3}$ м	$13 \cdot 10^{-3}$ м
1100	$1,74 \cdot 10^{-7}$	12,9	242,8
1200	$3,85 \cdot 10^{-7}$	5,8	109
1300	$7,69 \cdot 10^{-7}$	2,9	54
1400	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,4	7,54

Как видно, время проникновения углерода в центр мелких частиц составляет примерно 13 с при температуре 1100 °С и значительно уменьшается при повышении температуры. Фактическое же время, в течение которого частицы находятся в контакте с жидким чугуном, значительно больше. В крупные частицы проникновение углерода происходит за более длительное время. Однако, следует учитывать, что крупные частицы порошка имеют разветвленную форму и поэтому можно считать, что диффузионный путь углерода в центр частиц меньше их радиуса.

В процессе пропитки создаются условия, при которых частицы металлокерамики изменяют свой состав, а, следовательно, и структуру, что подтверждают металлографические исследования композиционного слоя отливки.

При движении чугуна в порах металлокерамики содержание углерода в нем уменьшается. Поэтому разница в содержании углерода на поверхности и в переходной зоне отливки зависит от толщины металлокерамики. Например, при толщинах металлокерамики 0,008 и 0,003 м содержание углерода на поверхности композиционного слоя составило 0,7 и 1,7 %, соответственно. В соответствии с распределением углерода в композиционном слое отливки изменяются структура и твердость металла (рис. 1.7). При толщине металлокерамики 0,008 м наблюдали следующие зоны в композиционном слое: доэвтектоидной и заэвтектоидной стали, отбеленного чугуна, половинчатого и серого. При меньшей толщине металлокерамики первые две зоны отсутствуют, так как содержание углерода в композиционном слое больше 1 %.

Все структуры композиционного слоя являются неравновесными, так как образуются в условиях быстрого охлаждения. Так, структура поверхностных зон стали состоит из троостита (на глубине $l=0,0002...0,0005$ м микротвердость $H_{\mu}=3600...4000$ МПа), которая затем переходит в сорбит (на глубине $l=0,001...0,002$ м, микротвердость $H_{\mu}=3000$ МПа) и, лишь на глубине $l=0,004...0,005$ м появляется перлит (микротвердость $H_{\mu}=2000$ МПа). Средняя твердость у поверхности ниже (НВ240) из-за присутствия феррита. Максимальная твердость наблюдается в средней зоне композиционного слоя, где формируется структура отбеленного чугуна.

Использование внешнего давления на жидкий чугун (заливка во вращающиеся формы, обработка ультразвуком) позволяет осуществить пропитку металлокерамики с более низкой температурой, чем это необходимо при капиллярной пропитке. При этом скорость движения чугуна по капиллярам значительно больше, а время контакта его с частицами металлокерамики соответственно меньше. Поэтому, жидкий чугун заполняет поры металлокерамики со сравнительно малой потерей углерода и затвердевает на поверхности, образуя структуру белого чугуна. Из-за быстрого охлаждения расплава частицы металлокерамики не полностью расплавились, а диффузия углерода в них проходила, в основном, после затвердевания чугуна.

При пропитке чугуном металлокерамики из порошков металла с другими

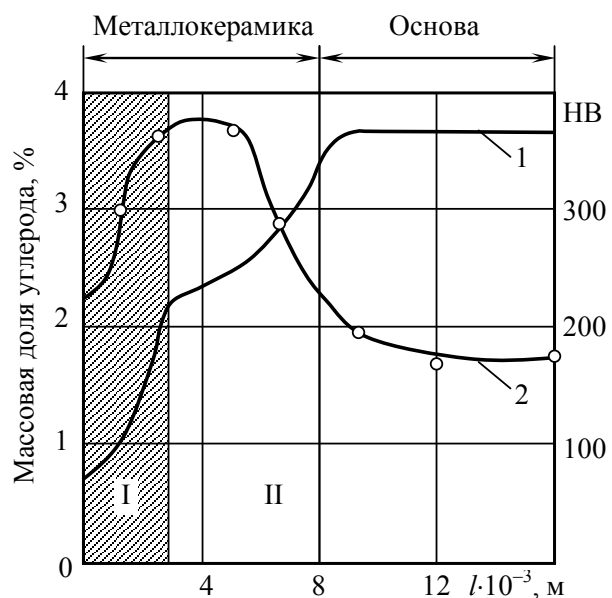


Рис. 1.7. Изменение твердости (2) и массовой доли углерода (1) в композиционном слое отливки: I – зона стали, II – зона чугуна

диффузионными параметрами, например, нихрома, формирование структуры композиционного слоя отличается от ранее описанного. Растворение частиц металлокерамики происходит преимущественно за счет взаимной диффузии никеля, хрома и γ -железа. Частичное растворение зерен нихрома приводит к сглаживанию их поверхности и уменьшению размеров. За счет этого происходит легирование чугуна, находящегося в капиллярных каналах, хромом и никелем. В свою очередь, в зерна нихрома диффундирует железо и, в некоторой степени, углерод. В результате твердость чугуна и частиц металлокерамики повышается.

Из изложенного следует, что на механизм структурообразования при изготовлении отливок с композиционным слоем оказывают влияние скорость охлаждения и диффузионные процессы. Чем активнее последние, тем больше изменяется структура композиционного слоя. Вместе с тем, важное значение имеет скорость движения расплава, зависящая от температуры и внешнего давления, что можно регулировать в широких пределах.

Макрорельеф поверхности отливки формируется металлокерамической оболочкой, а микрорельеф – жидким металлом, заполняющим ее поры.

Установлена зависимость высоты неровностей композиционной отливки от размера частиц порошка, с уменьшением которого шероховатость поверхности понижается. При применении мелкого порошка ($3 \cdot 10^{-5}$ м) шероховатость поверхности композиционной отливки соответствует 6 классу ГОСТ 2789-95.

Предложенный процесс рекомендуется для изготовления широкой номенклатуры отливок: корпуса гидрораспределителей, клапанные плиты, коленвалы с каналами, вставки пресс-форм для литья под давлением, стеклоформы.

1.6.7. Пути повышения стойкости оснастки литья под давлением

Повышение стойкости оснастки литья под давлением медных и железоуглеродистых сплавов может быть достигнуто двумя путями. Первый путь реализуется переплавом отходов инструментальных сталей 30X2B8Ф, 40X2B5MФ, 40X5MФС. При многократном (до пяти) переплаве необходимо обеспечить постоянство химического состава путем соответствующей подшихтовки, модифицирования, рафинирования. Для получения литой гравюры расплав необходимо заливать в керамизированные формы, обеспечивающие должное качество поверхности (5 класс ГОСТ 2789-95) и высокую размерную точность. Плотная мелкозернистая структура отливок достигается ускоренным охлаждением расплава за счет использования керамизированного кокиля. Термообработка отливок заключается в отжиге при 830...870 °С со скоростью охлаждения не более 50 °С/ч. При этом исправляется литая структура, улучшается обрабатываемость резанием. Для ускорения процесса и уменьшения окисления поверхности пресс-форм предпочтителен изотермический отжиг. Ступенчатая закалка стали проводится при 1100 °С, отпуск ведется до HRC 45...49.

Второе направление реализуется применением композиционных отливок. Рабочая поверхность пресс-формы представляет собой оболочку, полученную методом плазменного напыления; в качестве матричного металла в форму заливается высокопрочный чугун или углеродистая сталь. Эксплуатационные свойства таких пресс-форм определяются составом порошковых композиций для напыления, близостью коэффициента термического расширения оболочки и матричного металла, наличием качественного переходного слоя в системе «оболочка – матрица».

1.6.8. Технология получения вставок пресс-форм с целью повышения стойкости

Получение вставок пресс-форм литья под давлением представляет собой сложный и довольно трудоемкий, требующий четко отлаженной технологии процесс. Традиционные методы получения пресс-форм литьем имеют недостатки: неоднородность структуры, дендритная ликвация, пористость и т.д., что в значительной степени понижает их стойкость. Для устранения этих недостатков используют дорогостоящие процессы литья в керамические формы с последующей термической обработкой при высоких температурах и продолжительной выдержке.

Для предотвращения указанных выше недостатков технологического процесса предлагается получение вставок литьем с армированием матрицы из стали 40Х5МФС стальными волокнами толщиной от 0,5 до 1 мм, с содержанием углерода 0,3...0,5 %.

Армированные материалы (композиты) отличаются от обычных сплавов более высокими значениями временного сопротивления и предела выносливости (на 50...100 %), модуля упругости, коэффициента жесткости и пониженной склонностью к трещинообразованию. Таким образом, композиционные материалы повышают жесткость конструкции при одновременном снижении ее металлоемкости.

Композиционные материалы на металлической основе малопластичны. Однако волокна в композиционных материалах уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исключают внезапное хрупкое разрушение.

Использование в качестве композиционного материала для вставок пресс-форм матричного материала 40Х5МФС, армированного стальными волокнами, имеет ряд преимуществ, например: позволяет управлять кристаллизацией; экономить материал, что снижает стоимость; повысить теплопроводность; получать более плотную структуру.

Предлагаемую технологию можно также распространить на такие детали авиационных двигателей, как лопатки турбин, валы, зубчатые колеса.

1.6.9. Износостойкие композиционные отливки, работающие в абразивных средах при высоких температурах

В связи с дефицитом навесных цепей цементных печей разработана технология получения цельнолитых цепей из высокохромистого чугуна, который хорошо работает в условиях абразивных сред при высоких температурах. С целью повышения предела прочности, твердости и исключения склонности к образованию усадочных раковин в хромистый чугун вводились титан и алюминий. Введение титана обусловлено тем, что он, соединяясь с углеродом, препятствует образованию хромистых карбидов и проявлению интеркристаллитной коррозии.

Для устранения возможности хрупкого разрушения в звеньях устанавливалась арматура из углеродистой стали, которая при заливке жидкого металла сваривалась и превращалась в композиционное изделие. Промышленные испытания литых композиционных цепей показали увеличение срока службы цепей в 1,8...2,0 раза. Добавка титана обеспечила также получение плотной мелкозернистой структуры, при этом отпала необходимость в установке на отливках прирублей.

1.6.10. Снижение износа деталей при получении их методом композиционного литья

Технология получения композиционных износостойких отливок предусматривает изготовление фасонных пористых металлокерамических оболочек из порошков металлов, установку их в полость литейной формы и пропитку при заливке матричного расплава. При этом на поверхности отливок формируется композиционный рабочий слой, свойства которого можно изменять в широких пределах в зависимости от материала металлокерамики. Эксперименты, направленные на подбор порошка металла, позволили обосновать целесообразность применения наплавочного порошка марки ПГУС25М, как дешевого и недефицитного износостойкого материала в смеси с технологической связкой – железным порошком марки ПЖ4МЗ.

Микроструктура композиционных отливок формируется в процессе пропитки пористых металлокерамических оболочек матричным чугуном и последующей кристаллизации. Движение расплава по капиллярам металлокерамики сопровождается интенсивной диффузией. Изменение химического состава контактирующих фаз, оплавление и частичное растворение зерен оболочки привело к образованию новых структур и свойств спеченной металлокерамики и пропитываемого металла.

Композиционный слой отливки состоит из перлита с колониями хромистых карбидов в количестве 45...55 %. При этом в результате пропитки металлокерамики чугуном в рабочем слое сохраняется регулярное расположение твердых зерен порошка ПГУС25М в более мягкой матрице, что соответствует требованиям, предъявляемым к материалам, эксплуатируемым в узлах трения, (т.е. образуется при приработке поверхностей микрорельеф – выступают твердые включения и между трущимися парами образуется пространство, в котором удерживается смазка – так называемый «принцип Шарпи») и обеспечивает повышение износостойкости поверхности чугунных отливок в заданном месте в 1,8...2 раза. Изменяя соотношение порошков ПГУС25М и железа в составе пористых металлокерамических оболочек, можно регулировать твердость поверхностного слоя отливок в пределах 330...500 НВ.

Для повышения износостойкости инструмента предложено изготавливать его композиционным с поверхностью, упрочненной точнолитыми оболочками из высокоуглеродистого хромистого чугуна, что позволило заменить развертки стеклянных трубок из вольфрамсодержащих твердых сплавов.

1.6.11. Изготовление гальванопластических оболочковых стержней для тонкополостных отливок

Основным препятствием при изготовлении отливок с развитыми тонкими внутренними полостями является, как правило, низкая термостойкость материалов лекоудаляемых стержней: органических композиций, солей и т.п. Замена таких материалов на более термостойкие сказывается на их удаляемости из готового изделия. Это противоречие приводит к значительным технологическим, экономическим и экологическим потерям. Поэтому перспективным является двухступенчатый метод изготовления таких изделий – получение их внутренней, непосредственно примыкающей к полости части по бесстержневой (прокат, штамповка) или «холодной» (гальванопластика) технологии с последующей заливкой жидким металлом. Таким образом, удастся избежать одновре-

менного наличия в литейной форме горячего металла и стержня, так как последний удаляется из поллой оболочки до заливки.

Полые оболочки, изготовленные методами гальванопластики, обладают достаточной жесткостью и прочностью и могут быть получены с шероховатостью внутренней поверхности, соответствующей классам 8 – 10 по ГОСТ 2789-95. При таком способе для изготовления моделей, покрываемых гальванопластическим осадком, обязательно применение электропроводных материалов, например, сплавов Вуда, кадмий-цинк, олово-цинк и других. Однако легкоплавкие сплавы образуют с большинством электрохимически осаждаемых металлов, особенно с медью, прочные диффузионные соединения. Это обстоятельство значительно затрудняет удаление легкоплавкой композиции из гальванопластической оболочки. При этом в углах и поднутрениях полостей образуются натеки сплава, которые не удаляются полностью даже при попеременном травлении в горячей щелочи и кислоте.

Оболочка, получаемая электрохимическим осаждением, остается в отливке, становится ее частью и определяет качество внутренней полости – размерную точность и шероховатость поверхности. Поэтому к изготавливаемым гальванопластикой изделиям предъявляют высокие требования по размерной точности и шероховатости поверхности. Реализация этих требований во многом зависит от правильного выбора стержневого состава.

Как показали исследования, наиболее приемлемыми, с точки зрения обеспечения качества металлических оболочек, являются органические стержневые материалы. Например, некоторые органические составы характеризуются стабильной усадкой, хорошей воспроизводимостью, заполняемостью сложных полостей, удаляемостью из полости. Сложность применения этих составов для моделей, покрываемых электрохимическим осадком, заключается в необходимости обеспечения токопроводности поверхностного слоя. Для решения этой задачи использовали три способа, область применения которых определяется материалом и конфигурацией стержней, а также экономическими соображениями.

По первому способу проводили химическое меднение поверхности стержня по технологии, применяемой для металлизации пластмасс. При этом металлическое покрытие на поверхности стержня образуется в результате восстановления ионов меди веществами-восстановителями, содержащимися в растворе для химического меднения. Первый способ из-за относительно высокой стоимости целесообразно применять для отливок с высокой гладкостью поверхности – до класса 10 по ГОСТ 2789-95.

По второму способу металлизации парафиновой композиции в последнюю при расплавлении вводили 25...50 % порошка алюминия. Изделия получали прессованием этих композиций при температуре 32...38 °С. После улучшения смачиваемости поверхности стержня путем обработки в щелочи химическую металлизацию выполняли без длительных и дорогостоящих операций сенсibilизации и активирования. При химическом меднении в щелочной среде парафиновых композиций, содержащих добавку алюминиевой пудры, протекала реакция между частицами алюминия, выходящими на поверхность парафиновой композиции, и едким натром и одновременное восстановление меди на поверхности стержня. Содержание алюминиевого порошка менее 25 % не обеспечивало сплошной металлизации поверхности. Ввод порошка свыше 50 % ухудшало качество поверхности модели из-за высокой вязкости. Недостаток способа – ухудшение шероховатости поверхности на один – два класса.

По третьему способу поверхность органических стержней покрывали слоем металлического порошка. Сухие металлические порошки плохо удерживаются на поверхности пластмасс и органических парафино-стеариновых композиций при комнатной тем-

пературе. В настоящей работе металлический порошок нагревали, продувая через него горячий воздух. Одновременно порошок переходил в псевдооживенное состояние, что позволило легко погружать и извлекать из него стержни. Нагрев порошка до температуры, близкой к температуре плавления стержневого состава, позволяет осадить равномерный, практически монозернистый слой металла. Однако при таком способе из-за относительно невысокой температуры нагрев поверхностного слоя стержня до размягчения, достаточного для прилипания порошка, происходит сравнительно медленно, модель (стержень) прогревается на значительную глубину, а в случае тонкополостного литья – на всю толщину, что приводит к короблению стержня вплоть до полной потери им конфигурации.

Распределение температурных полей при погружении органического стержня в нагретый слой порошка показано на рис. 1.8. Кривая 1 соответствует температуре порошка T'_n , равной $53\text{ }^\circ\text{C}$ (т.е. несколько ниже температуры плавления парафина), кривая 2 для $T''_n=170\text{ }^\circ\text{C}$. В первом случае время, минимально необходимое для равномерного покрытия парафино-стеариновых образцов слоем металлического порошка (τ_{\min}), велико, и стержень прогревается насквозь, во втором случае τ_{\min} мало, и происходит только поверхностный нагрев. В последнем случае сердцевина стержня сохраняет жесткость, достаточную для поддержания исходной конфигурации.

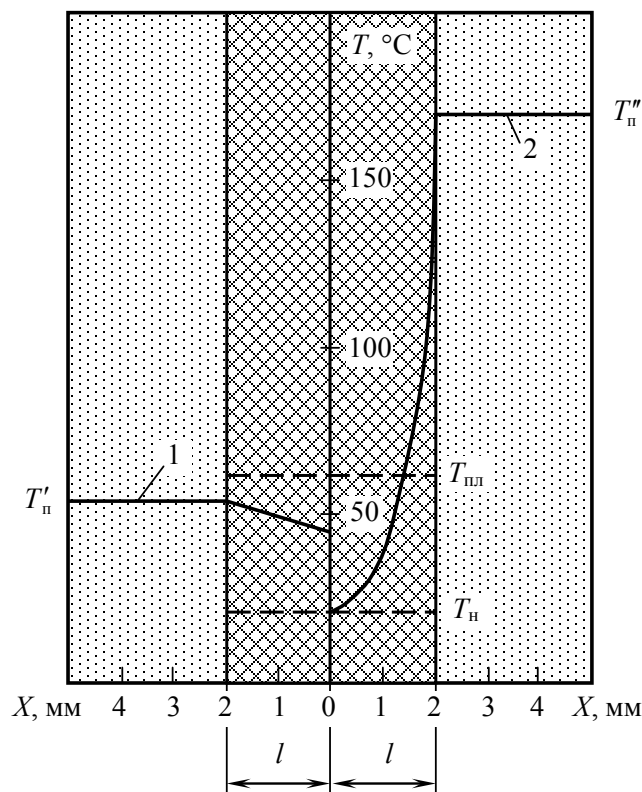


Рис. 1.8. Распределение температурных полей в органическом стержне

Снижение времени пребывания стержня в контакте с нагретым до температуры размягчения материала стержня порошком приводит к плохому прилипанию последнего к стержню и последующему браку при гальваническом покрытии.

Исследовали время τ_{\min} , необходимое для покрытий образцов слоем мелкого порошка. Для этого образцы, имеющие исходную комнатную температуру, погружали в различное время в псевдооживенный медный порошок, подогретый до $T_n=20\dots 200\text{ }^\circ\text{C}$.

Интервал изменения времени погружения составлял 5 с. В пределах интервала времени, границы которого соответствовали событиям «Равномерный слой» и «Неравномерный слой», эксперименты проводили через 0,5 с. В интервале температур $T_n=20\dots 51\text{ }^\circ\text{C}$ событие «Равномерный слой» не наступало после 3600 с выдержки образца в порошке, поэтому время τ_{\min} в этом случае принимали равным бесконечности:

$$\tau_{\min} = \infty \Big|_{20\text{ }^\circ\text{C} \leq T_n \leq 51\text{ }^\circ\text{C}} \quad (1.25)$$

Зависимость времени τ_{\min} от величины T_n для интервала температур $T_n=51\dots 200\text{ }^\circ\text{C}$ приведена на рис. 1.9. Кривая, объединяющая экспериментальные данные, аппроксимируется гиперболической зависимостью:

$$\tau_{\min} = \frac{59,8}{\sqrt{T_n - 51}} - 3,95 \Big|_{51\text{ }^\circ\text{C} \leq T_n \leq 200\text{ }^\circ\text{C}} \quad (1.26)$$

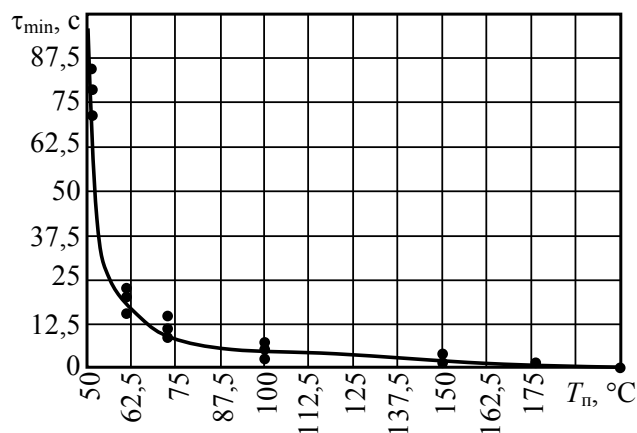


Рис. 1.9. Зависимость минимально необходимого времени нанесения порошка от его температуры

За время τ_{\min} образец прогревается в средней плоскости до температуры T_c . Температуру нагрева образца в средней плоскости до значения T_c за время τ_{\min} можно определить из уравнения Лапласа:

$$\frac{d^2v}{dx^2} + \frac{d^2v}{dy^2} = 0, \quad (1.27)$$

где $v=T_c-T_n$.

Решая уравнение (1.27) для начальных условий $y=0, 0<x<l$, получим выражение относительно величины T_c :

$$T_c = T_n - (T_n - T_n) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin(2n-1) \frac{\pi}{2}}{(2n-1) \frac{\pi}{2} + \sin(2n-1) \frac{\pi}{2} \cos(2n-1) \frac{\pi}{2}} e^{-\left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \right]^2 \frac{\alpha \tau_{\min}}{l^2}}, \quad (1.28)$$

где T_n – начальная температура стержня;

α – температуропроводность материала стержня;

l – половина толщины стержня.

Уравнение (1.27) решали относительно величины T_c , подставляя значения τ_{\min} из выражений (1.25) и (1.26). Результаты расчетов представлены на рис. 1.10, откуда видно, что оптимальной является область температур 160...180 °C. Третий способ наиболее экономичен. Его можно рекомендовать для получения отливок сложной конфигурации с шероховатостью поверхности, соответствующей классу 6 по ГОСТ 2789-95.

После придания токопроводных свойств на модель наносили слой металла гальванопластическим способом.

Гальванопластическое изготовление медных оболочек производили в сернокислом электролите с блескообразующими добавками.

Для изготовления никелевых гальванических оболочек применяли органические композиции, содержащие 10 % полиэтилена, так как рабочая температура растворов для никелирования составляет 43 ± 2 °С. Никелирование производили в сернокислом электролите при $pH=4,5 \dots 5,5$ и плотности тока $3,5 \dots 4,5$ А/дм².

По описанной выше технологии получены органические стержни, никелевая гальванопластическая оболочка и литое рабочее колесо центробежного насоса. Колесо представляет собой двухслойную деталь, сочетающую высокие антикоррозионные и антифрикционные свойства внутреннего никелевого слоя, что существенно для насосных агрегатов, перекачивающих агрессивные и загрязненные абразивом жидкости, а также легкость и дешевизну алюминиевой основы, полученной свободной заливкой на никелевую оболочку в песчаной форме.

Для повышения качества сцепления никелевых гальванопластических оболочек с заливаемым алюминиевым сплавом на них предварительно осаждали слой меди толщиной 30...50 мкм, а затем слой цинка 10...15 мкм. Металлографические исследования показали, что при этом удалось исключить образование оксидных барьеров, препятствующих процессам диффузии. В результате получено соединение слоев с прочностью на разрыв 120 МПа.

1.6.12. Формирование поверхностей раздела в композиционных отливках

Создание композиционных материалов и изделий стало объектом широкого исследования в последние десятилетия, хотя применение двух или более исходных материалов в качестве компонентов, образующих композиционную среду, существует с тех пор, как люди стали иметь дело с материалами. Яркими примерами тому в области литейного производства является монументальная скульптура (памятник Петру I – «Медный всадник», 1782 г. скульптор – Этьен Фальконе, г. Санкт-Петербург), в машиностроении – холодильники доменных печей, рабочие органы центробежных насосов, охлаждаемые лопатки турбин, «бесшумные» гребные винты для атомных подводных лодок, блоки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, охлаждаемые поршни ДВС и др. С самого начала цель создания композитов состояла в том, чтобы достичь комбинации свойств, не присущих каждому из исходных материалов по отдельности. Таким образом, композиты можно изготавливать из компонентов, которые сами по себе не удовлетворяют всем предъявляемым к материалу требованиям. Применительно к литейному производству композиционные отливки позволяют облегчить решение проблем повышения точности и эксплуатационной надежности отливок. Особенно важно развитие этого направления для отливок, работающих при высоких температуре и динамических нагрузках.

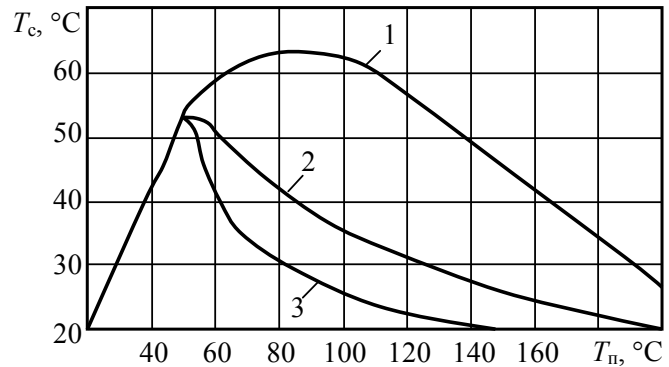


Рис. 1.10. Зависимость температуры середины стержня от температуры медного порошка при $2l$: 2 (1); 3 (2); 4 мм (3)

Одной из главных проблем создания композиционных отливок является формирование поверхности раздела (переходного слоя) «матрица – композиционный элемент». При этом под поверхностью раздела понимается область значительного изменения химического состава отливки, обеспечивающую связь матрицы и композиционного элемента, необходимую для передачи нагрузки между составляющими. Поскольку отливки предназначены для работы в условиях высоких температур, возникают проблемы диффузионной стабильности поверхности раздела, кинетики и регулирования реакций. Изучение переходных слоев показало наличие нескольких типов связи матрицы с композиционным элементом: механической; путем смачивания и пропитки спеченной композиционной вставки матричным металлом; реакционной; оксидной; смешанной. Одним из примеров образования связи путем смачивания и пропитки спеченной композиционной вставки, изготовленной твердофазным спеканием медного порошка, является поршень ДВС, эксплуатируемый при повышенных температурах и ударно – циклических нагрузках. Рост удельной мощности дизельных двигателей за последние 10 лет составил 18...20 %, что привело к повышению термомеханической напряженности поршней. Предельно допустимые температуры головки поршня ограничены из-за опасности закоксования смазочного масла и падения жаропрочности алюминиевых сплавов выше 300 °С. Закоксование смазочного масла приводит к спеканию верхних поршневых колец, прорыву газов между поршневыми кольцами и стенкой цилиндра и к износу поршня. Высокая температура на поверхности поршня в сочетании с ударно – циклическими нагрузками приводит к трещинообразованию вследствие увеличения термических напряжений. Кольцевой канал для охлаждения головки поршня, выполненный металлокерамической вставкой, позволяет снизить температуру на 30 °С за счет улучшения теплоотдачи, увеличить работоспособность двигателя, облегчить массу поршня.

Примером реакционной связи в переходном слое является охлаждаемая лопатка ГТД, выполненная из аустенитного сплава на основе никеля. Оболочковый стержень, полученный твердофазным спеканием или напылением смеси порошков Cr, Ni, Al и Ti, устанавливается в литейную форму и заливается жидким металлом в вакууме. После закалки с 1050...1150 °С лопатка имеет структуру γ -твердого раствора, которая в процессе эксплуатации подвергается старению с образованием двух фаз с одинаковой кристаллической решеткой, но несколько отличающимися друг от друга параметрами. Такая структура позволяет сохранить высокую прочность сцепления матрицы с оболочковым стержнем, получить малую скорость разупрочнения и, как следствие, высокую жаропрочность композиционной отливки.

Рассмотренными примерами не исчерпываются возможности композиционного литья, которое в ряде случаев является единственным экономически оправданным процессом, сочетающим надежность и технологичность.

1.6.13. Кинетика пропитки пористых металлокерамических оболочек

Многие эксплуатационные свойства отливок зависят от характеристик поверхностного слоя – структуры, шероховатости и др. С целью управления параметрами поверхностного слоя использовали пористые металлокерамические оболочки, устанавливаемые в форму и заливаемые жидким металлом. Пористая оболочка представляет собой простейшую композицию металл – воздух и относится к категории фиктивных пористых сред, являющих собой упрощенную модель реальных пористых сред. Она позволяет в первом приближении оценить строение пор и характер течения жидкости в порах.

Теоретическое описание кинетики пропитки базируется на классической гидродинамике вязкой жидкости. Самопроизвольное движение смачивающей жидкости в цилиндрическом капилляре, расположенном под углом β к горизонту можно представить в виде уравнения скорости движения

$$v = \frac{\partial l}{\partial \tau} = \left(\frac{r^2 \gamma_{ж}}{8\eta} \right) \left[\left(\frac{2\sigma_{ж-г}}{\rho \gamma_{ж} l} - g \sin \beta \right) \right], \quad (1.29)$$

где l – длина столба жидкости в капилляре;
 τ – время;
 η – коэффициент динамической вязкости жидкости;
 r – радиус капилляра;
 ρ – радиус кривизны мениска;
 $\gamma_{ж}$ – плотность жидкости;
 $\sigma_{ж-г}$ – межфазное натяжение (расплав – газовая среда);
 g – ускорение свободного падения.

На практике, при спекании оболочек, капилляры чаще всего имеют произвольную форму. Тогда

$$v = \frac{\partial l}{\partial \tau} = \frac{\left(\frac{r^2 \gamma_{ж}}{8\eta} \right) \partial \psi}{\partial l}, \quad (1.30)$$

где $\partial \psi / \partial l$ – градиент избыточного капиллярного потенциала;
 ψ – капиллярный потенциал.

При использовании тонких оболочек (т.е. жидкий металл проходит небольшое расстояние под действием капиллярных сил) величиной $g \sin \beta$ можно пренебречь

$$v = \frac{\partial l}{\partial \tau} = \frac{p_k d_{эф}^2}{32\eta l}, \quad (1.31)$$

где $d_{эф}$ – эффективный диаметр капилляров;
 p_k – капиллярное давление.

Экспериментальные данные по кинетике самопроизвольной пропитки показывают, что в большинстве случаев продвижение стынувшей жидкости в пористом теле подчиняется степенному закону

$$l^n = k\tau, \quad (1.32)$$

где l – длина пропитанного слоя;
 n и k – постоянные (при ламинарном течении жидкости $n=2$, а $k=\sigma_{ж-г} \cos \theta r / 2 \eta$).

Рассмотренная модель пропитки позволяет оценить практические возможности технологии получения композиционных отливок с качественным соединением пористых оболочек, как – то:

- соотношение толщины стенки отливки и толщины оболочки;
- размеры зерен металлического порошка и параметры спекания;
- смачивание, растекание и капиллярное давление в системе «матричный жидкий металл – пористая оболочка».

1.6.14. Композиционные методы получения тонкостенных отливок

В компактных узлах и агрегатах с высокими удельными энергетическими показателями – двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных установках, насосах для нефтяного и химического машиностроения, гидроаппаратуре, криогенном и компрессорном оборудовании, радиотехнических приборах значительное место занимают тонкостенные отливки. К ним следует отнести такие точные отливки, как лопастные колеса с узкими проточными полостями, клапанные плиты, охлаждаемые поршни, волноводные элементы СВЧ радиоприборов, пустотелые лопатки турбин, корпуса гидрораспределителей. При этом размеры полостей в свету составляют иногда десятые доли миллиметров при протяженности полостей до нескольких десятков миллиметров; толщина стенок отливок часто достигает 0,6...1 мм.

Получение таких отливок осложнено не только необходимостью иметь высокие литейные и механические свойства сплавов, но, главным образом, трудностями получения тонких полостей в литом исполнении. Сложные методы механической технологии с последующим соединением деталей в одно целое не приводят к желаемым результатам, использование керамических стержней из оксидов сопряжено с трудностями их удаления из отливок и влечет за собой снижение механических свойств сплавов.

Наиболее рациональной является замена таких отливок композиционными. Целесообразность замены цельнолитых заготовок композиционными отливками обусловлена повышением качества, эксплуатационных свойств и технологичности их изготовления. Наибольший эффект достигается при изготовлении композиционных отливок путем заливки жидким металлом твердых элементов, изготовленных гальванопластикой или точным литьем. Повышение качества и эксплуатационных свойств происходит за счет сокращения продолжительности высокотемпературного контакта металла с формой.

При разработке этих процессов решали общие задачи изготовления формы с высокой геометрической точностью; получения бездефектных твердых элементов с максимальным приближением по геометрической точности к форме; отделения твердого элемента от формы и устранения продуктов физико-химического взаимодействия с формой (пригара, интерметаллических соединений, оксидного слоя); улучшения свойств твердого элемента (термообработка, водородный отжиг) и подготовки его к заливке жидким металлом; обеспечение минимального ухудшения геометрической точности и свойств твердого элемента при заливке жидким металлом; формирования диффузионной связи с высокими прочностными свойствами между твердым элементом и залитым металлом.

Литые элементы из цветных сплавов получали литьем в стальные формы, а из железоуглеродистых – в чугунный кокиль с покрытием из огеливаемой керамики на основе циркона. Полученные в таком кокиле стальные элементы имели высокую геометрическую точность, равномерные механические свойства по толщине благодаря отсутствию на поверхности обезуглероженного слоя.

Полноту протекания диффузионных процессов в зоне контакта жидкого и твердого металлов обеспечивали путем предварительной пассивации поверхности твердого элемента, исключающей образование оксидных барьеров.

Полученные по данной технологии композиционные вставки пресс-форм с литыми элементами из стали 40X5МФСЛ имели шероховатость поверхности по 5-му и 6-му классам (ГОСТ 2789-95) и размерную точность по 12-му и 13-му квалитетам.

Композиционные отливки лопастных колес центробежных насосов системы ЦАМ-алюминий имели шероховатость поверхности по 7-му классу и размерную точность по 11-му и 12-му квалитетам.

Элементы композиции сложной конфигурации изготавливали гальванопластикой по органическим моделям. Размерную точность моделей повышали путем ввода в модельный состав порошкообразного наполнителя с малым коэффициентом линейного расширения. Для формирования диффузионной связи между медным гальванопластическим элементом и залитым алюминиевым сплавом на медь наносили слой электролитического цинка.

При заливке тонкостенного гальванопластического элемента (толщиной до 10^{-3} м) жидким металлом происходит уменьшение размеров в результате взаимодействия. Повышение жесткости элемента за счет заполнения его полости легкоудаляемым опорным составом на основе солей взамен модельного способствовало повышению размерной точности композиционных отливок.

Изготовленные по данной технологии композиционные отливки волноводных элементов СВЧ-приборов, лопастных колес и корпусов гидрораспределителей имели шероховатость по 7-му и 8-му классам (ГОСТ 2789-95) и размерную точность по 11-му квалитету.

Для полых лопаток турбин целесообразно использовать стержни из солекерамики на основе хлористого натрия, получаемые методом твердофазного спекания. Защита стержней от расплавления при заливке металлом достигается нанесением на их поверхность слоя никеля плазменным напылением или вакуумным осаждением. При заливке металла происходит взаимная диффузия дисперсионнотвердеющего сплава и никеля с образованием переходной зоны и прочным механическим сцеплением напыленной оболочки с отливкой.

Полученная таким образом композиционная отливка локализует своей пористой вставкой усталостные трещины, возникающие обычно на внутренней поверхности охлаждаемых лопаток вследствие значительных нагрузок от центробежных сил, вибрации, высокой температуры, циклических температурных нагрузок.

1.6.15. Диффузионные процессы – основа формирования композиционных отливок

Композиционные отливки гетерогенны по своей природе, что обеспечивает комплекс свойств, недоступных для отдельных элементов, входящих в композицию. Реализация свойств композиционных отливок определяется геометрическими параметрами и строением контактной зоны, что зависит от диффузионных процессов. Особое своеобразие диффузионные процессы имеют при изготовлении композиционных отливок методом пропитки пористых металлокерамических оболочек (ПМКО) матричным металлом.

При изготовлении отливок с применением ПМКО эксплуатационные свойства их зависят как от свойств пористой металлокерамической оболочки до ее пропитки, так и от процессов пропитки. Диффузионные процессы, происходящие при изготовлении ПМКО, отличаются от диффузионных процессов, происходящих в компактных металлах, тремя основными факторами: высокоразвитой поверхностью порошков, несовершенством структуры металла порошков и более высокой плотностью дефектов кристаллического строения; от процессов, происходящих при спекании прессованных порошков, – наличием органического пластификатора до 15 % по массе. При обжиге ПМКО, изготовленных из смеси порошков железа и твердых сплавов типа сормайт, ре-

лит, пластифицированных парафином с полиэтиленом, происходит насыщение их углеродом из летучих фракций, особенно в интервале температур 1000...1200 °С. Так, при обжиге ПМКО с содержанием 15 % пластификатора по массе при температуре 850 °С (время выдержки – 1 ч) содержание углерода в железе повысилось с 0,02 до 0,34 %, в сормайте – с 3,4 до 3,72 %, а при спекании при температуре 1200 °С и времени выдержки 2 ч, содержание углерода в железном порошке повысилось до 1,21 %. При обжиге ПМКО на основе релита зерна последнего также обогащаются углеродом, что приводит к образованию на их поверхности слоя монокарбида вольфрама толщиной 3...8 мкм.

При обжиге ПМКО, содержащих кроме железных порошков сормайт и релит, происходит взаимная диффузия элементов, превращающая зерна железа в легированную сталь, что подтверждается данными измерения микротвердости и рентгеноспектрального анализа. При пропитке ПМКО матричным металлом интенсивность диффузионных процессов увеличивается из-за более высокой температуры и активности элементов в жидкой фазе. Коэффициент диффузии элементов на границе контакта «жидкость – твердое тело» на 2 – 3 порядка больше, чем на границе твердое тело – твердое тело. В результате металл, заполнивший межзерновое пространство, имеет сложную структуру и химический состав, отличающийся от исходного матричного металла.

Применение ПМКО, изготовленных из порошка железа (размер зерен 60...160 мкм), позволяет формировать в композиционных отливках из чугуна сложные тонкополостные каналы с качественной поверхностью, (корпуса гидрораспределителей, клапанных плит и т.д.).

Для получения изделий с высокой поверхностной твердостью, работающих в условиях износа (кулачки распредвалов, толкатели), ПМКО изготавливаются из порошка сормайта (ПГУС 25, размер зерен 70...300 мкм). Ввиду того, что ПМКО из сормайта плохо смачиваются и пропитываются расплавом чугуна, в состав смеси вводится железный порошок (40...60 мас.% по отношению к сормайту). При пропитке таких ПМКО протекают процессы взаимной диффузии компонентов: чугун по мере движения по капиллярам насыщается хромом, никелем, марганцем, переходящими из зерен сормайта; зерна легированной стали продолжают насыщаться этими элементами и дополнительно углеродом и кремнием из чугуна. После затвердевания композиционный слой состоит из зерен легированной стали с мартенситной структурой, разрыхленных частиц сормайта и низколегированного чугуна. Высокая твердость (HRC 56...58) такой композиции сохраняется по всей толщине металлокерамической оболочки и снижается на границе с матричным металлом, где происходит обогащение легирующими элементами на глубину 0,5...1,5 мм.

Формирование композиционных слоев на стальных отливках затруднено вследствие худшего пропитывания ПМКО сталью. Для улучшения фильтрации стали в поры ПМКО, придающей отливке более высокую стойкость против абразивного износа, основу ПМКО составлял релит фракций 0,4...1,6 мм, а в качестве связующего применялись порошки железа и ферросплавов. При заливке такой ПМКО сталью 18ХН2МФЛ происходит растворение более легкоплавкого связующего, и межзерновое пространство имеет сложный химический состав. Вольфрам и углерод, диффундирующие из релита в матричный металл, образуют с железом двойной железвольфрамовый карбид переменного состава (η -фаза), который выпадает на поверхности зерен релита в виде мелких кристаллов правильной формы, а в межзерновом пространстве образует с железом эвтектику типа η -Fe₇. На границе основного металла образуется переходная зона глубиной до 1,2 мм, представляющая собой сплав Fe-W-C доэвтектического типа.

С целью уменьшения растворимости зерен релита в расплаве в состав связки введены Cu, Ni, Mn, которые снижают диффузию W→Fe. Сохранение исходных размеров частиц релита при композиционном литье позволяет повысить эксплуатационные характеристики изделия по сравнению с наплавкой релитом.

Проведенные исследования указывают на существенную роль, которую играют диффузионные процессы на всех этапах изготовления композиционных отливок. При этом, регулируя состав исходных материалов для изготовления ПМКО, режим спекания и пропитки, можно получить заданные свойства композиционного слоя.

1.6.16. Применение высокопрочного чугуна для вставок пресс-форм литья под давлением

Пресс-формы литья под давлением (ЛПД) относятся к циклически нагруженным деталям. Установлены основные причины разрушения оснастки при контакте с жидким металлом. Термическая усталость – разрушение под циклическим воздействием температур, когда относительное удлинение за каждый цикл суммируется, возникают деформации, температурные напряжения и изменение механических свойств пресс-формы. В результате возникает сетка трещин на поверхности. В итоге разрушаться материал может в том случае, если температурные напряжения превзойдут предел прочности металла. Охрупчивание материала пресс-форм может происходить за счет окисления поверхности, старения сплава, поглощения водорода. Термостойкость сплава определяется несколькими факторами: температурные факторы – число теплосмен, характер тепловой кривой, гистерезис, угол наклона к оси абсцисс, время воздействия теплового потока; структура и свойства материала, их стабильность при циклических нагрузках; геометрические факторы - необратимое формоизменение, которое проявляется в виде смятия, коробления, пластического перемещения метала; высокотемпературный износ, то есть трение струи жидкого металла о стенки пресс-форм, гидравлический удар, коррозия, эрозия, диффузия элементов отливок, адгезионные процессы, химическое воздействие.

Приведенный анализ показывает, что эксплуатационные условия работы пресс-форм сложные, усложняются они при повышении температуры плавления сплава, из которого отливаются детали. Одним из перспективных материалов для пресс-форм, обладающим высоким удельным значением работы трещинообразования, является высокопрочный чугун.

Вставки пресс-форм отливали в керамизированных формах, для получения рабочей полости (гравюры) использовали керамизированный стержень. Основу стержня составляет жидкостекольная смесь, а облицовка выполняется из холодноогеливаемой суспензии (связующее – гидролизированный раствор этилсиликата – 30 %, наполнитель – цирконовый концентрат с кварцевым песком – 70 %). При тепловой обработке таких стержней вследствие различия в коэффициентах термического расширения керамики и жидкостекольной основы наблюдается растрескивание стержня и его деформация, искажающие геометрию отливки. Поэтому объемная тепловая обработка стержней была заменена поверхностной обработкой газовой горелкой.

Анализ условий работы вставок пресс-форм из высокопрочного чугуна показывает, что теплопроводность его значительно ниже, чем у серого чугуна с пластинчатым графитом. Поэтому вставки пресс-форм нагреваются до более высоких температур, полированная поверхность быстрее окисляется, требует эффективного охлаждения форм либо снижения темпа работы, а значит, производительности процесса. Меньшая тепло-

и температуропроводность чугуна с шаровидным графитом способствуют возникновению в нем более высоких термических напряжений. Высокая пластичность этого чугуна способствует релаксации напряжений путем деформации и коробления, что особенно заметно при ЛПД латуней. Этот фактор является существенным недостатком чугуна с шаровидным графитом, как материала для изготовления вставок пресс-форм.

Для устранения данного недостатка путем повышения теплопроводности чугуна авторами предложен и опробован способ армирования металлической матрицы стальными цилиндрическими элементами различного диаметра, равномерно расположенными в объеме вставки и перпендикулярными к ее рабочей поверхности.

Объемное армирование вставок, проведенное таким образом порождает проблему свариваемости стальных элементов с матрицей из высокопрочного чугуна. С целью оптимизации процесса сваривания были использованы расчетные методы, основывающиеся на конечно-разностном представлении дифференциального уравнения теплопроводности Фурье. По результатам расчета построены номограммы, учитывающие теплофизические и геометрические факторы получения качественных вставок пресс-форм.

Производственные испытания объемноармированных вставок пресс-форм из высокопрочного чугуна проводились при ЛПД изделий из латуни ЛС-59. Стойкость вставок, армированных стальной проволокой, в 1,2 – 1,3 раза выше, чем стойкость вставок без армирования. Трещины термоусталостного характера, а также деформации рабочих полостей не наблюдаются.

1.6.17. Эксплуатационная надежность и ресурсосбережение при применении композиционных отливок и специальных неметаллических форм

Элементы композиционных деталей можно изготавливать из разных (оптимальных) материалов. Объединяются элементы матричным металлом с созданием связей за счет диффузии.

При приготовлении «сборочных единиц» используют различные механические методы или сварку. В первом случае создается тот или иной зазор, что ухудшает эксплуатационные свойства «сборочных единиц», особенно, когда деталь работает под высоким давлением или в условиях легкопроникающих сред (например, гидроаппаратура). При сборке с использованием материалов с разной твердостью наблюдается изменение геометрии отверстий с разъединением деталей во время эксплуатации. Сварочные операции надежны, но имеют свои ограничения и трудоемки. Решение этой проблемы возможно за счет применения композиционных деталей, где отдельные элементы могут быть объединены в единое целое с помощью диффузионных процессов.

Замена «сборочных единиц» деталью из различных оптимальных по условиям эксплуатационных элементов позволяет повысить эксплуатационную надежность таких деталей и ресурсосбережение.

Разработана технология получения буровой шарошки, состоящей из трех элементов: породоразрушающих зубьев, требующих высокой твердости; опоры, несущей высокие осевые давления; корпуса. При разработке технологии композиционной шарошки предложено использовать зубья, литые центробежным способом, но армированные релитом. Элементы опоры для шарошек, работающих со смазкой, предложено использовать из хромистой дроби и матричной бронзы, а при опорах с сухим трением из карбидов вольфрама, пропитанных чугуном. Литые зубья, армированные релитом, и элементы опоры из карбида вольфрама, пропитанные чугуном, устанавливаются в литейную

форму и заливаются матричным металлом – низколегированной или графитизированной сталью.

Разработана технология изготовления композиционных турбинок турбобура. Такие турбины в настоящее время отливают из одного металла с применением выплавляемых моделей. По эксплуатационным условиям, для лопаток требуется повышенная твердость, а для колец, объединяющих лопатки, пониженная. При композиционном литье эта проблема может быть решена: лопатки можно изготавливать высокопроизводительными процессами, например, прокаткой, непрерывным литьем и объединять в единое целое кольцами при заливке.

Разработана технология изготовления композиционных отливок из тонких оболочек, получаемых штамповкой, гальванопластикой, напылением.

Эффективным оказалось сочетание штампованной оболочки из мягкой стали с чугуновой отливкой, подвергающейся эмалированию. При эмалировании чугуновых отливок часто наблюдается пороки (трещины, пузыри, уколы и др.). При эмалировании стали распространен порок «рыбья чешуя». Поэтому эмалированию отливок предшествует сложная подготовка. При использовании композиционных отливок «сталь – чугун» необходимость в такой подготовке устраняется.

При сочетании оболочек, получаемых гальванопластикой (например, медных), с литьем (например, алюминиевым) возможно получать тонкорельефные полости с высокой размерной точностью и малой шероховатостью. Гальванопластическое осаждение производят на стальной шлифованной пуансон (толщина осажденного слоя 0,15...0,2 мм). Заливка алюминия ведется без удаления пуансона, который удаляется лишь после полного охлаждения отливки. Связь между алюминиевой отливкой и медной оболочкой достигается за счет промежуточных слоев, например, цинка, активно взаимодействующего и с алюминием, и с медью.

Аналогичная композиция может быть получена при изготовлении медной оболочки не гальванопластикой, а напылением в защитной среде.

Продолжается разработка технологии получения композиционных отливок, представляющих сочетание оболочек из пористой металлокерамики, изготовленной из сормайта, релита, пропитанных чугуном. Такие композиционные отливки применены при эксплуатации в условиях абразивного износа.

Ведутся работы по армированию чугуна стальной проволокой в целях повышения термостойкости отливок, устранения хрупкого разрушения и увеличения прочности. Такие отливки успешно заменяют сталь, используемую для пресс-форм при изготовлении изделий из цветных сплавов. Армирование устраняет хрупкое разрушение ферросилидов.

Глава 2

ПОЛУЧЕНИЕ ОТЛИВОК В КЕРАМИЗИРОВАННЫХ ФОРМАХ ПО ПОСТОЯННЫМ МОДЕЛЯМ

2.1. ШОУ-процесс и КОМПОЗАЙТ ШОУ-процесс

Стремление получать равнозначные по качеству отливки при применении моделей многократного использования, привело к предложению изготавливать разъемные керамические формы.

Разъемные керамические формы получают из холодных огеливаемых суспензий, начло которым было положено в Англии братьями Шоу (ШОУ-процесс).

ШОУ-процесс, предложенный в 1951 г., базировался на этилсиликатной суспензии. При ШОУ-процессе введены три новых элемента:

- применение разъемной формы с использованием моделей многократного использования (деревянных, металлических);
- добавка в суспензию гелеобразователя, что резко ускоряло процесс твердения;
- создание газопроницаемых форм с повышенной термостойкостью за счет сетки трещин, образующихся при выгорании спирта после отверждения суспензии.

Процесс, предложенный братьями Шоу, оказался дорогим, нестабильным и поэтому получил сравнительно ограниченное применение для изготовления литой оснастки, штампов, металлических форм, вставок для литья под давлением. В меньшей степени используется этот процесс для изготовления керамических стержней, форм со сложными внутренними очертаниями, крыльчаток. Несмотря на ограниченное применение Шоу-процесса, он имел то принципиальное значение, что показал целесообразность применения разъемных керамических форм и вызвал разработку ряда новых процессов. При этом работы проводились в следующих направлениях:

- совершенствование ШОУ-процесса на базе огеливаемых этилсиликатных суспензий для получения стабильных результатов по структуре;
- разработка процесса получения разъемных керамических форм без этилсиликата;
- применение тонкостенных этилсиликатных покрытий из огеливаемых суспензий.

Получение форм по ШОУ-процессу состоит из следующих операций (рис. 2.1.):

- приготовление жидкой смеси (суспензии) и заливка ее в опоку с установленной в ней моделью (рис. 2.1, а);
- удаление модели из формы после отвердевания суспензии (рис. 2.1, б);
- формирование структуры (сетки трещин) при выгорании спирта (рис. 2.1, в)

- термообработка при температуре 900 °С (рис. 2.1, з);
- подготовка форм под заливку;
- заливка и очистка отливок.

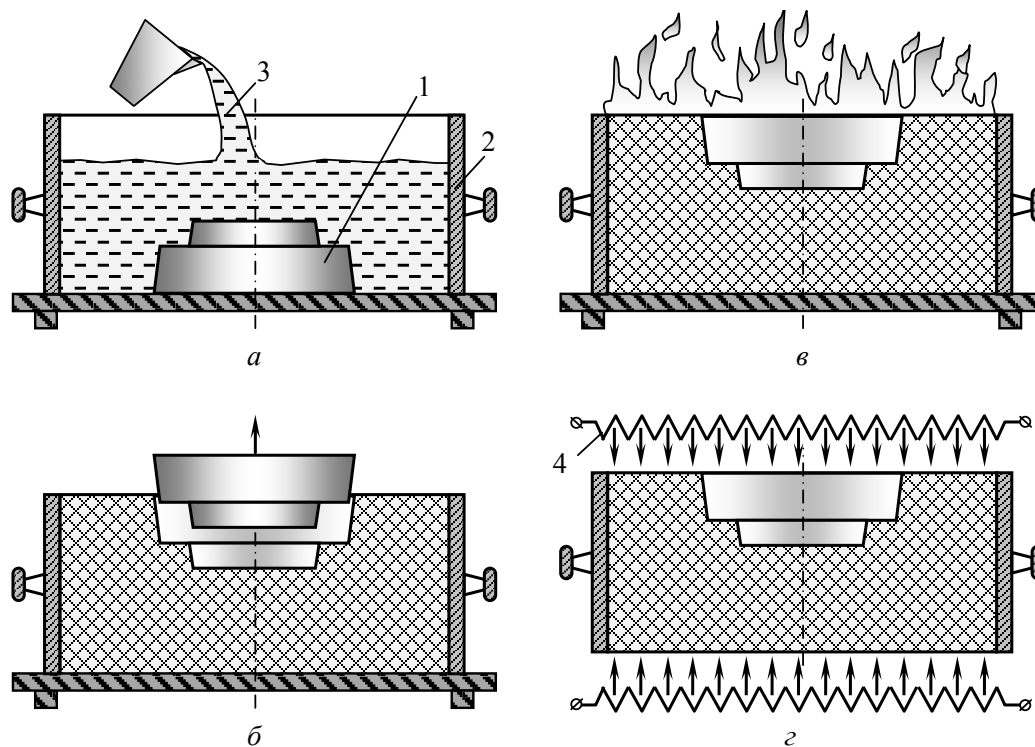


Рис. 2.1. Схема процесса получения керамических форм по ШОУ-процессу: 1 – модель; 2 – опока; 3 – суспензия; 4 – нагревательный элемент.

При освоении Шоу-процесса наибольшее применение имели суспензии, состоящие из гидролизованного этилсиликата 32 или 40, маршаллита, кварцевого песка марки 2КО315 или 2КО025, 15 % раствора едкого натрия или калия. Гидролиз этилсиликата не отличается от гидролиза, осуществляемого при приготовлении его для форм, получаемых по выплавляемым моделям. При приготовлении смеси существенна последовательность введения компонентов и интенсивность перемешивания. Однородность смеси достигается в пропеллерном смесителе.

В настоящее время для форм различного назначения кроме маршаллита применяют циркон, силлиманит, магнезит, хромистый железняк и отвердитель – раствор триэтанолamina, водный аммиак. Применение более мягких отвердителей по сравнению с щелочами связано с неоднородным действием щелочей в массе суспензии и нестабильным их действием во время отверждения суспензии.

Качество смеси зависит от отвердителя, поэтому количество необходимого отвердителя определяют на технологической пробе. Время твердения суспензии должно составлять 120...180 с. Более короткое – затрудняет заливку смеси; при твердении суспензии более 180 с возможна седиментационная неоднородность; также увеличивается прилипание смеси к модели.

Прочность затвердевшей керамики зависит от качества гидролизованного этилсиликата, активности отвердителя и состава смеси. С увеличением в составе наполнителя повышается прочность и уменьшается усадка керамики. Существенным недостатком для суспензии является замешанный в ней воздух, который остается в затвердевшей суспензии в виде пузырей и уменьшает прочность керамики, в отдельных случаях может быть причиной образования поверхностных газовых пороков на отливках. Необходимо

управлять отверждением так, чтобы не создавалась седиментационная неоднородность и успевали всплывать пузыри воздуха. При заливке в опоку или стержневой ящик суспензия должна воспроизвести поверхность модели (или стержневого ящика), что для тонкорельефных моделей более сложно, чем при использовании суспензий без огеливателей, применяемых для получения форм по выплавляемым моделям. Поэтому важно изменение вязкости во времени с тем, чтобы к концу заливки текучесть существенно не изменилась, отверждение началось после окончания заливки. Для улучшения заполнения суспензией ящика, опоки может быть использована вибрация либо вакуум.

Стремление уменьшить расход дорогой огеливаемой суспензии приводит к развитию двухслойных форм по модели с накладным телом, которое изготавливается из различных материалов. Изготовленная песчано-жидкостекольная форма накладывается на модель и в образовавшийся зазор через отверстие заливается огеливаемая суспензия.

Из форм, изготавливаемых на базе кремнеорганических соединений после их отверждения, извлекаются модели (или стержни удаляются из стержневых ящиков). Удаление моделей производится, когда масса приобретает пластичное (резиноподобное) состояние. В процессе гидролиза этилсиликата образуется силикагель, что способствует отверждению массы и выделению этилового спирта. При удалении органического растворителя и спирта, выделившегося при гидролизе, происходит усадка и возникают трещины. Структура, получающаяся при удалении летучих из «сырца», определяет качество керамики в целом (прочность, проницаемость). Поэтому важен режим удаления летучих, от которого зависит структура.

Образование трещин в этилсиликатной огеливаемой керамике можно представить в виде следующей схемы. В затвердевшей керамической смеси формируются поры разнообразной формы и величины, связанные с наружной поверхностью затвердевшей массы каналами. Эти поры и каналы заполнены жидкостью и проницаемость формы «сырца» равна нулю.

Органический растворитель из капилляров начинает испаряться через открытую поверхность еще до поджигания летучих. Испарение летучих через открытую поверхность будет зависеть от коэффициента внешней диффузии испаряющейся с поверхности жидкости и внутренней диффузии поступающей к поверхности испаряющейся жидкости. Поток массы испаряющейся жидкости в единицу времени с единицы поверхности зависит от разницы парциальных давлений пара удаляемой жидкости на поверхности формы и в окружающей среде.

При поджигании спирта происходит быстрое удаление жидкости из пор. Так как гель распределен между зернами огнеупорного наполнителя в процессе объемной усадки, то возникающие внутренние напряжения в системе гель-наполнитель, приводят к образованию микро- и макротрещин. Быстрое удаление паров спирта начинается непосредственно у поверхности керамики и идет в направлении, перпендикулярном «горящей» поверхности. С этим связана определенная ориентация трещин – нормальная к плоскости «горения». Дифференцированное строение трещин, когда по мере удаления их от поверхности горения наблюдается увеличение раскрытия трещин, обусловлено вытеснением спирта с «не горячей» поверхности, поэтому процесс трещинообразования получает более полное развитие по мере удаления от «горящей» поверхности.

При медленном удалении летучих трещиноватость не получает развития и макроструктура керамики не имеет сетки трещин. При поджигании и истечении более 150...180 с формируется структура, своеобразие которой заключается в наличии замкнутых пор, клинообразных каналов, острие которых изолировано от рабочей поверхности плотным слоем смеси. В этом случае поверхностная зона обедняется спиртом как за счет его естественного испарения, так и опускания его под действием силы тяжести по капиллярным каналам к нижней торцевой поверхности. При быстром удалении летучих формируется обычная сетка трещин и каналы. Следовательно, изменение харак-

тера первичной обработки огеливаемой керамики влияет не только на макроструктуру, но и трещиноватость поверхности.

При внедрении пузырей с поверхности керамики в расплав могут образовываться газовые пузыри, которые «прилипают» к устьям трещин. По мере роста металлостатического напора образовавшиеся пузыри будут деформироваться, а некоторые из них «вжиматься» обратно в трещины.

Эксперименты показали, что при применении керамики с трещиноватостью $L = (3,14...6,28) \cdot 10^{-2}$ м/м² газовая шероховатость на вогнутых отливках практически отсутствовала, но имели место «гребешки». Уменьшение газопроницаемости привело к увеличению количества «гребешков». Газовая шероховатость на поверхности отливок из стали наблюдалась чаще, чем у чугуновых, что связано с различной скоростью затвердевания расплавов.

Более глубокий прогрев керамики при заливке стали приводит к появлению локальных нарушений направленности газового потока, вызванных дефектами структуры керамики. Гладкая поверхность отливок формировалась при применении керамики с дифференциальной сеткой трещин, которые равномерно располагались по сечению стенки формы и имели вид клина, острие которого выходит к рабочей поверхности.

Термическая обработка форм осуществляется при температуре 900...1100 °С в течение 2...3 ч. Газотворность керамики после термообработки практически отсутствует.

Заливка керамических форм осуществляется в горячие и холодные формы. После термообработки керамические формы следует непосредственно подавать на заливку. При заливке холодных форм появляется опасность вредного влияния адсорбированной влаги, так как после высокотемпературной обработки увеличивается способность капиллярно-пористой керамики адсорбировать влагу из окружающей среды. Технология заливки керамических форм не отличается от обычной технологии заливки.

Керамические формы на основе ШОУ-процесса, особенно двухслойные (КОМПОЗИТ ШОУ-процесс), могут иметь значение для более сложного и крупного литья, если процесс будет экономичным:

- минимальный расход формовочной смеси;
- стабильность процесса с точки зрения формирования стабильной структуры (трещинообразование);
- использование керамики в оптимальном сочетании с песчаной основой;
- возможность улучшения свойств отливок за счет применения керамики.

Технология получения двухслойных тонкостенных форм отличается следующим:

- с целью формирования облицовочного слоя, соизмеримого с толщиной краски и наносимого по модели, предложена гидрофобизация опорного песчаного слоя;
- разработан способ изготовления накладных тел, применение которых обеспечило образование равнотолщинного зазора между опорным слоем песчаной формы и моделью.

Таким образом, положив в основу эти два решения, предложена технология получения двухслойных тонкостенных форм из огеливаемой суспензии, которые были названы керамизированными.

Керамизированные формы, относящиеся к разновидностям двухслойных керамических форм, сочетают песчаную основу с термически обрабатываемым облицовочным тонким слоем из холоднотвердеющей или термопластичной суспензии.

При выборе оптимальной толщины керамической облицовки двухслойной формы исходят из следующего:

- чем меньше канал, по которому течет суспензия, тем сложнее условия его заполнения;
- чем тоньше слой огнеупорного покрытия, тем лучше условия его дегазации и меньше вероятность образования газовых раковин на поверхности отливок.

При протекании суспензии по песчаному каналу происходит капиллярное впитывание ее жидкой составляющей, что вызывает уменьшение текучести. Глубина проникновения суспензии в щель будет определяться статическими и капиллярными силами, суммарное действие которых может быть описано уравнением (2.1)

$$P_1^2 + P_2^2 = C \frac{r\tau}{\eta} [(H\gamma + P_B)r \pm \sigma \cos \theta], \quad (2.1)$$

где P_1 – статическая сила;
 P_2 – капиллярная сила;
 C – коэффициент;
 r – радиус капилляра;
 τ – время;
 H – высота;
 P_B – величина давления;
 σ – поверхностное натяжение;
 θ – угол смачивания;
 γ – плотность;
 η – вязкость суспензии.

Из уравнения видно, что глубина проникновения может быть значительно увеличена под действием давления. Чем менее интенсивно будет происходить впитывание жидкой составляющей суспензии, тем больше величина текучести. Холодноогеливаемая суспензия при свободной заливке заполняет каналы пробы не более, чем на половину диаметра. Применение давления приводит к увеличению текучести на 25 %. Более эффективным средством для повышения текучести является нанесение гидрофобных покрытий на песчаную основу.

Применение покрытий позволяет положительно решить вопрос о снижении вероятности миграции влаги из основы формы в облицовку при выдержке формы перед заливкой, так как гидрофобное покрытие следует рассматривать как барьер на пути движения влаги.

Формирование тонкого слоя керамики определяет условие, позволяющее эффективно воздействовать на процесс структурообразования. Так, например, поверхностная обработка затвердевающей керамики ортофосфорной кислотой, фосфатами алюминия обеспечивает формирование прочного керамического слоя без сетки трещин. Получение прочных без трещин керамических облицовок основано предположительно на взаимодействии фосфатных ионов с гелем кремниевой кислоты.

Образование фосфата кремнезема обеспечивает упрочнение тонкой керамической облицовки, что в свою очередь создает улучшение условия комплексного воздействия на формирующуюся в керамизированной форме отливку при применении давления.

Накладные тела для получения тонкостенных керамизированных форм можно получить различными способами.

Формирование из листового тонкопластичного материала (например, полистирола) является высокопроизводительным и экономичным способом изготовления изделий, обладающих большой поверхностью и малой толщиной стенки. При формировании материал нагревают до пластичного состояния, подвергают вытяжке, придавая необходимые размеры и охлаждают, фиксируя приобретенную листовую форму. Известны также методы формирования изделий из листовых термопластов: вакуумное, пневматическое, штамповка и формование со скольжением листа в зажимной раме.

Разработана технология получения накладных тел из холоднотвердеющих пластмасс. Исходными материалами для изготовления накладных тел по этой технологии являются: холоднотвердеющие пластмассы: норакрил 100; норакрил 65; протакрил, ста-донт; пластмасса АСТ-Т.

Наибольшее распространение для опорной части формы получили песчано-жидкостекольные смеси. Могут быть использованы холоднотвердеющие (ХТС), пластиковые и наливные смеси (ЖСС), керамические массы, а также металлические формы (кокили).

Керамизация заключается в заполнении зазора, образованного опорной частью формы и моделью, огеливаемой суспензией. На рис. 2.2. приведена схема керамизации песчаной формы. По модели и накладному телу изготавливается опорная часть формы. После удаления накладного тела собирают опорную часть формы с моделью. В образовавшийся зазор между опорной частью формы и моделью заливают огеливаемую керамическую суспензию. Затвердевший слой керамической суспензии термически обрабатывают.

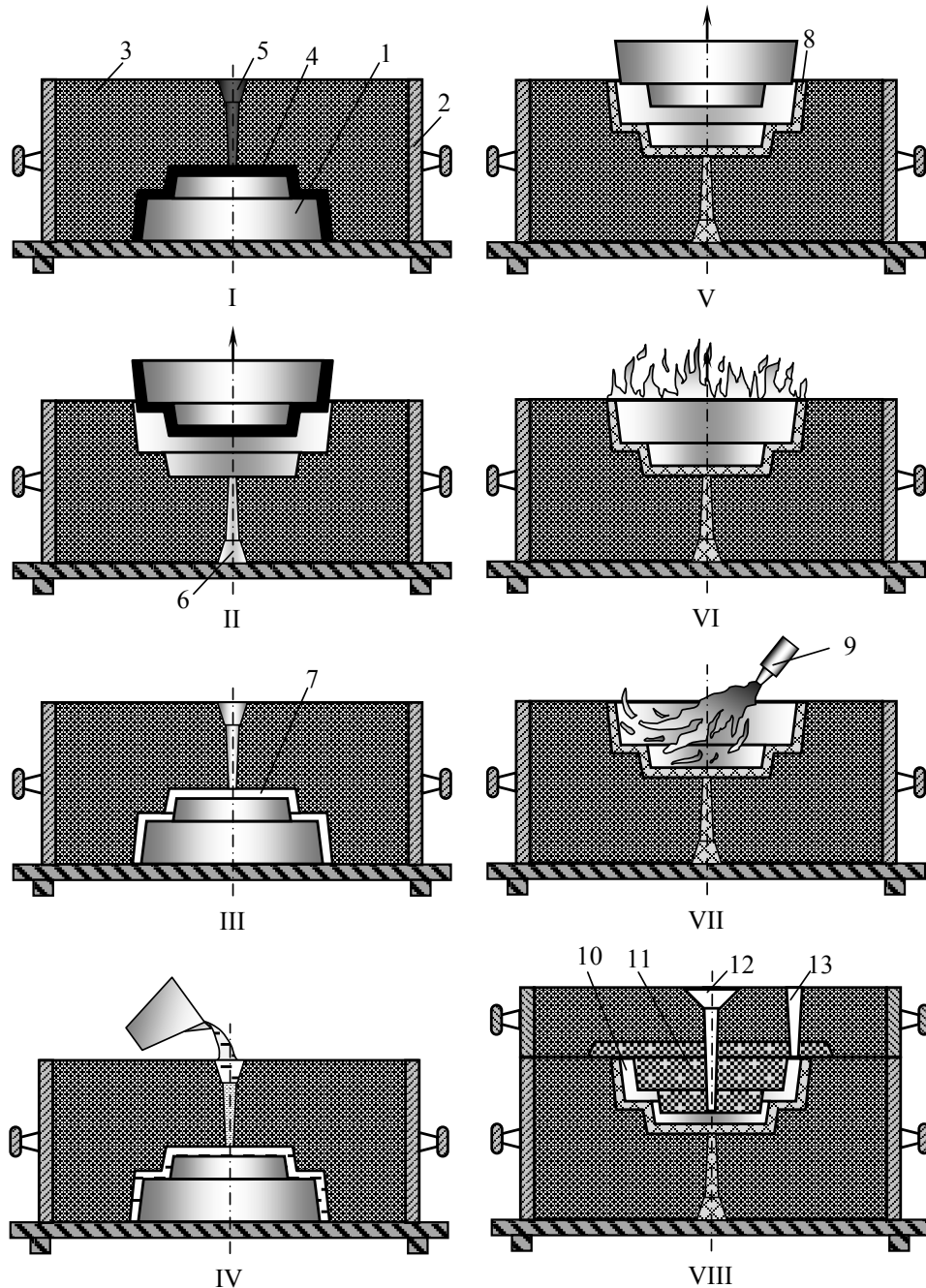


Рис. 2.2. Схема изготовления керамизированных форм: I – изготовление опорной части формы; II – извлечение модели и накладного тела; III – сборка модели с опорной частью формы; IV – заливка суспензии; V – извлечение модели после огеливания залитой суспензии; VI – формирования сетки трещин (выжигание спирта / ацетона); VII – термическая обработка керамического слоя; VIII – форма в сборе; 1 – модель отливки; 2 – опока; 3 – опорная часть формы; 4 – накладное тело; 5 – модель литника для суспензии; 6 – полость литника для суспензии; 7 – зазор; 8 – слой затвердевшей суспензии; 9 – горелка; 10 – полость формы; 11 – стержень; 12 – стояк с воронкой; 13 – выпор

Заполнение зазора осуществляют свободной заливкой суспензии или под действием давления. Представляется целесообразным заполнение зазора всасыванием, особенно в случае формирования тонких облицовок, соизмеримых со слоем краски. С целью качественного формирования облицовки и исключения возможного ее прилипания к поверхности модели применяются разделительные покрытия.

После затвердевания суспензии модель (при сложной конфигурации) довольно трудно отделить от керамики. Для этой цели используют винтовые съемники. Эффективным средством для отделения модели является подача сжатого воздуха на границу раздела «модель – форма». В модели выполняют 1 – 2 отверстия диаметром 4...5 мм, которые закрывают пробкой во время заливки суспензии. После затвердевания смеси пробку удаляют, а канал соединяют с источником сжатого воздуха. При этом модель легко отделяется от формы.

После затвердевания смеси и удаления модели керамическую облицовку поджигают для удаления летучих, а затем прокаливают. Прокалку осуществляют газовыми горелками, паяльными лампами или в термических печах. Рекомендуется прокалывать стержни и формы при температуре: для стали – 950...1000 °С в течении 1,5...2 ч; для чугуна – 800...900 °С в течении 1...1,5 ч; для алюминия – 700...750 °С с временем выдержки формы при этой температуре не менее одного часа.

Термообработка керамической облицовки должна обеспечивать полную дегазацию. Это можно достигнуть не только прокаливанием, но и при перепуске металла за счет тепла заливаемого металла.

После термообработки формы и стержни собирают по принятым в литейном производстве методам. Формы и стержни для стали рекомендуется перед заливкой прогреть до 150...200 °С для удаления адсорбированной влаги.

2.2. Практическое использование технологии

2.2.1. Изготовление точнолитых вставок пресс-форм для литья под давлением цветных сплавов

Важными факторами, сдерживающими широкое распространение литья под давлением цветных сплавов, являются большая трудоемкость и сложность изготовления формообразующей оснастки, т.е. вставок пресс-форм, а также дефицит инструментальной стали. Поэтому актуальной является разработка новых, малоотходных и менее трудоемких технологий изготовления вставок.

Одним из перспективных направлений является литье в керамизированные формы. Этот метод успешно применяется для изготовления точнолитых форм с использованием серого чугуна. Однако применение разработанной технологии для изготовления вставок пресс-форм из стали 40Х5МФС не дало положительных результатов из-за невысокой точности и низкого качества поверхности отливок. Например, отклонение размеров отливок, имеющих форму цилиндра с диаметром основания 80 мм, составило ± 1 мм.

Установлено, что причиной указанных недостатков является песчано-жидкостекольная основа формы. При термообработке керамической облицовки, а также во время заливки и контакта (через облицовку) с жидким металлом происходит прогрев основы до температуры свыше 600 °С и ее деформация. Это приводит к отклонению размеров отливки. Кроме того, в песчаной форме медленно происходят процессы

кристаллизации и охлаждения, вследствие чего поверхность отливки значительно окисляется, что ухудшает ее качество. Увеличивается также размер зерна стали.

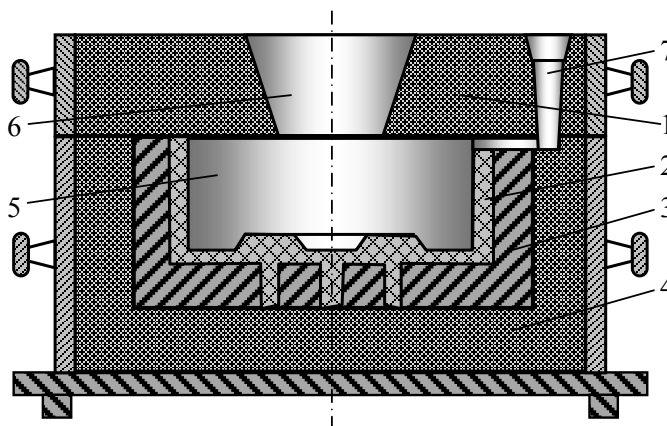


Рис. 2.3. Схема керамизированной формы для отливки вставок пресс-форм: 1 – полуформа верх; 2 – керамическая облицовка; 3 – чугунная обечайка; 4 – полуформа низ; 5 – полость формы; 6 – прибыль; 7 – воронка, стояк и литниковый ход

Исследования показали, что качество литых вставок значительно повышается при использовании вместо песчано-жидкостекольной основы керамизированной формы чугунной обечайки (рис. 2.3). Керамизированная обечайка не деформируется при прокаливании керамики и выполняет роль холодильника при заливке формы сталью. Для удобства сборки форм обечайка непосредственно перед заливкой заформовывается песчано-глинистой смесью.

Керамическую облицовку получали путем заливки холодноогеливаемой суспензии в зазор между постоянной металлической моделью и чугунной обечайкой. Связующим служил гидролизированный этилсиликат 40. Наполнителем в суспензии может быть маршаллит или циркон. Последний обеспечивает получение более гладкой литой поверхности. В качестве отвердителя применяли раствор NH_4OH (5 %). В дне обечайки предусмотрели отверстие диаметром 10...15 мм для заливки суспензии и 5...10 отверстий диаметром 3...4 мм для увеличения прочности сцепления керамики с обечайкой. Эти отверстия служат также для удаления воздуха из формы при заливке металла. После затвердевания суспензии модель удаляли из полости формы и поджигали оболочку для удаления летучих. Прокаливание оболочки осуществляли при 700 °С в нагревательной печи.

Полуформу верх изготовляли из смеси на жидком стекле, литниковую систему и прибыль окрашивали противопожарной краской.

В качестве шихтовых материалов использовали вышедшие из строя вставки пресс-форм и отходы стали 40Х5МФС. Плавку осуществляли в индукционной печи с кислой футеровкой. Металл раскисляли в печи ферросилицием и ферромарганцем, в ковше — алюминием. Заливку форм проводили при 1575...1600 °С. После выбивки и очистки отливки имели чистую гладкую поверхность. Отклонения размеров при номинальном диаметре 80 мм не превышали 0,05 мм, что позволяло полностью исключить механическую обработку рабочей поверхности вставок.

Перед механической обработкой плоскостей смыкания и посадочных поверхностей вставки отжигали при 850...880 °С в течение 4 ч. Твердость литой стали после отжига составляла НВ 240...260. Для предотвращения окисления поверхности вставок пресс-форм отжиг проводили в засыпке древесного угля.

Несмотря на небольшой объем механической обработки, данная операция вызывает наибольшие трудности при внедрении точнолитых вставок в производство. Это свя-

зано с различием в технологии обработки литых вставок и изготовленных из поковок. При обработке литых вставок необходимо за базу принимать плоскую поверхность рабочей полости или плоскость смыкания. В последнем случае плоскость смыкания должна быть точнолитой, т.е. получена по керамизированной поверхности формы.

Закалку литых вставок производили от 1050...1070 °С в масле. Нагрев под закалку осуществляли в соляной ванне. После отпуска при 450...500 °С вставки имели твердость HRC 48...50.

Преимуществами предложенного метода изготовления вставок пресс-форм являются: снижение трудоемкости изготовления на 50...60 %, экономия инструментальной стали за счет использования отходов и вышедших из строя вставок.

2.2.2. Точнолитая оснастка и эффективность ее применения

Износ формообразующей оснастки может быть разделен на три группы: износ под влиянием абразивного действия формуемого изделия (литейные формы, цементные изделия и т.д.); износ под влиянием трения оснастки о пластичный металл (различного рода штампы); износ под влиянием расплава (органических, силикатных, металлических). Разнообразие контактных процессов приводит к износу, характер которого и природа пока недостаточно изучены.

подавляющая часть оснастки изготавливается либо литьем в песчаные литейные формы без последующей механической обработки (изложницы, крупные кокили и др.), либо механообработкой из черных и цветных сплавов (штампы, пресс-формы и др.). Точнолитая оснастка, не требующая механообработки рабочих полостей применительно к пресс-формам с тонкорельефными поверхностями, почти не используется и ее изготавливают дорогими механическими методами.

Износ оснастки происходит значительно быстрее агрегата (пресса, машины литья под давлением) и необходимо изготовление дублеров. При сложной оснастке и недостаточной ее стойкости (для тугоплавких расплавов) оснастка лимитирует производство заготовок. Поэтому решение проблемы изготовления оснастки эффективными методами является народнохозяйственной проблемой.

Освоены и внедрены пресс-формы из чугуна, особенностью которых являются тонкорельефные поверхности рабочей части и работа в контакте с силикатным расплавом, запрессовываемым при температуре 1250...1300 °С. Кроме того, освоены и внедрены в производство вставки для пресс-форм литья под давлением из стали 40X5МФС для изготовления отливок из латуни.

Эффективность внедренных стеклоформ из чугуна сводится к снижению трудоемкости на 50...60 %, уменьшению расхода металла на 20...25 %, повышению стойкости в 1,8...2 раза.

Освоены стеклоформы как неразъемные (например, для конфетниц, пепельниц, подвесок люстр), так и разъемные (для ваз, светорассеивателей и др.), состоящие из двух, трех и четырех составных симметричных частей, строго центрируемых при сборке форм. При этом необходимо подгонять отдельные части форм по рисунку, поэтому при изготовлении таких форм необходимы минимальные деформации с тем, чтобы отсутствовали пространственные отклонения, которые могут нарушить конфигурацию рисунка и изделия. При освоении неразъемных форм применены керамизированные стержни, где основой является стержень из жидкостекольной смеси, а облицованной – холодногеливаемая суспензия. Однако при тепловой обработке таких стержней в печах вследствие различия в коэффициенте термического расширения керамики и жидко-

стекольной основы наблюдались растрескивания и деформация. Поэтому был отработан режим термической обработки.

Так как деформационный процесс связан с режимом удаления летучих, то целесообразно удаление жидкой фазы и летучих производить до удаления керамики из оснастки. Таким методом является применение шликерной керамики, заливаемой в гипсовую оснастку, которая поглощает воду.

Однако для огеливаемой керамики на органических связующих это сделать пока не удастся. При применении же водного шликера, изготовленного из плавленного кварца при заливке в гипсовую оснастку, возможно получить стержни практически без деформации. Термообработка таких стержней дает меньшую деформацию, чем стержней из огеливаемой керамики.

Особенностью механообработки пресс-форм является выбор базы, которой служит обычно рельеф. Для использования рельефной поверхности в качестве базы необходимо изготовить кондуктор, имеющий на поверхности рельеф, аналогичный пресс-форме, но с зеркальным изображением.

Опыт освоения точнолитой оснастки для получения изделий из силикатных расплавов и из металлов при литье под давлением позволяет считать, что он может быть распространен на широкий круг оснастки в различных областях народного хозяйства.

2.2.3. Керамизированные формы для точного литья стеклоформирующей оснастки

При изготовлении керамических форм, получаемых по постоянным моделям, после затвердевания суспензии керамика находится в контакте с постоянной моделью и полностью воспроизводит ее конфигурацию и размер. Искажение размеров начинается в период после отделения керамики от модели и связано с удалением из нее жидкой фазы (растворителя). Конфигурация поверхности керамики при удалении растворителя выжиганием оказывает существенное влияние на величину температуры, возникающей над поверхностью и влияющей на условия сушки (рис. 2.4).

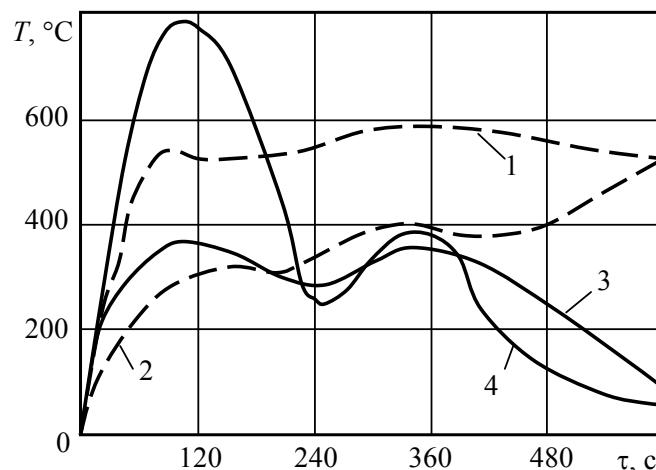


Рис. 2.4. Изменение температуры у горизонтальной (1, 2) и вертикальной (3, 4) поверхности керамики на расстоянии от поверхности, мм: 10 (1, 3); 0 (2, 4).

Различные условия сушки вызывают неодинаковую деформацию поверхностного слоя керамики.

В начальный период горения в керамике наблюдается расширение, вызванное массопереносом жидкой фазы вглубь вследствие термовлагопроводности, с последующим развитием усадки. Затрудненная усадка керамики приводит к возникновению трещин и деформации поверхности керамики и, при прочих условиях, зависит от скорости сушки.

Кинетику сушки и трещинообразования керамики определяли по структуре изломов (толщине сухой зоны), и массовому расходу растворителя.

Установлено, что изменение скорости роста сухой зоны и массового расхода растворителя носит циклический характер, обусловленный взаимозависимостью градиента температуры ΔT и градиента влагосодержания ΔU , возникающих при сушке и имеющих противоположное направление. При высокой скорости роста сухой зоны происходит быстрое опорожнение капилляров и интенсивная усадка завершается образованием мелких равномерных трещин. При уменьшении скорости роста сухой зоны происходит образование и развитие крупных трещин, вызывающих значительную деформацию поверхности керамики.

Увеличение скорости сушки путем повышения температуры над поверхностью керамики обеспечивали удалением растворителя в печи. В интервале температур 600...900 °С наблюдается увеличение размеров керамики на 1...2 % вследствие ее расширения, возникающего при интенсивном массопереносе растворителя вглубь. Этот метод управления структурой и размерами керамики непригоден для форм с опорным слоем из песчано-жидкостекольной смеси из-за размягчения опоры: деформация форм может достигать 1...2 мм и даже сопровождаться отслаиванием керамики от опоры.

Поскольку технологически нельзя обеспечить одинаковую и высокую температуру над всей сложной поверхностью керамизированных форм, предложен способ поэтапной их керамизации, позволяющий стабилизировать условия удаления растворителя над отдельными, наиболее важными участками. Для этого, в первую очередь, облицовочный слой наносят на ровных базовых поверхностях, а удаление растворителя осуществляют в вертикальном положении, позволяющем создать наиболее высокую температуру. При этом исключается образование крупных трещин. После керамизации базовых участков облицовочный слой наносят на остальные участки формы. Такой метод не устраняет деформации, но уменьшает ее до минимальных значений.

Для предотвращения искажений размеров, вызванных деформацией песчано-жидкостекольной опоры, уменьшают температуру термообработки до 400...500 °С при одновременном увеличении длительности до 6...9 ч. В этом случае повышенная остаточная газотворность керамики должна быть компенсирована увеличением периода времени отвода теплоты перегрева жидкого металла до значений, превышающих период релаксации давления в керамике.

По результатам расчетов периода времени отвода теплоты перегрева плоской чугунной плиты, затвердевающей в керамизированной форме, построена номограмма, позволяющая выбрать необходимую температуру заливки в зависимости от толщины слоя керамики и толщины отливки. По результатам расчетов и экспериментов определено, что для заготовок стеклоформ температура заливки должна быть не менее 1440...1460 °С.

Выбранные режимы изготовления и заливки форм, обеспечивающие получение качественных заготовок стеклоформ без дефектов поверхности, позволили ограничить деформационные процессы, но рассев размеров сохранился значительным. Основной причиной ограниченной размерной точности этилсиликатной керамики является удаление жидкой фазы из керамики в период после отделения керамики от модели, поэтому для повышения точности керамики необходимо изменить метод формообразования.

Деформационные процессы могут быть предотвращены удалением жидкой фазы в период контакта керамики с моделью. Реализация этого принципа достигается при формообразовании керамики из водного шликера на основе плавленного кварца путем заливки шликера на модель, способную к влагопоглощению.

Для использования кварцевой керамики в качестве облицовочного слоя форм добивались увеличения ее открытой пористости до 35...40 %, позволяющей при свободной заливке холодных форм получать отливки без газовых дефектов.

В качестве эффективных порообразователей, инертных к поверхностному заряду частиц шликера, выбраны порошок алюминиевой пудры и древесные опилки.

Порообразующее действие пудры обусловлено несколькими причинами. При замешивании пудры в шликер происходит слипание мелкодисперсных частиц пудры с образованием пузырей различных размеров, фиксируемых в структуре при наборе керамики. При выдержке и перемешивании шликера гидрофобность поверхности частиц пудры уменьшается. Вследствие этого происходит уменьшение содержания свободной воды в шликере, уменьшение размера пор (пузырей) и увеличение вязкости шликера, затрудняющее перемещение частиц при наборе керамики, что способствует увеличению пористости керамики. Однако, превращение частиц алюминия в оксиды, образующиеся при нагреве выше 700 °С, вызывает размерные отклонения керамики, ограничивающие ее точность.

Использование опилок в качестве порообразователя требует оптимизации состава шликера по содержанию и дисперсности вводимых частиц из-за низкой плотности материала. Набор керамики из шликера, содержащего опилки, сопровождается подсосыванием и укладкой керамических частиц к поверхности модели и всплыванием порообразователя. Поэтому особенностью структуры кварцевой керамики, содержащей опилки, является наличие поверхностного слоя чистой керамики при относительно равномерном распределении порообразователя в остальном сечении. При содержании опилок более 8,5 % всплывание частиц ограничено, а образующийся поверхностный слой чистой керамики, толщиной 0,2...0,5 мм, не выдерживает напора металла, что ухудшает поверхность отливок. При содержании менее 5 % опилок структура керамики неоднородна, так как вследствие седиментации поверхностный слой чистой керамики, не содержащей порообразователя, составляет более 2...3 мм и способен вызвать газовые дефекты при заливке.

Оптимизацию состава шликера проводили методом планирования эксперимента. Уравнение регрессии, описывающее влияние содержания опилок (X_2) в пределах от 4,5 до 6,5 г на 40 мл шликера и их диаметра (X_1) от 0,1 до 0,4 мм на изменение пористости керамики имеет вид:

$$Y = 34,17 - 1,82X_1 + 2,62X_2 - 0,97X_1X_2, \quad (2.2)$$

где Y – открытая пористость, %.

Уравнение показывает, что в выбранных пределах варьирования факторов существенное увеличение пористости происходит при уменьшении размера частиц и увеличении их содержания.

При определении влияния этих факторов на изменение прочности керамики получено уравнение регрессии следующего вида:

$$Y = 0,76 - 0,105X_2 + 0,125X_1X_2. \quad (2.3)$$

Прочность сырой керамики существенно зависит только от содержания опилок, а влияние их размера (X_1) находится во взаимосвязи с уровнем фактора (X_2). При этом увеличение размера порообразователя способствует увеличению сырой прочности ке-

рамики. Наиболее отчетливо этот эффект наблюдается при использовании опилок размером не менее 0,4 мм и обусловлен двумя причинами.

С одной стороны, увеличение размера опилок увеличивает выталкивающую силу, способствующую всплыванию частиц и уменьшению их содержания в керамике к окончанию набора. С другой стороны, по мере увеличения размера опилок, их форма от шарообразной приближается к цилиндрической, а армирование материала волокнистой арматурой (в отличие от армирования дисперсными частицами) способствует увеличению прочности композиции.

Для оптимизации состава шликера по условию достижения максимальной пористости и прочности после термообработки на основании полученных зависимостей построена номограмма (рис. 2.5), позволяющая получить кварцевую керамику с пористостью 35...37% и прочностью 0,7...0,85 МПа.

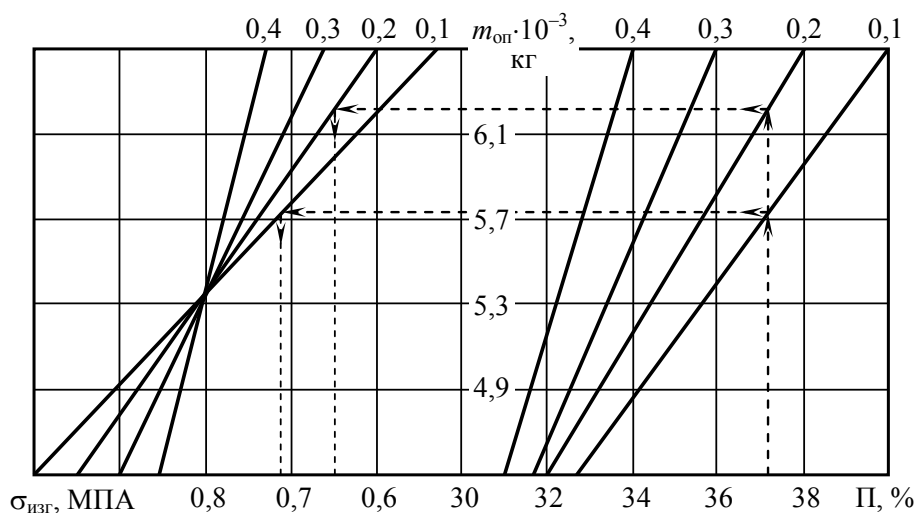


Рис. 2.5. Номограмма для выбора содержания опилок в шликере по условию обеспечения необходимой пористости и прочности керамики

Технология керамизации песчаных форм пористой кварцевой керамикой заключается в установке готовых керамических оболочек на поверхности модели и последующем формовании наполнительной смеси, в которой фиксируется пористая керамика. Комбинированные керамические покрытия форм получают путем установки пористой кварцевой керамики на модель на отдельных, базовых участках, а остальные поверхности керамизируют известным методом огеливаемой этилсиликатной суспензией, в которой закрепляется кварцевая керамика.

Использование пористой керамики ограничивает шероховатость поверхности отливки уровнем Ra 2,5...5 мкм за счет образования слоя оксидов на отливке. Для уменьшения окисления и, тем самым, уменьшения шероховатости поверхности отливок необходимо уменьшать пористость керамики и использовать материалы, не взаимодействующие с расплавом.

При оценке влияния пористости керамики на шероховатость литой поверхности использовали кварцевую керамику с добавками кристаллического кремнезема (маршаллита) в пределах 0...40%, что позволяло, наряду с изменением пористости от 0 до 22...23%, создать плавный переход свойств от плавленого кварца к свойствам пористой керамики на основе кристаллического кремнезема, используемой для сравнения. По результатам заливки керамики чугуном взаимосвязь пористости керамики с шероховатостью поверхности отливки имеет вид:

$$Y = 0,27e^{-0,003x^2} + 0,17X, \quad (2.4)$$

где Y – шероховатость поверхности отливки, R_a , мкм,
 X – открытая пористость керамики, %.

Уравнение справедливо для отливок из чугуна весом 10...25 кг, исходной шероховатости поверхности керамики не более R_a 0,3...0,6 мкм и пористости керамики не более 20...25 %.

Уравнение показывает, что при нулевой открытой пористости шероховатость поверхности отливок соответствует уровню исходной шероховатости поверхности керамики, что подтверждено экспериментально. В интервале пористости 8...20 % увеличение шероховатости происходит наиболее интенсивно, а при пористости 15,4 %, соответствующей точке перегиба функции, скорость роста шероховатости достигает своего максимума.

Ограничение пористости пределами 3...5 %, при которых окисление отливки незначительно, неприемлемо технологически, так как поверхность отливки поражается отдельными газовыми раковинами, что требует обеспечения нулевой пористости керамики.

Для получения нулевой пористости керамику остекловывали путем оплавления ее поверхности плазменными и газовыми горелками. Остекловывание неспеченной керамики приводит к образованию пузырей в оплавляемом слое. При остекловывании на глубину более 1...1,5 мм происходит искажение рельефа поверхности, потеря профиля для гравюры высотой 3 и 6 мм составляет 50 и 25 %.

Исследованием структуры остеклованной керамики установлено существование трех зон различной плотности. Поверхностный слой состоит из оплавленного кварцевого стекла, содержащего пузыри, попавшие в стекломассу при оплавлении. Промежуточный стеклокерамический слой имеет плотную структуру и образуется в результате спекания и частичного оплавления, происходящего по мере прогрева керамики. За стеклокерамическим слоем располагается структура исходной керамики. Прогрев керамики при остекловывании приводит к перемещению плотного стеклокерамического слоя вглубь, вплоть до выхода на тыльную сторону. Эта особенность формирования структуры керамики позволяет управлять качеством остеклованной поверхности.

Для сохранения конфигурации поверхности и получения плотного бездефектного остеклованного слоя предложен способ сквозного оплавления с тыльной стороны. Ограничение деформации керамики вследствие размягчения при оплавлении достигается размещением ее в опорном слое из порошкообразного графита. Оплаваемая поверхность сохраняет дефектную структуру, в то время как перемещение стеклокерамического слоя вглубь приводит к образованию плотной беспористой структуры керамики на рабочей поверхности. Ограничение окисления отливки при заливке остеклованной керамики формирует шероховатость отливки на уровне R_a 0,6...1,0 мкм. Размерная точность остеклованной керамики соответствует 14 и 15 квалитетам. Керамика эффективна для изготовления неразъемных стеклоформ.

2.2.3. Формирование отливок с тонкорельефной поверхностью повышенного качества

Решение проблемы повышения качества поверхности точнолитых заготовок для разнообразных отраслей машиностроения имеет большое значение, обусловленное экономией материальных, энергетических и трудовых затрат. Данные расчетов показывают, что снижение припусков на механическую обработку, например в объеме

4...5 млн. тонн стружки позволяет ежегодно высвободить труд более 230000 высококвалифицированных станочников и сэкономить 600...700 млн. кВт часов электроэнергии.

Развитие и совершенствование процессов формообразования рельефных литых деталей на основе применения малоотходных и ресурсосберегающих технологий непосредственно связано с обеспечением однородной поверхности отливок повышенного качества: отсутствие дефектов, равнозначность микронеровностей в продольном и поперечном направлениях, минимальная потеря воспроизводимого поверхностного рельефа.

Практика получения точнолитых заготовок показала перспективность развития технологических процессов, основанных на применении негзотворных спекаемых керамических форм и стержней. Однако нестабильность данных процессов формообразования, технологическая малоуправляемость структурообразованием керамических форм и стержней, малоизученность контактных процессов расплава с пористой неметаллической формой сдерживают решение проблемы формирования литой поверхности повышенного качества.

Воспроизводимость расплавом рельефной поверхности пористой литейной формы определяется составом контактирующих сред, их теплофизическими свойствами, конфигурацией и шероховатостью рельефа, а также характером изменения воздушного давления на границе пористой формы и расплава и условиями затвердевания пограничного ламинарного слоя расплава.

При контакте расплава с керамической пористой формой для получения однородной рельефной поверхности отливок повышенного качества необходимо и достаточно создания условий затвердевания пограничного ламинарного слоя расплава при отсутствии локального увеличения воздушного давления на границе пористой формы и кристаллизующегося расплава.

Снижение воздушного давления, осуществляемое методами граничных барьеров, обеспечивает управление степенью активности контактных процессов на поверхности расплава с пористой формой и получение однородной высококачественной поверхности при условии равенства времени затвердевания ламинарного пограничного слоя времени движения расплава по микрорельефу формы на глубину, не превышающую заданную величину микрошероховатости отливки.

При комплексном воздействии принудительного охлаждения керамизированных и керамических форм, вакуумирования и при применении принципа направленного порообразования огеливаемой шликерной керамики реализуется технологическая возможность формирования однородной поверхности тонкорельефных отливок повышенного качества.

Технологические процессы, основанные на применении газотворных песчаных форм с облицованным по постоянным моделям слоем из самотвердеющих огеливаемых суспензий на плавном кварце, аморфном кремнеземе, и процессы электроосаждения тугоплавких металлов на литые поверхности из легкоплавких сплавов, обеспечивают формирование тонкорельефных отливок с высококачественной поверхностью, стабилизацию допуска по размерной точности и снижение трудоемкости.

Изложена характеристика тонкорельефных отливок с классификацией по величине количественных и качественных параметров поверхностного рельефа. Предложено оценивать микрорельеф в зависимости от его характера по величинам степени частоты углублений, выступов на поверхности отливки к отношению линейных размеров. Показано, что при большом разнообразии поверхностных рельефных элементов признаком тонкорельефности отливок может являться значение качественных параметров, характеризующихся величиной отношения линейных размеров рельефа и поверхности отливки, меньше или равным единице. Верхняя и нижняя границы микрорельефа приме-

нительно к тонкорельефным отливкам обоснованы на уровне определяющего размера $h(0,1...10) \cdot 10^{-3}$ м. Наличие разнообразного по конфигурации макрорельефа с определяющим его размером, составляющим десятые или сотые доли основных размеров отливки, вызывает особые технологические затруднения процесса заполнения расплавом и формирования тонкого рельефа. Литейная форма для тонкорельефного литья имеет отличительный признак: отношение ее поверхности к объему значительно превышает аналогичную величину для случая формирования безрельефных плоскостей отливок. Развитая поверхность формы способствует увеличению трения расплава, что отрицательно сказывается на условии заполнения и воспроизведения расплавом поверхности формы. Увеличение поверхности формы обуславливает более высокую скорость отдачи теплоты перегрева расплава. С уменьшением рельефа резко возрастает величина противодействия P , связанного с поверхностным натяжением расплава σ . Если выразить в условных единицах P относительно σ , то при рельефе с изменяющимся размером r функция $P=f(r, \sigma)$ приобретает гиперболический характер и асимптотически приближается к осям при $r > 0,1 \cdot 10^{-3}$ м и $r < 10 \cdot 10^{-3}$ м.

В настоящее время методы формообразования для получения тонкорельефных отливок разнообразны, начиная от песчано-глинистых, оболочковых, керамических, по выплавляемым моделям и включая методы литья под давлением, вакуумную формовку и различные ее варианты. Данные технологические приемы обеспечивают формирование литых поверхностей с микронеровностями по величине Ra от 120 до $20 \cdot 10^{-6}$ м. Характерными являются неоднородности формирующейся литой поверхности не только по абсолютному значению микрорельефа, но и с различными по значению потерями воспроизводимого макрорельефа, что в целом предполагает потребность последующей механической обработки резанием. Для тонкорельефного литья обеспечение гладкости микрорельефа на том или ином уровне Ra или Rz необходимо сочетать с минимально допустимыми потерями макрорельефа. Применительно к тонкорельефным поверхностям однородность предполагает отсутствие поверхностных пороков, равнозначных по характеру распределения и минимальных по абсолютному значению микронеровностей, достигаемых при данном методе формообразования, однозначных и минимальных по абсолютному значению потери профиля микрорельефа.

Выбор способа формирования деталей, отличающихся повышенной сложностью по геометрии рельефа, осуществляется оценкой технологических границ возможности воспроизведения выступа (полости) минимального размера и обеспечения заданной шероховатости поверхности.

Результаты анализа перспективности развития специальных способов литья для получения тонкорельефных отливок без последующей механической обработки резанием показали, что резервы по улучшению качества поверхности имеются в каждом методе формообразования, но затраты и границы технологических возможностей различны.

Специфика формирования литого тонкого рельефа определяется большим количеством факторов: величиной определяющего размера рельефа, теплофизическими характеристиками расплава и контактной поверхности, условиями заполнения расплавом полости формы. Микрорельеф литой поверхности формируется под влиянием воздушного давления, величина которого с течением времени изменяется импульсивно, что и обуславливает, в основном, однородность литой поверхности.

Практика применения различных методов формообразования тонкорельефных поверхностей показывает целесообразность использования специального способа литья в керамические формы по постоянным моделям. Применение химически отверждаемых суспензий на основе тугоплавких огнеупорных материалов, высокотемпературная тер-

мическая обработка форм и, как следствие, их негазотворность, создают условия получения тонкорельефных поверхностей с достаточно высокой степенью воспроизводимого рельефа. Однако свойственная огеливаемым суспензиям нестабильность структурообразования, малоизученность метода и ограниченность применения технологических способов управления процессом формирования тонкорельефных отливок являются сдерживающим фактором для широкого освоения данного метода литья в промышленности, а также разработки на его базе новых методов литья.

Рассмотрены процессы формирования контактного рельефа огеливаемыми суспензиями и водным шликером, термопластичными пастами и др.

Технологические требования получения заданного уровня качества литой поверхности следующие:

1. Условия заполнения жидкой средой полости формы таковы, что поток полностью ламинарный, либо толщина пограничного слоя достаточно велика и неразрушаема.

2. Условия затвердевания отливки выбираются так, чтобы время затвердевания отливки на толщину неразмываемого ламинарного пограничного слоя совпадало со временем движения расплава по микро- и макропрофилю поверхности литейной формы. При этом глубина заполнения расплавом микропрофиля поверхности не превышает величины заданного уровня микрошероховатости отливки.

3. Обеспечивается уменьшение граничной воздушной прослойки между поверхностями затвердевающего расплава и формы за счет вакуумирования. Применяется принудительное охлаждение литейной формы с целью обеспечения условия нерасплавления пограничного ламинарного слоя.

Выполнен расчет процесса заполнения тонкорельефной полости формы и показаны технологические методы его управления.

При аналитической оценке воспроизводимости тонкого рельефа определяли отношение

$$\frac{L-l}{L} 100 = \frac{\sigma}{\Delta P} \left(1 + \frac{\cos \theta}{\sin \varphi} \right), \quad (2.5)$$

где L – размер рельефа на модели;

l – соответствующий размер рельефа на поверхности отливки;

σ – поверхностное натяжение расплава;

φ – воспроизводимый угол рельефа;

θ – угол смачивания расплавом поверхности формы;

ΔP – перепад газового давления на границе поверхности расплава и формы.

Значения σ , ΔP , θ определяли экспериментальными методами: величину поверхностного натяжения и угла смачивания для расплавов методом лежащей капли, ΔP – методом тензометрии по специальной схеме при наличии поверхностного нагрева формы (стержня) и вакуумирования.

Угол рельефа на экспериментальных образцах изменялся от 15 до 90°, величина L воспроизводимого рельефа – от $0,1 \cdot 10^{-3}$ до $10 \cdot 10^{-3}$ м.

Для количественной оценки макропрофиля тонкорельефных отливок применяли специальное экспериментальное устройство, позволяющее методом микрометрии определять потери воспроизводимости поверхностного рельефа.

Оценка однородности литой поверхности производилась исходя из принятого механизма ее образования. Процесс образования неоднородности микрорельефа при контакте расплава с воспроизводимой поверхностью включает три этапа: первый – механическое движение перегретой жидкости по поверхности формы; второй – контакт по-

тока затвердевающей жидкой среды с воспроизводимым рельефом и третий – контакт затвердевшего расплава с образовавшейся воздушной прослойкой.

При I и II этапах процесса жидкая фаза воспроизводит ту степень неоднородности, которая свойственна контактируемой поверхности. В конце II и на всем III периоде контактные процессы затвердевающей жидкой среды деформируют формирующийся литой микрорельеф. Эквивалентный зазор $\delta_{\text{экв}}$ определяется величиной воздушной прослойки ε и размером h – максимальной величиной неровности контактной поверхности.

Экспериментальные значения высоты литого рельефа определяли методом профилирования на профилометре-профилографе и на установке для пневматической оценки шероховатости с рельефными пальперами, воспроизводящими контактную рельефную поверхность.

Анализ количественных характеристик воспроизводимости жидкими средами (огеливаемая суспензия, водный шликер, органическая паста ПС с металлическим порошковым наполнителем, расплавы СЧ-20, сталь 25Л, АЛ4) тонкого рельефа выполняется для двадцати типоразмеров на трех технологических стадиях: металлическая модель – органическая промодель, промодель-керамический стержень, стержень-расплав. Потери воспроизводимого макропрофиля на третьей стадии максимальны и по абсолютному значению увеличиваются, например, для стали 25Л от 13 до 72 %.

Применение технологических методов управляемого охлаждения проточной водовоздушной средой контактной зоны керамической формы и ее вакуумирование обеспечивают потери воспроизводимого рельефа на уровне 3...12 %.

Воспроизводимость микрорельефа керамической формы расплавами СЧ-20 и АЛ4 с увеличением температуры заливки ухудшается в связи с активизацией процесса окисления сформированной литой поверхности. Сравнение рентгенограмм поверхности форм и отливки выявило новообразования в контактной зоне при наличии воздушной прослойки. Как показали результаты экспериментального исследования, толщина слоя оксидов в течение 1200 с при изменении температуры контактной среды от 700 до 900 °С увеличивается с $3,8 \cdot 10^{-6}$ до $16,2 \cdot 10^{-6}$ м. Исследование влияния принудительного охлаждения контактной границы отливка-керамизированная форма и воздушной прослойки на толщину оксидного слоя на поверхности из СЧ-20 показали, что микрошероховатость по абсолютному значению R_a укладывается в значения $(0,62...1,25) \cdot 10^{-6}$ м. Следовательно, применение негасительных керамизированных форм с охлаждением и вакуумированием граничной зоны создают условия для получения литых рельефных поверхностей на требуемом уровне R_a .

При изучении граничных барьеров как средства управления контактными процессами расплав-керамизированная форма приведен анализ условий керамизации литейных форм на основе привлечения экспериментально-аналитических зависимостей качества формирующейся литой поверхности от физико-механических свойств литейных форм из огеливаемой суспензии и водного шликера на плавленом кварце и аморфном кремнеземе.

Решение задачи повышения качества литой поверхности применительно к негасительным керамическим формам имеет определенную специфику, связанную с характером пористости контактного слоя формы.

Характер и величина межзернового пространства, заполненного расширяющимся при повышении температуры воздухом, как и граничная газовая прослойка непосредственно определяют степень окисления поверхности отливки и вероятность формирования пороков газового происхождения.

Кремнеорганике на основе маршаллита, циркона, электрокорунда, наиболее часто применяемой для литейных форм, характерен технологически малоуправляемый про-

цесс образования поверхностной сетки трещин, внутренних каналов и пор. В зависимости от ширины трещин поверхностного слоя керамики, а также ряда технологических факторов (металлостатический напор, поверхностное натяжение на границе расплав-поверхность формы, температура заливки расплава) имеют место также различные виды шероховатости отливки.

Процесс структурообразования керамики в период ее отверждения и при термической обработке приводит к перераспределению пористости, упрочнению, и, вследствие этого, изменению соотношения между газопроницаемостью и газотворностью.

При керамизации литейных форм, заключающейся в создании оболочковых керамических слоев на газотворной песчаной основе, необходимо учитывать взаимное влияние пористости облицовки и основы.

Оптимизация толщины облицовочного слоя выполняется, исходя из учета экономических, технологических и теплофизических особенностей.

Технологическое решение, обеспечивающее достаточно высокую текучесть суспензии при заполнении зазора формы, основано на регулировании количества вводимого гелекатализатора и применения гидрофобных покрытий песчаной основы формы.

Размеры облицовочного слоя формы оказывают непосредственное влияние на условия возникновения и характер распределения термических напряжений в литейной форме при контакте с расплавом.

Как показывают результаты расчета, наличие облицовочного слоя в песчаных формах приводит к снижению величины термических напряжений, возникающих в стенке формы. Однако, учитывая, что термические напряжения возникают в двухслойной форме неравномерно в связи с наличием разнородных слоев по структуре, предложены технологические разработки, основанные на дифференцированном армировании неметаллических форм. В данном случае армирующий каркас выполняется в виде переменного сечения двух элементов. Поверхностные слои формы там, где в первую очередь формируются трещины, армируются элементами с тонким сечением, составляющим порядка $(0,2 \dots 0,3)\delta$. Центральные слои формы, выполняемые обычно из крупнозернистой песчаной основы, армируются утолщенными сечениями арматуры. Потребность дифференцированного армирования двухслойных форм, стержней возрастает по мере усложнения их конфигурации и увеличения габаритных размеров. Вероятность появления дополнительного растрескивания тонких облицовочных слоев из огеливаемой керамики снижается, что стабилизирует условия формирования качественной однородной поверхности отливки.

Сочетание облицовочного и наполнительного слоев формы, выполняемых из разноструктурных песчаных основ, предопределяет необходимость количественной оценки пористости. Для качественного анализа микропористости применяли метод ртутной пирометрии, прибор СПВ-2 и методику «случайной секущей». Предложена классификация огеливаемой керамики по величине удельной протяженности трещин. Для исследования микроструктуры применяли электронноскопию прозрачных шлифов и рентгеновскую дифрактометрию.

Результаты исследования пористости керамизированных слоев как фактора, определяющего характер формирования шероховатости литой поверхности, выявили технологическую возможность ее управлением. Порообразование огеливаемой керамики определяется ее составом, отношением мелкозернистой фракции к среднезернистой, количеством жидкой фракции этилсиликата, условиями ее удаления и режимом термической обработки. Для исследуемых составов керамики определено, что при отношении мелкозернистой фракции к среднезернистой 3:1 и отношении наполнителя к связующему $K=1/2,8$ и $K=1/3$ формируется минимум трещин, ширина которых составляет

$(5...8) \cdot 10^{-4}$ м, при этом время перехода суспензии из жидкого состояния в упруго-пластичное характеризуется минимальной величиной при одном и том же содержании отвердителя. Учитывая капиллярное строение геля, можно предположить следующую схему процесса трещинообразования. К моменту перехода суспензии из жидкого состояния в пластичное поры и капилляры заполнены спиртом C_2H_5OH . Газопроницаемость нулевая. С течением времени фильтрация спирта и процесс испарения, интенсифицируемые искусственными мерами удаления летучих (поджигание, выдержка в горячей воде, ввод HCl и т.п.), вносит существенные коррективы. Чем меньше промежуток времени до наложения первичного теплового потока на отвердевшую керамику, тем большая вероятность формирования плотных структур огеливаемой керамики. При увеличении поверхности разогрева керамики процесс испарения ускоряется вследствие резкого изменения интенсивности массообмена на поверхности керамического слоя с окружающей средой

$$q = \alpha(P_n - P_c), \quad (2.6)$$

где q – плотность потока массы жидкости;

α – коэффициент массообмена;

P_n – парциальное давление у поверхности образца;

P_c – парциальное давление пара в окружающей среде.

Низкий температурный градиент ΔT в керамике соизмерим по абсолютному значению с градиентом влагосодержания ΔU . В результате наложения векторов ΔT и ΔU в прогретом слое изотермическая массопроводность будет дополнительным сопротивлением для переноса жидкости термической массопроводностью. В тот период возникающие напряжения в поверхностном слое малы и трещины отсутствуют или имеют размеры $(0,01...0,05) \cdot 10^{-3}$ м. Первичная тепловая обработка приводит к интенсивному парообразованию, сопровождается процессом конденсации пара во внутренних слоях формы на границе опора-облицовка. Формирование микропористости огеливаемой керамики происходит под влиянием процесса естественного и принудительного испарения жидкой фазы и вторичной термической обработки для спекания. Образование отдельных замкнутых микропор, в отличие от сквозной микрошероховатости, связано, вероятно, с тем, что сближение твердых частиц тонкомолотого наполнителя, обусловленное действием гравитационных и молекулярных сил, в объеме протекает неравномерно. Механическое движение жидкой составляющей суспензии, сочетающееся с интенсивным ее парообразованием, приводит к образованию помимо естественной для огеливаемой керамики сквозной пористости отдельных микропор, т.е. ограниченных пространств, заполненных воздухом. Дальнейшая термическая обработка, связанная с процессом образования комплексов зерен при спекании, приводит к увеличению числа замкнутых пор. При расположении замкнутых пор в поверхностном слое и контакте керамики с расплавом возникает опасность появления неоднородности литой поверхности. При наличии структуры керамики, сочетающей сквозную и замкнутую пористость, вероятность формирования дефектов газового происхождения снижается. Применение керамики типа твердофазного спекания, шликерной имеет ограничения в связи с увеличенным воздействием газового давления, обусловленного замкнутыми поверхностными порами и отсутствием сквозной пористости.

Результаты исследования влияния характера пористости на качество литой поверхности показали, что при обеспечении замкнутой пористости керамики на уровне 2-5% шероховатость отливки не превышает $Ra = (1,0...1,5) \cdot 10^{-6}$ м. При величине пористости керамизированного слоя на уровне 10...14% микрошероховатость литой поверхности превышает значение $Ra = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м. Дальнейшее увеличение пористости приводит к

резкому увеличению газовых дефектов поверхности отливки, качество которой предопределяет удаление поверхностного слоя механической обработкой резанием.

Однородность образующейся литой поверхности в значительной степени определяется условиями наложения температурного и газового полей в облицовочном и опорном слоях керамизированных форм. Под действием прогрева формы газовый поток, обусловленный пористостью облицовочного слоя, и газовый поток газотворного опорного слоя суммируется по мере передвижения температурного градиента. При опорных слоях, выполненных из песчано-глинистых или других смесей, содержащих водные связующие, дополнительно появляется и зона конденсированной влаги. Технологические решения, основанные на применении граничного гидрофобного барьера опорный-наполнительный слой, как показали результаты экспериментального исследования и аналитического расчета, способствуют снижению интенсивности процесса проникновения влаги опорного слоя в 2...2,5 раза. Например, при гидрофобном барьере для керамизированной формы с пористым облицовочным слоем (влажность 5,5 %) интегральное поглощение воды уменьшилось с $1,2 \cdot 10^{-3}$ до $0,4 \cdot 10^{-3}$ кг. Наличие трех характерных зон для процесса переноса влаги – под действием капиллярного всасывания, концентрационной, молекулярной диффузии и адсорбционных сил приводит к неравномерности зон распределения влаги. Скорость процесса движения фронта влаги при изменении пористости с 14 до 25 % возрастает в 1,7 раза. Гидрофобизация опорного слоя практически ограничивает процесс движения влаги к контактной поверхности керамизированной формы в рассматриваемый промежуток времени. Расчеты продолжительности процесса диффузии газового потока опорного слоя и зоны конденсированной влаги, выполненные на основе известного решения уравнения Фика, показали, что при гидрофобизации керамизированных форм сопротивление барьера увеличивает в 4...6 раз время диффузии газовых потоков к контактному слою формы. Шероховатость литой поверхности в этом случае стабилизируется на уровне $Ra=(1,5...2,0) \cdot 10^{-6}$ м. Выполнение гидрофобных барьеров предусмотрено как в виде сплошного слоя на границе облицовка-опора, так и в виде сетки. При использовании в качестве опорных слоев из ХТС или смесей на терморезистивных связующих ограничение газовой диффузии гидрофобным барьером становится явно недостаточным. Прогрев опорного слоя до температуры 600...700 °С в таких смесях приводит к началу деструкции связующего и максимальному газовыделению. Применение газобобных барьеров, например, в виде плавящихся фритт эмали способствует уменьшению по абсолютному значению и по степени импульсивности газового давления на границе затвердевающий расплав-облицовочный слой керамизированной формы и способствует сглаживанию формирующейся микронеровности литой поверхности.

Ограничение пористости облицовочного керамического слоя до величины 4...7 %, при которой наиболее стабильны условия формирования однородной литой поверхности, достигается при создании поверхностного граничного барьера расплав-облицовочный слой. Применение кварцевых шликеров на водной основе позволило технологически обеспечивать такие уровни пористости. Расчеты для определения необходимого радиуса пор, при котором ожидается пористость такого уровня, выполняли, исходя из следующих зависимостей:

$$P = \frac{P_0}{1 - P_0} \left(1 + \frac{b\sigma\tau}{\eta a_0} \right)^3 \left[1 + \frac{P_0}{1 - P_0} \left(1 - \frac{b\sigma\tau}{\eta a_0} \right) \right]^{-1}, \quad (2.7)$$

где P_0, P – пористость до и после спекания, соответственно;
 b – коэффициент формы пор;

σ – поверхностное натяжение;

η – коэффициент вязкости;

a_0 – исходный радиус поры.

При коэффициенте $b=3/4$ для сферической поры и исходной плотности шликера $(1,65...1,68) \cdot 10^3 \text{ г/м}^3$ расчеты показали, что заданный уровень пористости обеспечивается при радиусе пор не более $(2...6) \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Исследования микроструктуры шликерной керамики показали, что введение поверхностной высокотемпературной обработки шликера на плавном кварце практически создает условия для снижения пористости до уровня 2...4 %. При этом термическая обработка при 1700...3000 °С приводит к формированию остеклованного поверхностного барьера с высокой степенью плотности, однако вероятность появления замкнутых пор в этом случае не исключается полностью. Учитывая особенности структурообразования шликерной керамики на плавном кварце и аморфном кремнеземе, для снижения до минимума влияния замкнутых пор в облицовочном слое применили принцип «раздробления» замкнутой поры. В первоначальной стадии формирования водного шликера вводили 1,2...2,0 % гидролизованного этилсиликата. Распределение добавки в шликере при удалении дисперсионной фазы его за счет впитывания гидрофильной моделью способствует тому, что в поверхностном слое керамики в процессе порообразования имеет место явление микротрещинообразования как в период затвердевания, так и при последующей термической обработке. Остекловывание кварцевых слоев, как показали результаты экспериментов на глубину $(0,5...0,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и при применении шликеров с введением этилсиликата, формируют структуры, обеспечивающие литые поверхности с $Ra=(1,1...0,33) \cdot 10^{-6} \text{ м}$. При увеличении глубины остекловывания и наличии поверхностного рельефа с определяемым размером от 3,0 до $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ возникают потери микрорельефа, что является ограничивающим фактором применения в этих случаях остекловывания.

Для формирования гладких поверхностей с макрорельефом $h=(5,0...10) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ поверхностные остеклованные барьеры наиболее целесообразны.

При изучении композиционных методов формирования тонкорельефных поверхностей приведены технологические предложения, основанные на физике процесса электроосаждения, применения металлизированных шликеров в сочетании с литейной технологией.

Выполненные исследования способности жидких сред воспроизводить тонкорельефные контактные поверхности применительно к различным сплавам и обобщение практических результатов оценки качества поверхности отливок при различных методах их формообразования позволили выявить два перспективных направления технологических разработок.

Первое – электролитическое осаждение тугоплавкого металла в жидком состоянии на литую однородную поверхность из легкоплавкого сплава и соединение сформированного слоя с опорным литьевым методом.

Второе – пластическое формообразование с применением металлизированных шликеров из тугоплавких порошков с последующим твердофазным спеканием их в контакте с воспроизводимой поверхностью и пропиткой более легкоплавкими расплавами.

Степень однородности формирующегося электролитического слоя при контакте с литыми легкоплавкими стержнями определяется исходной шероховатостью стержня и характером кристаллического осадка при электрокристаллизации. При выборе метода нанесения гальванических покрытий на поверхность имеется большое различие в однородности явления распределения осажденного металла на макро- и микрорельефах катода. Процесс формирования макрорельефа, определяемый исходя из зависимости закона Фарадея, является технологически управляемым выбором электролита и варьиро-

ванием толщины покрытия. На микрорассеивающую способность электролитов большое влияние оказывает исходная шероховатость поверхности и состав электролита.

Разработка конкретных рекомендаций при оценке однородности электролитических слоев, осаждаемых на различные по составу литые стержни из легкоплавких сплавов, является одной из важных задач исследования процесса получения высококачественных тонкорельефных изделий. Потенциальные возможности композиционной технологии значительны, так как сочетание тугоплавких электролитически осаждаемых и литых слоев обеспечивает условия получения практически любой сложности изделия. Освоение данного метода композиционного литья совершается выборочно для таких объектов, как пресс-формы, рельефные валки, рабочие колеса насосов и др. Особую значимость данная технология приобретает для получения сложных изделий типа элементов СВЧ-волноводов, по степени однородности поверхности и которым предъявляются высокие требования: $Ra=(0,63\dots 0,08)\cdot 10^{-6}$ м.

Результаты исследования влияния состава литых стержней, температуры заливки расплава и пресс-формы на однородность микрорельефа, создаваемого при воспроизведении его электроосаждением серноокислого и пирофосфатного электролитов, позволили получить практические рекомендации. Показано, что для 3-х групп исследуемых составов легкоплавких стержней (на основе металлических сплавов, органических соединений и солевых) соблюдается преобладающая зависимость величины Ra к характеру шероховатости от ΔT – степени перегрева расплава и температуры пресс-формы. Математическая обработка экспериментальных зависимостей величин Ra от ΔT , позволили определить аналитические значения Ra для сплавов типа Sn-Pb, Cd-Zn, Cd-Sn, Pb-Sn-Bi.

Шероховатость электролитического покрытия в контакте со стержнями при формировании опорного литого слоя обеспечивается неизменной, если отсутствуют контактные процессы взаимодействия.

Большие технологические возможности в освоении промышленных методов формообразования тонкорельефных поверхностей без механической обработки резанием заложены в шликерной технологии. Применение термопластической пасты из мелкодисперсного металлического порошка позволяет формировать тонкий рельеф с высокой степенью воспроизводимости. Однако последующая технологическая операция спекания приводит к ухудшению сформированного микрорельефа и порообразованию. Как показали результаты экспериментов, микрошероховатость поверхности после термической обработки снижается на 15...25 %. Наблюдается формирование неоднородностей микропрофиля.

Сочетание термической обработки и пропитки более легкоплавкими композициями, чем металлическая основа шликера, в значительной степени способствует выравниванию однородности поверхности. При параметре Ra контактной поверхности $0,63\cdot 10^{-6}$ м поверхность из термопластичной пасты из порошка железа с дисперсностью зерен $20\cdot 10^{-6}$ м после пропитки расплавом меди характеризовалась $Ra=(0,75\dots 0,8)\cdot 10^{-6}$ м.

При равенстве температуры прогрева тонкорельефной поверхности и температуры жидкой пропитывающей среды поверхностные поры затягиваются. Характер сглаживания микрорельефа поверхности металлокерамических элементов определяется также и способом пропитки. Кроме этого способа пропитки пор расплавом представляют практический интерес технологические решения, обеспечивающие заполнение пор жидкой средой под давлением.

Апробированные технологические приемы для формирования тонкорельефных поверхностей наиболее приемлемы для получения изделий с плоским сложным орнаментом и элементов художественных украшений.

2.2.5. Диски триера, отливаемые в керамизированные формы

Основными недостатками тонкостенных отливок типа дисков триера, получаемых в песчаных формах, является наличие пригара, засоров, газовой шероховатости. Покрытие песчаных форм со сложным рельефом поверхности протипригарными красками из-за недостатков технологии нанесения и несовершенства их технологических свойств является малопримлемым методом повышения качества литой поверхности.

Возможность получать отливки с повышенной чистотой поверхности обеспечивается применением песчано-керамических форм, состоящих из песчаного опорного слоя, изготовленного по CO₂-процессу, и облицовочного керамического, выполненного из этилсиликатных огеливаемых суспензий. Такие суспензии обладают большой текучестью в исходном состоянии и упрочняются непосредственно на модели в результате физико-химических процессов. Благодаря тому, что прочность керамической облицовки в 8...12 раз выше сырых песчано-глинистых форм, разрушение ее струей металла не происходит. Вследствие ее мелкозернистого строения и высокой огнеупорности, металл не проникает в поры и менее активно взаимодействует с керамикой.

Несмотря на более высокое качество поверхности отливок, получаемых в керамических формах, применение их в промышленности ограничено ввиду ряда недостатков процесса, к которым относятся значительная толщина керамической облицовки (10...50 мм); отсутствие стабильности процесса твердения суспензии; несовершенство тепловой обработки керамической облицовки, приводящей к различным видам дефектов: деформации, крупным поверхностным трещинам, высокой остаточной газотворности. Применение песчано-керамических форм для изготовления тонкостенных отливок типа дисков из-за указанных недостатков в настоящее время в промышленности практически исключается. Поэтому необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование влияния характера керамического покрытия на качество литой поверхности.
2. Разработка методов заполнения огеливаемой суспензией тонких сечений и исследование ее реологических свойств, обеспечивающих получение качественных керамических покрытий.
3. Разработка эффективных методов дегазации керамических облицовок.
4. Разработка технологического процесса получения тонкостенных отливок в песчано-керамических формах с повышенным качеством поверхности и определение его влияния на эксплуатационные характеристики машин.

При проведении исследований использовались общепринятые и оригинальные методики.

Изучение и выбор состава этилсиликатной суспензии, обладающего высокой агрегативной устойчивостью и необходимой вязкостью для заполнения тонких полостей, осуществлялось с помощью центрифуги и вискозиметра ВЗ-4.

Оценка текучести огеливаемой суспензии проводилась на технологической пробе, представляющей собой песчаную форму, состоящую из концентрических каналов сечением: 1×10; 2×10; 3×10; 5×10; 8×10 мм. Величина текучести определялась длиной заполнения канала пробы суспензией. При этом исследовалось влияние на текучесть концентрации гелеобразователя в суспензии, гранулометрического состава песчаной формы, величины внешнего давления. Определение величины капиллярного впитывания при контактировании суспензии с поверхностью песчаной формы осуществлялось на разработанной установке, позволяющей оценивать эту величину, как объемным, так и весовым методом.

Влияние концентрации гелеобразователя на изменение пластической прочности P_m , модуля упругости E , модуля сдвига G и коэффициента Пуассона μ суспензии во времени изучалось на пластометре и впервые примененном для таких систем импульсном приборе УКБ-ИМ.

Изучение адгезионной связи керамической облицовки с модельной оснасткой проводилось на приборе 08I с помощью разработанных авторами приспособлений, позволяющих оценивать ее величину при изменении угла наклона стенок модели от 0 до 180°.

Движение влаги в керамизированной песчаной форме при ее тепловой обработке исследовалось путем послойного определения влажности. При этом использовалось приспособление, позволяющее брать пробы по сечению образца без нарушения его структуры.

Оценка гидрофобных свойств кремнийорганических пленок проводилась на разработанной авторами установке для определения величины капиллярного впитывания. Характер связи кремнийорганических пленок с песчаной основой определялся с помощью дифрактометра УРС-50М. Применимость тепловой обработки (прогрева до 700 °С) тонкостенных керамических облицовок песчано-керамических форм за счет подогрева или перепуска металла до начала затвердевания обосновывалась расчетом нестационарных температурных режимов в системе отливка-облицовка-песчаная основа, определяемых уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{dt_i}{d\tau} = \alpha_i \frac{d^2 t_i}{dx^2}, \quad (2.8)$$

где t_i – температура соответствующей среды;

τ – время;

x – пространственная координата;

α_i – коэффициент теплопроводности;

$i=1, 2, 3$ – индекс, указывающий соответствие жидкому металлу, керамической облицовке и песчаной основе.

Начальные условия определялись для металла температурой заливки, а для формы температурой 20 °С:

$$t_1(x, 0) = t_{\text{зал}}; \quad t_2(x, 0) = t_3(x, 0) = 20 \text{ °С}, \quad (2.9)$$

где $t_{\text{зал}}$ – температура заливаемого металла.

Граничные условия для облицовки задавались уравнением:

$$\lambda_1 \frac{dt_1(r, \tau)}{dx} = \lambda_2 \frac{dt_2(r + \delta, \tau)}{dx} = \lambda_3 \frac{dt_3(r + \delta, \tau)}{dx}; \quad (2.10)$$

$$t_1(r_1, \tau) = t_2(r, \tau); \quad t_2(r + \delta, \tau) = t_3(r + \delta + R, \tau) \quad (2.11)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности;

r, δ, R – размеры 1/2 отливки, керамической облицовки и песчаной основы вдоль оси x .

Решение поставленной задачи осуществлялось методом конечных разностей. В общем виде система разностных уравнений при равномерной разбивке сред (металл, облицовка, песчаная основа) на элементы имеет вид:

$$t_{m,n+1} = \frac{1}{M_i} (t_{m-1,n} + t_{m+1,n}) + \left(1 - \frac{2}{M_i}\right) t_{m,n}, \quad (2.12)$$

где $t_{m,n}$ – температура m -го элемента в n -й момент времени;

M_i – параметр, определяющий устойчивость вычислительного процесса.

Определение температуры на границах раздела производилось на основе граничных условий (2.9) и (2.10) по формуле:

$$t_{m,n+1} = \frac{2}{M_i(1+NP)}(t_{m-1,n} + Nt_{m+1,n}) + t_{m,n} \left(1 - \frac{2}{M_i} \frac{1+N}{1+NP}\right), \quad (2.13)$$

где $N = \frac{\lambda_{i+1}\delta x_i}{\lambda_i\delta x_{i+1}}$; $P = \frac{M_{i+1}}{M_i}$.

Чистота литой поверхности, получаемая в керамизированных песчаных формах, определялась с помощью профилометра часового типа.

При исследовании процесса течения огеливаемой суспензии в зазоре между песчаной формой и моделью отливки установлено, что изменение текучести происходит под действием двух факторов: капиллярного впитывания дисперсионной среды и процесса структурирования.

Исследования показали, что величина капиллярного впитывания у форм, изготовленных из песка фракции 0,1 и 0,2 мм, на 25...30 % больше, чем из песка фракции 0,315 и 0,4 мм.

При заполнении суспензией узких каналов песчаной формы повышение ее текучести может идти за счет устранения капиллярного впитывания дисперсионной среды. Это осуществляется за счет покрытия каналов гидрофобными пленками. Текучесть суспензии в гидрофобизированных каналах сечением 1×10 и 2×10 мм повышается в 1,9...2,1 раза.

Установлено, что с увеличением концентрации гелеобразователя в суспензии до 4...5 %, понижение текучести происходит преимущественно за счет процесса структурирования. Повышение текучести такой суспензии осуществляется за счет давления, прикладываемого к ней в начальный момент течения.

Анализ физико-механических характеристик огеливаемой суспензии при ее отверждении (рис. 2.6) показывает, что процесс структурообразования состоит из двух периодов: формирования, характеризующегося изменением пластической прочности до величины $0,5 \cdot 10^5$ н/м² и упрочнения, при котором модуль упругости изменяется от $180 \cdot 10^3$ н/м² до $320...380 \cdot 10^3$ н/м².

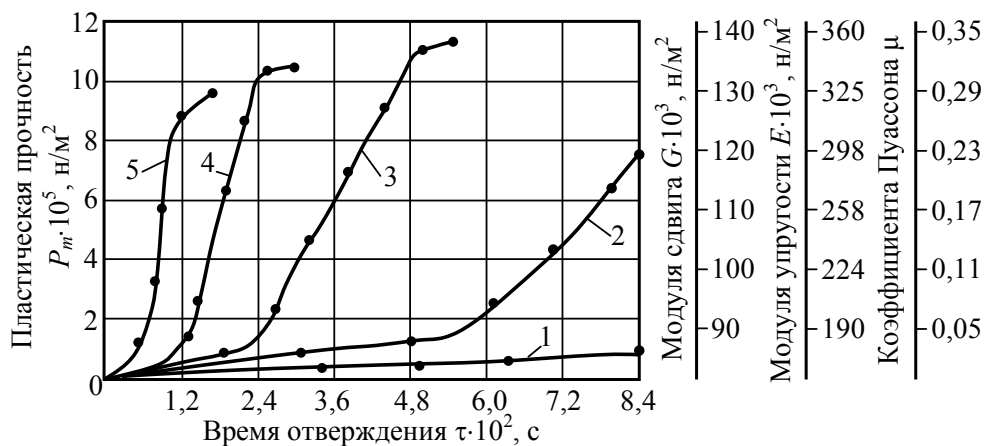


Рис. 2.6. Изменение реологических характеристик огеливаемой суспензии в зависимости от концентрации гелеобразователя, %: 1 (1); 2 (2); 3 (3); 4 (4); 5 (5)

В зависимости от концентрации гелеобразователя в суспензии время формирования структуры и период ее упрочнения могут регулироваться в широком диапазоне. Период перехода этилсиликатной суспензии с низкой концентрацией гелеобразователя

(рис. 2.6, кривая 1) из жидкого в вязкопластическое состояние составляет $(1,08...1,2) \cdot 10^3$ с, что в 4...5 раз превышает период упрочнения.

Период формирования и упрочнения суспензии с повышенным содержанием гелеобразователя (рис. 2.6, кривая 5) примерно одинаков и составляет соответственно 40...45 с.

В результате исследования реологических характеристик огеливаемой суспензии (рис. 2.6) установлено, что вслед за резким увеличением прочностных характеристик, наблюдается их спад, который определяется возникновением высоких внутренних напряжений, вызывающих частичное разрушение структуры, и появлением на поверхности керамики крупных трещин.

Установлено, что предварительное снятие внутренних напряжений в керамике за счет удаления (выгорания) летучих, приводит к возникновению паутинообразной сетки микротрещин, не влияющей на качество литой поверхности и придающей форму повышенную газопроницаемость.

Результаты исследований агрегативной устойчивости огеливаемой суспензии показали, что суспензия в момент ее прессования не расслаивается, если ее пластическая прочность P_m не более $0,2 \cdot 10^5$ н/м². Период времени существования такой прочности для суспензий с различной концентрацией гелеобразователя находят из реограммы (рис.2.6).

При исследовании величины адгезии керамической облицовки к модельной оснастке установлено, что качественный съем керамизированных форм с моделей различной конфигурации обеспечивается определенным соотношением пластической прочности и упругости керамики (резиноподобным состоянием). В табл. 2.1. показано время существования упруго-пластичного состояния керамики при различной концентрации гелеобразователя.

Таблица 2.1

Зависимость времени существования упруго-пластичного состояния керамики от количества гелеобразователя в суспензии

Количество гелеобразователя в суспензии, %	Время существования упруго-пластичного состояния керамики, с		
	начало	окончание	период
1	800	1860	1060
2	340	760	420
3	180	340	160
4	100	182	82
5	35	75	40

При тепловой обработке поверхности керамизированных песчаных форм происходит термодиффузия влаги в песчаной основе с возникновением зоны повышенной влажности и последующим ее заглублением. На основании экспериментальных и расчетных данных построена номограмма, позволяющая определять скорость движения и характер распределения влаги в форме в зависимости от времени действия теплового потока. Установлено, что после снятия теплового потока наблюдается миграция влаги к керамической облицовке. Время возврата влаги находится в прямой зависимости от расположения зоны с повышенной влажностью и от времени выдержки формы перед заливкой.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями выявлено, что кремнийорганические материалы характеризуются наилучшим сочетанием гидрофобизирующих свойств, термостойкости и газопроницаемости.

Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что покрытие кремнийорганическими материалами песчаной основы приводит к возникновению химической

связи между активными группами гидрофобизатора и гидроксильными – песчаной основы и образованию гидрофобной пленки толщиной до 0,1 мм. Такие пленки не подвержены термоокислительной деструкции до 500...700 °С. Установлено, что достаточным условием получения отливок без газовых пороков в керамизированной песчаной форме является последующая (после выжигания летучих) тепловая обработка керамической облицовки до 700 °С.

Теплофизические расчеты по определению такого прогрева керамической облицовки перегревом и перепуском металла до начала затвердевания позволили построить номограммы управления тепловым режимом керамизированной формы для различных толщин отливок и обеспечить их получение без газовых раковин. Так, например, для отношений r/δ , равных 5 и 10, температуру дегазации облицовки (700 °С) получали при перегреве чугуна не более чем на 200 °С. Для $r/\delta=3$ дегазация облицовки достигалась весьма высоким перегревом металла – $t_{\text{пер}}/t_{\text{кр}} \geq (0,25 \dots 0,3)$. Для $r/\delta=1$ перегрев металла не решает поставленной задачи.

Исследование влияния перепуска металла на прогрев керамической облицовки показало, что перепуск металла успешно решает задачу по дегазации керамической облицовки для r/δ не менее 3. Для отношения $r/\delta = 1$ перепуск является также неэффективным средством дегазации.

Сопоставление данных численного расчета для прогрева облицовки во время перепуска, при $r/\delta=3$, с аналитическим решением подтверждает достаточную точность вычислительной схемы при принятых значениях.

Для отношения $r/\delta=1$ решение по дегазации облицовки было найдено при совместном перегреве металла и подогреве формы.

Полученные теоретические и экспериментальные данные исследований использованы при разработке технологического процесса получения тонкостенных отливок с чистыми поверхностями.

2.2.6. Формирование тонкорельефной поверхности отливок в керамизированных формах, получаемых по эталону

Стекольные заводы Украины выпускают методом прессования около 60 % художественных изделий и различных емкостей из стекла и хрусталя с заданным рельефом на поверхности. Для изготовления такой продукции требуется большое количество пресс-форм, которые отливают из чугуна с последующей механической обработкой полости и ручной чеканкой рабочей поверхности. При этом конфигурация и геометрическая точность рабочей поверхности должны строго соответствовать эталону, предварительно изготовленному из стекла.

Такая технология изготовления пресс-форм требует большого количества станочного оборудования, специального инструмента и, особенно, затрат ручного высококвалифицированного труда чеканщиков. Освоение новых изделий занимает 10...12 месяцев. Потому разработка технологии производства пресс-форм с точным рельефом рабочей поверхности методом литья, исключаяющей последующую механическую обработку рельефа резанием, представляется актуальным.

Разрабатываемая технология получения литых пресс-форм с тонкорельефной поверхностью предусматривает изготовление по стеклянному эталону промодели из легкоплавкого модельного материала, изготовление по ней керамизированного стержня, который после термообработки устанавливается в песчаную форму и заливается чугу-

ном. Таким образом, рабочая поверхность будущей пресс-формы формируется за счет последовательных негативных и позитивных отображений рельефа стеклянного эталона.

Необходимо было обеспечить условия, при которых суммарная потеря профиля $\bar{X}_{\text{сум}}$ на рельеф высотой 3..5 мм не превышала допустимое отклонение $\bar{X}_{\text{доп}}$, соответствующее 14 качеству, т.е.:

$$\bar{X}_{\text{сум}} = \bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 \leq \bar{X}_{\text{доп}}, \quad (2.14)$$

где \bar{X}_1 – среднее выборочное значение потери профиля при изготовлении промодели;

\bar{X}_2 – среднее выборочное значение потери профиля при изготовлении керамизированного стержня;

\bar{X}_3 – среднее выборочное значение потери профиля при изготовлении отливки.

Результаты измерений потери профиля на всех переходах технологического процесса обрабатывали методом моментов распределения. При этом распределяли: первый и второй начальный моменты, второй центральный момент, среднее выборочное значение размера, среднее квадратическое отклонение, фактический допуск, значение единицы допуска, количество единиц допуска и качество.

При изготовлении промодели использовали модельные композиции, обеспечивающие получение рельефа только из жидкого состояния свободной заливкой и имеющие малую усадку и достаточную прочность. Для этого использовали модельные составы ПС50-50, ППЭ95-5, сплав Вуда. Установлено, что наилучшей воспроизводимостью при сохранении технологических свойств обладает модельный состав ППЭ95-5 (парафин – 95 %, полиэтилен – 5 %). При температуре заливки 375 К потеря профиля такого состава не превышала 3,1 %, т.е. $\bar{X}_1 \leq 0,15$ мм.

При изготовлении керамизированного стержня применялась огеливаемая суспензия на основе этилсиликата, которую заливали в зазор между промоделью и металлической оболочкой, установленной на рабочей части опорного песчано-жидкостеклянного стержня. Установлено, что заливаемая в этих условиях суспензия имеет высокую текучесть, так как стенки канала обладают гидрофобностью, жидкая фаза не впитывается в капилляры, что приводит к улучшению воспроизводимости рельефа промодели. Наименьшая потеря профиля достигается при отношении наполнителя к связующему 2/1...2,5/1 и составляет не более 1,5 %, т.е. $\bar{X}_2 \leq 0,075$ мм.

Установлено также, что значение \bar{X}_2 можно дополнительно уменьшить за счет заливки огеливаемой суспензии под давлением (до $50 \cdot 10^5$ Па). Заливка под давлением позволяет увеличить количество наполнителя в суспензии до соотношения 3/1... 3,5/1, что дополнительно способствует уменьшению деформации керамики в процессе термообработки. Потеря профиля при этом составляет лишь 0,5 %, т.е. $\bar{X}_2 \leq 0,025$ мм.

Для получения пресс-формы чугуна заливали в керамизированную форму, применяя либо подогрев стержня, либо перегрев металла. Предварительный подогрев керамизированного стержня до 775 К позволяет уменьшить потерю профиля до 1,2 %. Подогрев стержня выше указанной температуры не влияет на улучшение воспроизводимости рельефа расплавом, так как фронт кристаллизации продвигается не со стороны стержня, а со стороны верхней полуформы, что приводит к повышенной усадке у рельефной поверхности.

На воспроизводимость рельефа стержня оказывает влияние температура заливки расплава. Заливку чугуна СЧ 20 производили в интервале температур 1525...1775 К при постоянной (300 К) температуре стержня. Потеря профиля рельефа отливки при подогреве чугуна до 1775 К составляет ~ 0,5 %, т.е. $\bar{X}_2 \leq 0,025$ мм.

Допустимые предельные отклонения на размеры пресс-форм по 14 качеству для высоты рельефа 5 мм, составляют 0,3 мм. Суммируя потери профиля $\bar{X}_{\text{сум}}$ на всех технологических переходах (профиль-керамизированный стержень-отливка) при соблюдении параметров процесса в рекомендуемых пределах, получим $\bar{X}_{\text{сум}}=0,15+0,075+0,025=0,25$ мм, что меньше допустимого отклонения.

Таким образом, разработанный технологический процесс и оптимизация его параметров позволяют получить методом литья пресс-формы необходимой геометрической точности.

К рабочей поверхности литых пресс-форм предъявляются жесткие требования по шероховатости и отсутствию каких-либо дефектов. Минимальная шероховатость достигается за счет керамизированных стержней, однако дефекты рабочего слоя пресс-форм (засоры, газовые раковины и др.) часто возникают по вине песчаной формы. Дальнейшим развитием методов получения песчаных форм с негзотворным слоем у поверхности является их остекловывание. Прочность у остеклованных форм значительно выше, а гигроскопичность и воздухопроницаемость ниже, чем у керамизированных. Остекловывание поверхности форм, не образующих рабочую часть отливок при получении точнолитых пресс-форм, позволяет устранить отмеченные выше дефекты. Это хорошо согласуется с исследованиями форм с остеклованной поверхностью на гигроскопичность, воздухопроницаемость, водородопоглощение металла и на их разрушаемость струей металла.

Сравнительную оценку гигроскопичности остеклованных и неостеклованных образцов проводили при контакте поверхности образцов с увлажненной тканью, содержащей 50...60 % воды. За 160 секунд неостеклованный образец поглотил 6,6 % влаги, а остеклованный – 0,3 % (адсорбированная влага). Установлено, что остекловывание песчаных форм снижает их газопроницаемость практически до нуля.

Исследование поглощения водорода чугуном из песчано-глинистых форм показало, что при контакте чугуна с неостеклованной поверхностью прирост водорода составил 55 % по сравнению с исходным, а с остеклованной поверхностью – прирост водорода практически отсутствовал (менее 0,1 %).

Коэффициент термического расширения α (КТР) определяли на оболочках, полученных путем остекловывания песчано-глинистого образца на глубину 1,5...2,0 мм и последующим удалением неостеклованной части. Предварительно КТР приготовленного таким образом образца рассчитывали по формуле:

$$\alpha_{\text{обр}} = \alpha_{\text{SiO}_2} [\text{SiO}_2] + \alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3} [\text{Al}_2\text{O}_3] + \alpha_{\text{Na}_2\text{O}} [\text{Na}_2\text{O}] + \alpha_{\text{B}_2\text{O}_3} [\text{B}_2\text{O}_3] + \dots \quad (2.15)$$

На основании этого разработаны песчано-глинистые смеси с небольшим КТР=0,04.

Стойкость против разрушения жидким металлом остеклованной поверхности определяли по объему размыва технологической пробы. Установлено, что остеклованные поверхности равного состава по сравнению с неостеклованной поверхностью разрушаются в 3,5 раза меньше. Добавки к SiO_2 оксидов металлов, особенно щелочных, понижают температуру плавления. Поэтому в соответствии с диаграммой состояния необходимо иметь такой состав стекла, чтобы его температура плавления не оказалась ниже температуры плавления заливаемого металла, т.к., в противном случае, стекло расплавится, попадет в металл, приведет к шлаковым засорам и не будет играть роль барьера против проникновения окислительных газов в металл.

КТР остеклованного слоя не должен отличаться от КТР основной массы формы, во избежание отделения остеклованного слоя от основной массы. С этой точки зрения наиболее неблагоприятна форма из смеси на растворимом стекле. При остекловывании

песчано-жидкостекольных форм на их поверхности образуются кратеры глубиной до 1,5 мм вследствие удаления влаги из смеси; наблюдается отслаивание оплавленного поверхностного слоя от основной массы формы и растрескивание остеклованного слоя при повторном высокотемпературном нагреве, что вызвано большим КТР остеклованного слоя. Для исключения указанных пороков предложена песчано-глинистая смесь с содержанием 4 % борной кислоты.

Установлено, что необходимым условием качественного остекловывания является нагрев поверхности форм до 2270 К. Нагрев поверхности песчаной формы производили кислородно-ацетиленовыми и плазменными горелками. При применении кислородно-ацетиленовых горелок необходимо, чтобы поверхность контактировала с зоной максимальных температур плавления, где температура достигает 3270...3470 К (при окислительном пламени). Из-за низкой теплопроводности песчаной формы остеклование ее поверхности на значительные глубины (более 0,002 м) неподвижными высокотемпературными источниками не происходит, хотя на поверхности могут быть выплавки.

Обработку поверхностей кислородно-ацетиленовым пламенем производили методом «строжки». При движении горелки вдоль обрабатываемой поверхности на последней остается остеклованная дорожка с шириной b , при прочих равных условиях, зависит от максимальной температуры плавления T_{max} , минимальной температуры остекловывания T_{min} и диаметра сопла горелки:

$$b = 2 \sqrt{\frac{1}{K} \ln \frac{T_{max} - T}{T_{min} - T}}, \quad (2.16)$$

где K – коэффициент сосредоточенности ввода тепла, зависящий от диаметра сопла горелки;

T – температура среды.

Расчеты показывают, что для кислородно-ацетиленовой горелки № 4 $b=0,026$ м.

Следует учитывать механическое давление потока газа ($\Delta p = V_c^2 / (2gv)$, где V_c – скорость струи; v – удельный объем газа, g – ускорение свободного падения), которое должно быть меньше, чем поверхностная твердость формы.

Для получения равномерного остеклованного слоя обработку поверхности следует осуществлять подвижной струей.

Из данных, приведенных на рис. 2.7 можно сделать вывод, что передвижением кислородно-ацетиленовой горелкой со скоростью от 3,5 до 9,5 мм/с при различных расстояниях можно получить глубину остеклованного слоя 0,6...1,4 мм, что вполне достаточно для технологических целей.

При применении холодной плазмы можно получить те же толщины, но при большей скорости движения (12,5...25 мм/с) плазменной горелки, что в целом увеличивает производительность процесса. При оплавлении поверхности газовым пламенем (кислородно-ацетиленовым, холодной плазмой) методом «строжки» ширина одного прохода зависит от диаметра сопла грелки. Скорость движения

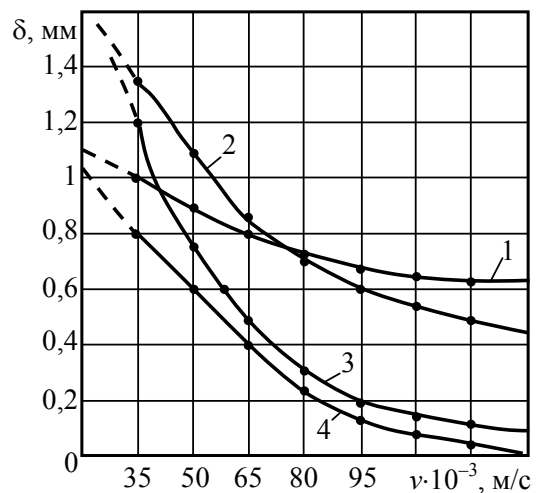


Рис. 2.7. Зависимость толщины остеклованного слоя δ от скорости перемещения горелки v при расстоянии от горелки до поверхности формы: $5 \cdot 10^{-3}$ (1); $10 \cdot 10^{-3}$ (2); $15 \cdot 10^{-3}$ (3); $20 \cdot 10^{-3}$ м (4)

сопла, как указано, может составлять 3,5...12,5 мм/с. Исходя из этих данных, производительность остекловывания поверхности составляет 0,25...1 дм²/мин.

При применении плазмы следует учитывать, что величина теплоотдачи зависит от степени ионизации струи. Для ионизированных струй число Прандтля существенно меньше по сравнению с неионизированными и составляет 0,1 или даже 0,01, что сказывается на коэффициенте теплоотдачи.

В настоящее время освоено остекловывание сравнительно небольших (до 10 дм²) поверхностей. Для определения оптимальных режимов остекловывания разработана электрическая модель, которая позволяет оптимизировать плазменное остекловывание песчаных форм.

Оценка напряжений на поверхности пресс-форм под влиянием термического удара при запрессовке стекломассы показала, что максимальные напряжения сжатия и растяжения не превышают пределов прочности чугуна.

Однако в процессе многократного (более 50 циклов) термоциклирования возникают усталостные трещины. Это указывает на то, что, кроме перепада температур по сечению пресс-формы, на процесс трещинообразования большое влияние оказывают изменение коэффициента термического расширения (КТР), склонность к росту, окисление, качество поверхности. Склонность к образованию сетки разгара зависит также от фазовых и структурных превращений сплавов. Такие превращения в чугуне, как графитизация и окисление, протекающие с увеличением объема, необратимы. Поэтому представляет интерес изучение чугуна с этих позиций.

Структура чугуна у точнолитой поверхности состоит из мелкого точечного графита (балл Гр8) и феррито-перлитной (балл П20 Фе80) или чисто ферритной матрицы, а образцы, вырезанные из средней части заготовки, имеют структуру пластинчатого графита (балл Гр1) и перлитно-ферритную матрицу (балл П92 Фе8). Кроме того, эти образцы отличаются по содержанию углерода и микротвердости. Различие в содержании углерода между точнолитой поверхностью (2,8 %) и средней частью образца (3,25 %) обусловлено явлением обезуглероживания, характерным для керамизированных форм, а также ликвацией углерода вследствие ускоренного охлаждения. Об этом свидетельствуют повышенная микротвердость точнолитой поверхности по сравнению со средней частью образца.

Склонность к росту, характеризуемая величиной остаточного приращения длины Δl образцов после нагрева до 1275 К и охлаждения до 300 К, показана на рис. 2.8 после пяти циклов испытания.

Используя данные рисунка 2.8, проведен расчет КТР для пяти циклов испытания.

Из приведенных данных (табл. 2.2) видно, что чугунные образцы с точнолитой поверхностью менее склонны к росту, чем механически обработанные при всех циклах испытаний. По изменению КТР и Δl можно судить о том, что склонность к росту у первых меньше, чем у вторых, т.к. увеличение КТР и особенно Δl обусловлено процессом графитизации. В структуре точнолитых образцов преобладает феррит, а у механически обработанных – перлит.

В процессе термоциклирования, наряду с внутренним окислением чугуна, происходит графитизация перлита. Наиболее интенсивно она протекает в механически обработанных образцах; после пятого цикла КТР структуры матрицы образцов обоих типов становятся практически одинаковыми. Однако по склонности к росту они существенно различаются. Установлено, что рост чугуна обусловлен в большей мере формой, размерами и распределением графита, чем структурой матрицы, т. к. последняя за время испытаний становится одинаковой в точнолитых и механически обработанных образцах, и значение КТР этих образцов становятся одинаковыми.

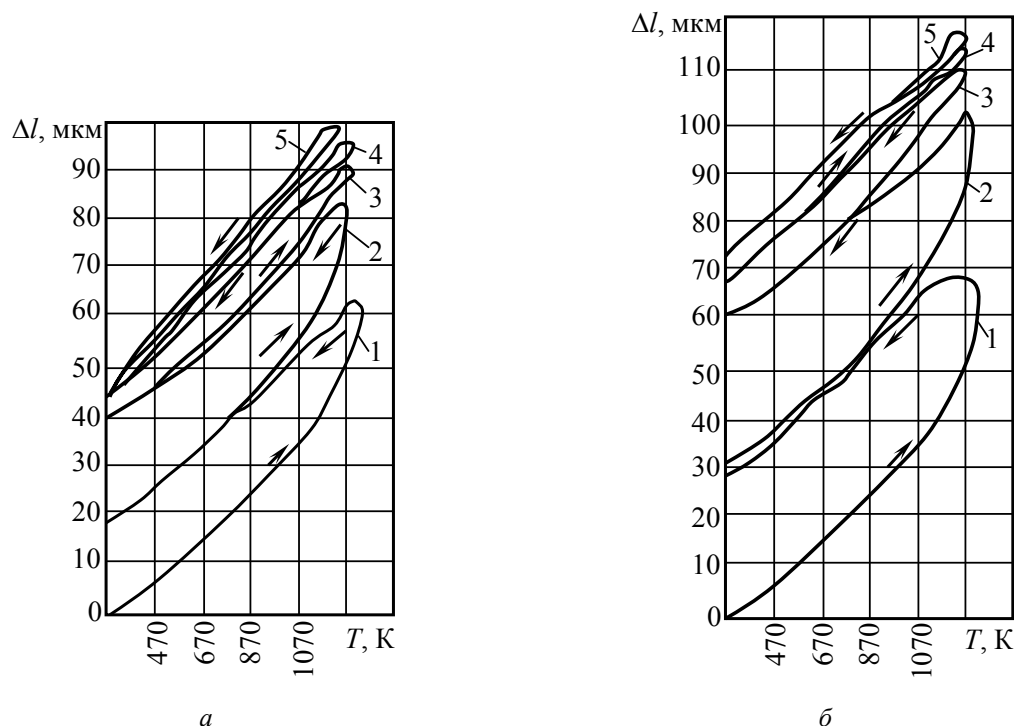


Рис. 2.8. Изменение длины чугунных образцов при нагреве и охлаждении для точнолитой поверхности (а) и механически обработанной поверхности (б): 1, 2, 3, 4, 5 – номера термоциклов

Исследование процесса трещинообразования при термоциклировании показало, что первые микротрещины на точнолитых образцах появляются через 200 термоциклов, а на механически обработанных – через 50. Микротрещины зарождаются на концах графитовых пластин. По мере возрастания количества термоциклов число микротрещин увеличивается, они соединяются между собой, образуя сложный рисунок. Газы, проникая в металл по трещинам и графитовым включениям, вызывают окисление матрицы, создавая дополнительные напряжения и расширение трещин до макроскопических размеров.

После 500 термоциклов на точнолитой поверхности обнаружено 15 микротрещин шириной 40...60 мкм на 0,01 м трассы, а механически обработанной – 24 микротрещины шириной 300...350 мкм на 0,01 м трассы. При одинаковой исходной шероховатости обоих образцов, отвечающей 8 классу, после 500 термоциклов шероховатость поверхности (на участках без трещин) точнолитого образца снизилась до 5-го класса, а механически обработанного – до 4 класса (ГОСТ 2789-95).

Таблица 2.2

Изменение КТР и Δl по циклам испытаний

Тип образцов	№ цикла				
	1	2	3	4	5
КТР, $\alpha \cdot 10^6$ град. ⁻¹					
Точнолитой	1,44	1,44	1,44	1,61	1,61
Механически обработанный	1,26	1,49	1,49	1,49	1,59
Δl , мкм					
Точнолитой	20	39	43	45	46
Механически обработанный	30	58	68	74	74

2.2.7. Особенности технологии изготовления точнолитых пресс-форм

Технологический процесс предназначен для литья пресс-форм с тонкорельефной рабочей поверхностью, которая не требует механической обработки. Пресс-формы применяются при производстве изделий из стекла, пластмасс, резины, металла сложной конфигурации.

Технология предусматривает изготовление по стеклянному эталону промодели из легкоплавкого модельного материала, изготовление по ней керамизированного стержня, который после термообработки устанавливается в песчаную форму и заливается металлом.

Рабочая поверхность пресс-форм формируется за счет последовательных негативных и позитивных отображений рельефа стеклянного эталона. Для получения промодели используется сплав Вуда или органическая композиция из 95 % парафина и 5 % полиэтилена. Оптимальная температура заливки органической композиции, при которой достигается максимальная воспроизводимость рельефа поверхности эталона, составляет 385 К.

Для формирования тонкорельефной поверхности отливки применяется керамизированный стержень с металлической вставкой-холодильником, который повышает текучесть этилсиликатной (холодноогеливаемой) суспензии, исключает деформацию керамики во время термообработки стержня и заливки металла, создает направленную кристаллизацию отливки и плотную мелкозернистую структуру рельефной поверхности. Вставку-холодильник отливают из чугуна в песчаную форму, используя стержневой ящик из древесины. По этому ящику из песчано-жидкостекольной смеси формируют стержень, затем его используют в качестве модели; отливка формируется в зазоре между поверхностью формы и опиленным на 8...10 мм стержнем.

Керамизация стержня для литья пресс-формы осуществляется заливкой холодноогеливаемой суспензии в зазор между промоделью и вставкой-холодильником. Суспензия состоит из трех частей огнеупорного наполнителя (плавленный кварц, циркон, маршалит), одной части гидролизованного раствора этилсиликата-40 и 4...6 % отвердителя (NH_3 – 5 %, H_2O – 95 %). Время огеливания суспензии составляет 1,5...2,0 мин.

Максимальная воспроизводимость рельефа поверхности промодели достигается заливкой суспензии с повышенным содержанием наполнителя в зазор под принудительным давлением. После огеливания суспензии промодель снимается с керамизированного стержня, керамика поджигается для удаления паров растворителя. Затем стержень подвергается объемной термической обработке в печи при температуре 820 ± 50 К или поверхностный слой обрабатывается газовой горелкой в течение 5...10 мин. Выбор способа термообработки определяется конфигурацией и размерами стержня, наличием термического оборудования.

Рабочую поверхность литейной формы перед установкой стержня и сборкой остекловывают кислородно-ацителеновым пламенем или холодной плазмой. Остеклованная поверхность исключает окисление и пригар, разрушение струей металла, насыщение металла водородом. Формовочная смесь состоит из кварцевого песка, бентонита и добавок борной кислоты или буры. Применение смеси такого состава обеспечивает получение гладкой остеклованной поверхности.

Пресс-формы отливаются из серого чугуна эвтектического состава марки СЧ 20. Плавка чугуна ведется в индукционной печи ИСТ-0,06, температура заливки 1700 ± 50 К. Химический состав чугуна, мас. %: С – 3,56; Si – 1,87; Mn – 0,52; S – 0,09; P – 0,1; Fe – остальное.

Высокая термостойкость пресс-форм достигается меньшим содержанием углерода у поверхности, наличием точечного графита. Шероховатость поверхности рабочих полостей пресс-форм соответствует 5-6 кл. (ГОСТ 2789-95).

Особое внимание при разработке технологии уделено воспроизводимости рельефа. Были созданы условия, когда суммарная потеря профиля на рельеф высотой 3...5 мм не превышала допустимого отклонения, соответствующего 14 качеству.

Статистическая обработка результатов измерений методом моментов распределения показала, что среднее выборочное значение величины потери профиля составило:

- на переходе «эталон – промодель» – 0,15 мм (14 качество);
- на переходе «промодель – керамизированный стержень» – 0,075 мм (13 качество);
- на переходе «керамизированный стержень – отливка» – 0,025 мм (11 качество).

Разработана технология механической обработки плоскостей смыкания элементов пресс-формы. При этом базой для обработки является рабочая рельефная поверхность.

Стойкость литых пресс-форм повысилась в 1,8...2 раза, трудоемкость изготовления пресс-форм снизилась в 1,5...2 раза. Срок освоения новых видов изделий сократился с 10...12 до 2...3 месяцев.

2.2.8. Точнолитые рельефные пресс-формы

Разработан и освоен способ изготовления пресс-форм из чугуна методом точного литья. Используются они для производства изделий из стекла и хрустала, имеющих на рабочей поверхности сложный рельеф. По стеклянному или хрустальному изделию (эталону) изготавливают промодель из легкоплавкого материала. На промодель устанавливают опорный стержень из жидкостекольной смеси и металлической вставки-холодильника так, чтобы между ними образовался зазор 3...5 мм. В зазор между вставкой-холодильником и промоделью заливают огеливаемую суспензию на основе гидролизованного раствора этилсиликата. Полученный керамизированный стержень после термообработки устанавливают в литейную форму и заливают расплавом. Применение металлической вставки-холодильника повышает текучесть суспензии, так как при течении суспензии он не поглощает, подобно песчаным стержням, ее жидкую фазу. Это позволяет применять суспензию более высокой вязкости, что повышает плотность керамики, уменьшает ее усадку и трещиноватость.

Под воздействием высоких температур при заливке форм расплавом происходит размягчение жидкостекольной опоры стержня, что приводит к его деформации и искажению геометрии рельефной полости отливки. Применение металлической вставки-холодильника не только исключает деформацию керамизированного стержня, но и создает направленную кристаллизацию отливки от рельефной поверхности к периферии, что позволяет получить плотную, мелкозернистую структуру. Для исключения брака по засорам на точнолитой рельефной поверхности пресс-форм в полость литейной формы устанавливают экран из листовой стали толщиной 0,2...0,3 мм, который предохраняет керамизированный стержень от попадания включений во время заливки расплава. После заполнения полости формы расплавом экран расплавляется. Металлический экран целесообразно применять для литейных форм с простой конструкцией полости.

Для пресс-форм со сложной конфигурацией поверхности целесообразно производить остекловывание внутренней полости литейной формы с помощью пламени газовой горелки или холодной плазмы. Это позволяет, кроме предохранения поверхности керамизированного стержня от засоров, создать также противогазовый барьер, исключить пригар и окисление отливки.

Применение пресс-форм с точнолитой поверхностью снижает трудоемкость их изготовления на 50...60 %, сокращает расход металла на 25...30 % и сокращает время технологической подготовки производства в 2...3 раза. Сохранение поверхности без обработки резанием позволяет повысить термостойкость рабочей поверхности в 1,8...2 раза.

По описанной технологии можно получить пресс-формы практически любых размеров и сложности для изделий из стекла и хрусталя с рельефной поверхностью, различных ваз, а также светорассеивателей и подвесок для люстр.

2.2.9. Использование кварцевой керамики для уменьшения шероховатости поверхности отливок

В основе увеличения шероховатости поверхности отливок по сравнению с шероховатостью исходной поверхности форм лежит окисление твердой поверхности отливки. Пористые керамические формы, применяемые в точном литье, не способны ограничить доступ воздуха к поверхности. Использовалась кварцевая керамика с открытой пористостью 0...24 %. По результатам заливки керамики чугуном установлена взаимосвязь пористости керамики с шероховатостью поверхности отливок массой 10...25 кг.

Для получения нулевой пористости керамику остекловывали путем оплавления ее поверхности пламенем газовой или пламенной горелки. Остекловывание керамики приводит к образованию пузырей в оплавляемом слое и искажению рельефа поверхности. Исследованием структуры остеклованной керамики установлено существование трех зон различной плотности. Поверхностный слой состоит из оплавленного кварцевого стекла, содержащего пузыри. Промежуточный слой имеет плотную структуру и образуется в результате спекания и частичного оплавления по мере прогрева керамики. За этим слоем располагается структура исходной керамики, подвергаемой остекловыванию. Установлено, что прогрев керамики при остекловывании приводит к перемещению плотного стеклокерамического слоя вглубь, вплоть до выхода на тыльную (от оплавляемой) сторону. Эта особенность формирования структуры керамики позволяет управлять качеством остеклованной поверхности. Для сохранения конфигурации поверхности и получения плотного бездефектного остеклованного слоя разработан способ сквозного оплавления с тыльной стороны. Ограничение деформации керамики вследствие размягчения при оплавлении достигается размещением ее в опорном слое из порошкообразного графита. Оплавляемая поверхность сохраняет дефектную структуру, в то время как перемещение стеклокерамического слоя вглубь приводит к образованию плотной беспористой керамики на рабочей поверхности.

Ограничение окисления отливки при заливке остеклованной керамики формирует шероховатость отливок на уровне $Ra = 0,6...1,0$ мкм. Размерная точность остеклованной керамики ограничена 14-15 квалитетом. Керамика эффективна при изготовлении стеклоформ со сложной поверхностью.

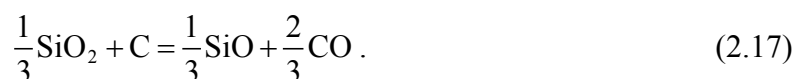
2.2.10. Физико-химические процессы на поверхности отливок при литье в керамизированные формы

Изготовление технологической формообразующей оснастки для различных отраслей промышленности является актуальной задачей. Решение ее требует больших материальных затрат, высокой квалификации специалистов, применения инновационных технологий. В себестоимости изделий стоимость оснастки может достигать 40...45 %.

В литейном производстве формообразующая оснастка широко используется при изготовлении моделей и стержневых ящиков для разовых форм, для кокильного литья, литья под давлением, литья по выплавляемым и выжигаемым моделям и т.д. В отличие от механической обработки широко применяется способ литья элементов оснастки в керамизированные формы, позволяющие получать сложные поверхности с неровностями выше 6-го класса (ГОСТ 2789-95). Малые неровности поверхности в отливках улучшают механические свойства, уменьшают термонапряжения, коррозию. При получении поверхности с малыми неровностями обработкой резанием кроме затрат происходит удаление поверхностного слоя с повышенными механическими свойствами.

При большом количестве достоинств, метод литья оснастки в керамизированные формы имеет недостатки, такие как: поверхность отливки, контактирующая с керамикой окисляется и обезуглероживается на различную глубину, зависящую от температуры металла, его химического состава и материала формы. Это обстоятельство может свести на нет достоинства способа, т.к. рабочая поверхность отливки (как правило, со сложной гравюрой) не подвергается обработке резанием.

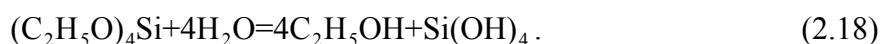
Исследованиями установлено, что скорость охлаждения поверхности, являющаяся функцией температуры и исходного содержания углерода, определяется свободной конвекцией воздуха к поверхности. Обезуглероживание поверхности отливок происходит как за счет взаимодействия углерода металла с кислородом воздуха, так и с кремнеземом формы при температурах выше 1070 К по реакции:



Более существенное снижение содержания углерода на поверхности отливки наблюдается при температурах выше 1673 К, т. е. процесс интенсифицируется. Доказательством этому является присутствие карбида кремния в керамике, выявленное рентгеноструктурным анализом.

Изучение этих процессов позволило наметить и осуществить методы предотвращения недостатков:

1. Холодноогеливаемая керамика в виде суспензии состоит из дисперсной фазы (огнеупорный порошок) и дисперсионной среды – связующего в виде гидролизованного раствора этилсиликата (эфир ортокремневой кислоты $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$). При гидролизе осуществляется процесс замещения этоксильных групп $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ на гидроксильные (ОН) по упрощенной реакции



Продукт гидролиза – органический коллоидный раствор кремниевой кислоты, который и является связующим, при высыхании превращающимся в твердый стекловидный материал. Для уменьшения вероятности обезуглероживания поверхности отливки рекомендуется заменять кварцевый порошок электрокорундом Al_2O_3 , который химически стоек, не вступает во взаимодействие с углеродом расплава, обеспечивает качественную поверхность отливок из высоколегированных сталей.

2. Положительное влияние оказывает уменьшение толщины слоя керамики, наносимой на опорный слой формы или стержня при их керамизации, так как связующее также может служить источником обезуглероживания.

3. Защита поверхности от окисления и обезуглероживания может достигаться обработкой залитой формы углеводородными газами, которые диффундируют к поверхности отливок, разлагаются с отложением пиролитического углерода в порах и на границе с металлом. Пироуглерод блокирует взаимодействие металла с материалом фор-

мы, с кислородом воздуха и препятствует образованию видоизмененного слоя отливки. Использование этого метода позволяет увеличить чистоту поверхности гравюры на 1 – 2 класса (6 и 7 классы по ГОСТ 2789-95).

4. Ускоренное охлаждение жидкого металла при кристаллизации позволяет резко снизить скорость процесса окисления и обезуглероживания поверхностного слоя отливки. Поэтому в ряде случаев целесообразно использовать постоянные литейные формы – керамизированные кокили.

5. Для повышения содержания углерода в поверхностном слое отливки может быть также использована химико-термическая обработка. Хорошие результаты дает одновременное насыщение поверхности стали углеродом и азотом (нитроцементация). Известно, что азот способствует диффузии углерода, что позволяет понизить температуру диффузионного насыщения до 1123 К. В этом случае уменьшается рост зерна аустенита, в диффузионной зоне образуются карбонитриды. Такой слой хорошо сопротивляется термическим напряжениям, износу и коррозии.

2.2.11. Окисление поверхности стальных отливок при литье в керамизированные формы

Оснастка для литья под давлением выполняется, как правило, механическим способом из проката хромовольфрамомолибденовых и других легированных сталей. Стойкость пресс-форм сравнительно низкая, большое количество их, придя в негодность, отправляется в лом. При использовании литейной технологии получения пресс-форм важно сохранить физико-механические свойства, сопоставимые со свойствами проката. С этой целью необходимо проведение следующих мероприятий: переплав лома пресс-форм с минимальным количеством неметаллических включений и газов; оптимальные параметры литниково-питающей системы керамизированных форм; кристаллизация металла под давлением; создание препятствий обезуглероживанию и окислению поверхности отливок; организация направленной кристаллизации и другие меры. В работе рассматривается механизм поверхностного окисления отливок и мероприятия, препятствующие этому.

Воздух из атмосферы поступает к поверхности отливок за счет свободной конвекции. Если в форму не вводят специальные добавки, то других источников поступления газа в реакционную зону нет (принимается, что газотворные вещества в керамике и опорном слое отсутствуют). В связи с тем, что парциальное давление влаги в воздухе на один-два порядка ниже парциального давления кислорода, реакции в пограничном слое с участием таких газов, как H_2O , H_2 и CH_4 ощутимого влияния на процессы высокотемпературного окисления отливок не оказывает. Практически можно считать, что в случае отсутствия добавок активная часть газовой атмосферы у поверхности отливок включает в себя CO , CO_2 и O_2 . Непрерывное поступление кислорода и отвод продуктов реакций с конвективными токами обуславливают постоянную неуравновешенность системы газ-отливка при окислительном характере газовой фазы.

Низкая концентрация постоянных примесей в стали – марганца и кремния, а также их незначительная в сравнении с углеродом диффузионная подвижность позволяют в теоретических расчетах принять допущение, что форму заливают двухкомпонентным сплавом Fe-C.

Температурные зависимости приращений изобарных потенциалов реакций образования оксидов железа и углерода при окислении чистых реагентов кислородом представлены на рис. 2.9.

Их сравнение указывает на предпочтительность окисления углерода при температурах, превышающих 700 °С, причем устойчивым оксидом является СО. Изобарный потенциал ΔZ образования СО при окислении сплава Fe-C зависит от термодинамической активности растворенного углерода. Результаты расчетов (рис. 2.10) позволяют заключить, что при окислении аустенита любого состава во всем температурном интервале его существования ΔZ образования FeO превышает ΔZ образования СО. Следовательно, для развития процесса окалинообразования при охлаждении отливок вплоть до температуры эвтектоидного превращения требуется, чтобы кислород поступал к их поверхности в избытке сверх количества, расходуемого на взаимодействие с растворенным углеродом.

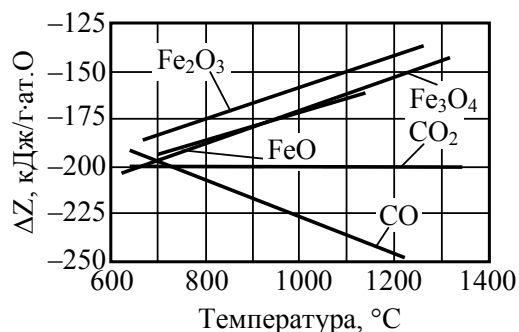


Рис. 2.9. Изобарные потенциалы реакций образования оксидов железа и углерода

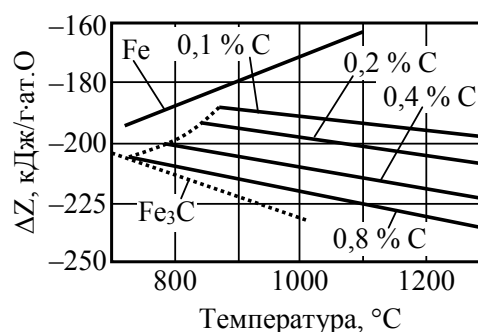


Рис. 2.10. Изобарные потенциалы реакций окисления аустенита в керамической форме

Так как углерод в стали обладает высокой диффузионной подвижностью, то его окисление на поверхности и удаление в составе газообразных продуктов компенсируется доставкой из глубинных слоев отливки в диффузионном потоке. Теоретически при постоянном поступлении к поверхности отливок малых количеств окислителя процесс обезуглероживания становится непрерывным, в то время как окалинообразование может даже отсутствовать.

В случае поступления окислителя в избытке по отношению к стехиометрии реакций образования оксидов углерода кинетическая картина должна существенно измениться. С образованием оксидной пленки концентрация кислорода у металлической поверхности может понизиться до нуля. Следовательно, с момента начала окисления железа процесс обезуглероживания газовой фазой должен затормаживаться. В то же время росту оксидного слоя ничто не препятствует: он обеспечивается диффузией катионов железа к внешней поверхности.

По данным термодинамических расчетов (рис. 2.11) оксид железа может окислять углерод при температурах выше 700...750 °С, но при отсутствии кислорода в реакционной зоне. Таким образом, окалина, препятствуя поступлению воздуха к поверхности отливки, сама становится вторичной причиной обезуглероживания. Вероятный механизм обезуглероживания окалиной можно представить следующим образом: восстановленное на границе «окалина – сталь» железо выкристаллизовывается на металлической поверхности, что позволяет одному из реагентов – углероду непрерывно поступать к сдвигающейся межфазной поверхности диффузионным путем. Однако, обезуглероживание исключительно окалиной маловероятно. Дело в том, что развитие реакции взаимодействия оксида железа с углеродом возможно при условии, что газообразный продукт находит для себя выход из реакционной зоны; если в окалине имеются или образуются пути для удаления газообразного продукта обезуглероживания, то этими же

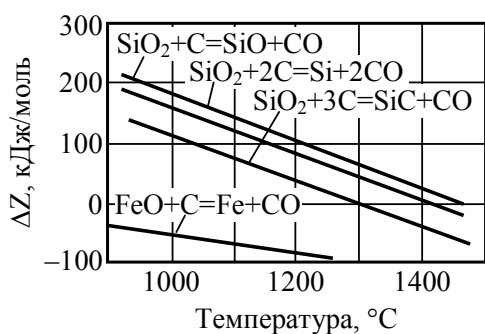


Рис. 2.11. Изобарные потенциалы реакций окисления графита твердыми оксидами

путями к металлической поверхности могут поступать газообразные окислители. Этого достаточно для непосредственного их участия в реакциях обезуглероживания.

Вероятность окисления углерода диоксидом кремния оценивали, анализируя реакции с участием геля SiO_2 – наиболее активной из присутствующих на рабочей поверхности керамики модификаций SiO_2 . Рассчитанные приращения изобарных потенциалов реакций геля SiO_2 с графитом представлены на рис. 2.11. Видно, что протекание реакций возможно при высоких температурах и при отсутствии активных компонентов

в газовой фазе. Вероятность их намного ниже, чем реакции с участием оксида железа. Наиболее предпочтителен процесс с образованием карбида кремния. Известно, что для развития твердофазных реакций при благоприятных прочих условиях необходим достаточный контакт реагентов. Практически это достигается за счет смешивания материалов в дисперсном виде и последующего (при необходимости) прессования. Поверхность контакта углерода стали с кремнеземом формы ничтожна по сравнению с межфазной поверхностью в дисперсной смеси. С появлением оксидного слоя SiO_2 формы вообще не соприкасаются с металлической поверхностью. Во всяком случае, предполагаемый рядом авторов эффект обезуглероживания стальных отливок материалом формы нуждается в объяснении с точки зрения кинетики реакций.

При термодинамической оценке эффективности газотворных и окисляющихся добавок достаточно рассмотреть следующие случаи:

А. В форму вводят материалы, содержащие углерод в свободном виде, например, графит, кокс, древесный уголь и т.п., либо содержащие углерод в составе неорганических соединений, например, карбиды. Добавки должны связывать свободный кислород. В этом случае активная часть газовой атмосферы образует систему « $\text{CO} - \text{CO}_2$ »;

Б. Форму, нагретую до температуры 800...1000 °C, перед заливкой продувают углеводородным газом. В процессе его пиролиза в порах осаждается сажа, а газообразные продукты и неразложившаяся часть удаляются. Поэтому компоненты газовой фазы в залитой форме те же, что и в предыдущем случае;

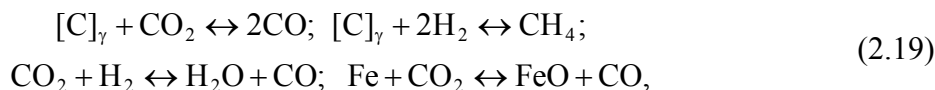
В. Форму продувают углеводородным газом после ее заливки металлом. В период продувки углеводороды и газообразные продукты пиролиза вытесняют из реакционной зоны все прочие газы, в порах оболочки и у поверхностей отливок осаждается пиролитический углерод. После продувки в форме устанавливается за счет свободной конвекции атмосфера, не отличающаяся по качественному составу от случаев (А) и (Б);

Г. В форму вводят органические соединения в твердом или в жидком виде. Если материалы добавляют до термической обработки литейных форм, то они при прокаливании разлагаются и частично сгорают с удалением газообразных продуктов и осаждением твердых продуктов пиролиза в керамике и опорном слое. Поэтому после заливки форм металлом активная часть газовой фазы в реакционной зоне практически не содержит новых компонентов. В случае, когда материалы добавляют после заливки формы, в реакционную зону поступают газообразные продукты разложения. Поэтому реакции с участием углеводородов, воды и водорода могут оказывать заметное влияние на процессы формирования отливок, по крайней мере – в начальный период.

Таким образом, для количественной оценки всех рассмотренных случаев достаточно рассчитать равновесие с двумя газовыми смесями: $\text{CO}-\text{CO}_2$ и $\text{CO}-\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{H}_2\text{O}$. Вто-

рую из них можно представить двучастными системами: «CO – CO₂» и «CH₄ – H₂O», взаимное равновесие которых определяется равновесным соотношением участников реакции водяного газа. Кроме газов в химических реакциях участвуют железо, углерод стали (для упрощения расчетов мы рассматриваем сталь как двойной сплав железо-углерод, не содержащий примесей) и оксиды железа.

Применительно к рассматриваемым системам для анализа достаточны следующие уравнения независимых реакций:



где $[C]_{\gamma}$ – углерод аустенита.

Прямые, выражающие зависимость $\lg K = f(1/T)$ для различных составов аустенита, параллельны между собой. Следовательно, приращение энтальпии, входящее в коэффициент пропорциональности постоянно для всех содержаний углерода. Энтропия образования аустенита зависит от его состава. Исследования позволили получить выражение для ее переменной части S' и уравнение, связывающее S' с константой равновесия:

$$S' = R \ln \frac{1 - (m+1)C}{mC}; \quad (2.20)$$

$$33,47 - S' = R \ln K_{5,1\gamma} + \frac{29100}{T}, \quad (2.21)$$

где C – атомная доля углерода в аустените;
 $m=5,8$.

В последнем уравнении величина 29100 – это приращение энтальпии в калориях, отнесенных к одному молю гипотетического соединения Fe_mC, изоморфного аустениту. Выражение в левой части – приращение энтропии. Рабочая формула для вычисления константы равновесия реакции (2.19) имеет вид

$$\ln K_{5,1\gamma} = -\frac{6361}{T} - 7,34 - \lg \frac{1 - 0,28[C]}{0,27[C]}, \quad (2.22)$$

где $[C]$ – массовая доля углерода в %.

При расчете равновесия с газовыми смесями CH₄-H₂ использовали выражение для активности углерода

$$a_c = \frac{K_{5,1\gamma}}{K_{5,1\Gamma}} = \frac{K_{5,2\gamma}}{K_{5,2\Gamma}}, \quad (2.23)$$

где $K_{5,1}$, $K_{5,2}$ – константы равновесия соответственно для смесей CO-CO₂ и CH₄-H₂O, а индексы «γ» и «Γ» обозначают равновесие газовой фазы соответственно с аустенитом и чистым графитом. Логарифмируя выражение (2.23), получаем

$$\lg K_{5,2\gamma} = \lg K_{5,1\gamma} + \lg K_{5,2\Gamma} - \lg K_{5,1\Gamma}. \quad (2.24)$$

Приведенные формулы позволяют найти температурные зависимости констант равновесия для различных смесей газов. Составы атмосфер, находящихся в равновесии со сплавом железо-углерод, теоретически определяются концентрацией углерода в сплаве и температурой поверхности образца. Характерные температурные кривые поверхности формирующихся отливок снимали в производственных условиях. Спаи термометры монтировали у поверхности керамики и у поверхности кокиля.

Теоретические и экспериментальные результаты показали, что для предотвращения окислительных процессов на поверхности отливок требуются очень сложные в

практическом осуществлении условия. Поэтому, наведение смесей таких составов за счет разовых добавок в форме, сообщающейся с воздушной атмосферой, нереально, следует применять продувку формы газовой смесью необходимого состава для каждого конкретного случая.

2.2.12. Развитие методов керамизации литейной формы

При протекании суспензии по песчаному каналу происходит капиллярное впитывание ее жидкой составляющей, что вызывает уменьшение текучести. Глубина проникновения суспензии определяется статическими и капиллярными силами, суммарное .

Глубина проникновения может быть значительно увеличена под действием давления. Чем менее интенсивно будет происходить впитывание жидкой составляющей суспензии, тем больше величина текучести. На рис. 2.12 приведены технологические пробы, иллюстрирующие изменение текучести суспензии в зависимости от состояния поверхности песчаного канала и величины давления. Холодноогеливаемая суспензия при свободной заливке заполняет каналы пробы не более чем на 0,5 диаметра (рис. 2.12, а). Применение давления (рис. 2.12, б) приводит к увеличению текучести на 25 %. Более эффективным средством для повышения текучести оказалось нанесение гидрофобных покрытий на песчаную основу (рис. 2.12, в).

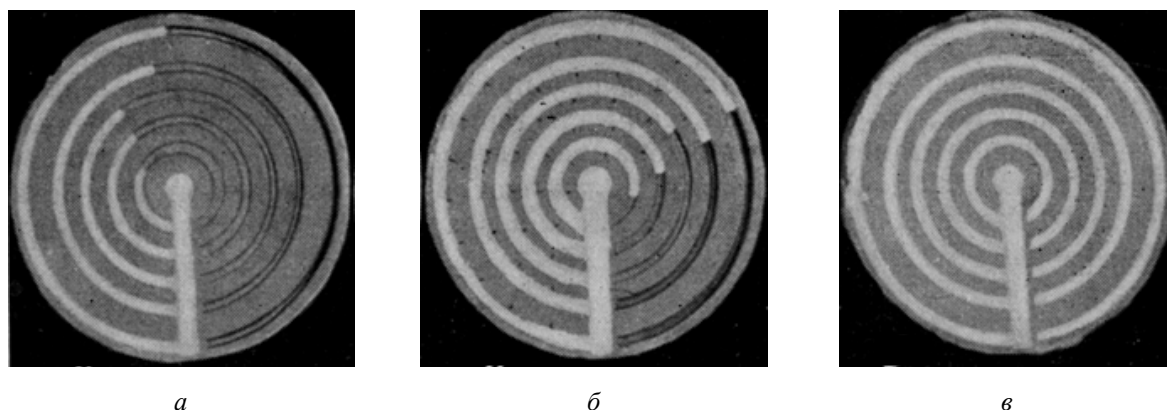


Рис. 2.12. Текучесть суспензий при заполнении песчаного канала при: свободной заливке (а); наложении давления в 0,15 МПа (б); применении гидрофобных прослоек (в)

Исследованы составы покрытий трех видов: кремнийорганический лак КЭП100, компаунды холодного отверждения и силоксановый полимер СКТН. Прослойки из этих материалов обеспечивают возможность заполнения керамической суспензией каналов сечений 1,5...2 мм при качественном формировании облицовки, в то время как при свободной заливке эти сечения не заполнялись. Применение прослоек позволяет одновременно положительно решить вопрос о снижении вероятности миграции влаги из основы формы в облицовку при выдержке формы перед заливкой, так как гидрофобное покрытие следует рассматривать как барьер на пути движения влаги. Данное технологическое решение применено при получении дисков триеров (диаметр 650 мм, толщина стенки 1,5 мм, количество ячеек 11000 шт., коробление отливок не превышало 1,5 мм, чистота поверхности соответствовала 4 классу по ГОСТ 2789-95) и моделей в керамизированных формах. Повышение качества литых дисков обеспечило увеличение производительности триера на 42 %.

Узким местом процесса изготовления керамизированной формы для диска является изготовление дополнительной оснастки для формирования опорного слоя. Апробирована технологическая разработка, позволяющая значительно снизить затраты на эту операцию. По имеющейся модели свободной заливкой расплавленного парафина изготавливали слепок, который затем наращивали по основанию модели на 3...5 мм. Зазор между моделью и наращенным по высоте парафиновым слепком заполняли пластмассой, при затвердевании которой образовывалось накладное тело, позволяющее многократно его использовать при формовке.

При изготовлении керамизированной формы может вызвать затруднение отделение модели от затвердевающей суспензии, особенно при формировании сложнорельефной поверхности. В этих случаях положительно зарекомендовало себя применение специально предусмотренных в моделях каналов, через которые в момент отрыва модели подается сжатый воздух. Ввиду мгновенного образования воздушной прослойки между моделью и керамической облицовкой процесс извлечения модели происходит с минимальной вероятностью нарушения тонкого рельефа.

Особое значение при формировании тонкорельефных поверхностей в керамизированных формах имеет структура керамики, характерной особенностью которой является наличие трещиноватости. Установлено качественное и количественное влияние на процесс трещинообразования времени выдержки до наложения теплового потока и толщины облицовки. Определено, что при выдержке 2...20 с до наложения первичной тепловой обработки в керамической облицовке формируется мелкая поверхностная сетка трещин и сквозные каналы, количество и величина которых обеспечивают формирование поверхности отливки без характерных дефектов – «гребешков» и газовых раковин. При наличии в керамике мелкой сетки трещин и сквозных каналов формируется качественная поверхность отливки. В случае применения керамики с плотной структурой, обладающей мелкими замкнутыми порами, поверхность отливки поражается дефектами.

Явление образования трещин в холодноогеливаемой керамике можно представить следующей схемой. Поры и капилляры затвердевающей керамической смеси в период ее нахождения в эластичном состоянии имеют разнообразную форму. Ввиду заполненности их жидкостью (этиловым спиртом) газопроницаемость смеси в таком состоянии равна нулю. Этиловый спирт из капилляра начинает испаряться через открытую поверхность за промежуток времени до поджигания летучих веществ в слое, находящемся вблизи поверхности испарения. В этот момент перенос жидкости определяется в основном градиентом влагосодержания, так как температура окружающей среды и жидкости внутри керамики отличается незначительно. При увеличении разогрева открытой поверхности до 60...85 °С процесс испарения ускоряется. Однако это произойдет не в результате температурного радиента внутри керамики (при малой его толщине), а вследствие резкого изменения интенсивности массообмена на поверхности керамики с окружающей средой.

$$g = \alpha(P_{\Pi} - P_{C}), \quad (2.25)$$

где g – плотность потока массы жидкости;

α – коэффициент массообмена;

P_{Π} – парциальное давление у поверхности образца;

P_{C} – парциальное давление пара в окружающей среде.

Низкий температурный градиент Δt в керамике соизмерим по абсолютному значению с градиентом влагосодержания Δu . Поэтому в результате наложения векторов Δt и Δu в прогретом слое изотермическая теплопроводность будет дополнительным сопро-

тивлением для переноса жидкости термической теплопроводностью. В этот период возникающие напряжения в поверхностном слое малы, и трещины отсутствуют либо имеют размеры менее 0,01...0,05 мм. При поджигании летучих происходит парообразование на свободной (горящей) поверхности, которое сопровождается поглощением теплоты фазового перехода и переносом пара во внутренние слои керамики. Пар проникает до плоскости контакта с границей опора – облицовка и конденсируется. При толстостенной облицовке конденсация паров может происходить на некотором расстоянии от горячей плоскости, где температура не превышает температуры кипения этилового спирта. По мере прогрева керамики зона испарения расширяется. Плотность потока массы вещества при наличии перепадов Δt и Δu внутри керамики определяется обобщенным уравнением

$$g = -\alpha\gamma_0\delta\Delta t - \alpha\gamma_0\delta\Delta u, \quad (2.26)$$

где α – коэффициент теплопроводности переноса массы;

γ_0 – плотность пара при нормальных условиях;

δ – условный пограничный слой.

Парообразование на открытой поверхности и высокая температура горящего газа в процессе массообмена обуславливают определяющую величину $\alpha\gamma_0\delta\Delta t$. В результате процесса парообразования, а также объемной усадки геля кремневой кислоты и возможного расширения частичек огнеупорного наполнителя в керамике возникают температурные напряжения. Процесс трещинообразования для капиллярно-пористых тел протекает в упругопластичном состоянии под действием касательных напряжений, а величина и направление трещин в значительной степени зависят от соотношения величин нормальных и касательных напряжений. Определяющая роль в формировании направления трещин принадлежит направлению теплового потока. Характерная направленность формирующихся трещин в холодноогеливаемой керамике – под углом 90° к направлению теплового потока. При увеличении толщины керамики направление трещин изменяется, вначале они располагаются нормально, а затем искривляются и взаимно переплетаются. Это явление можно объяснить падением скорости продвижения зоны парообразования. По мере углубления зоны испарения по сечению керамической облицовки направленность теплового потока искажается. Процессы массообмена внутри керамики будут происходить при наложении тепловых потоков от торцевых и боковых поверхностей, а также под влиянием градиента влагосодержания.

Технологические решения, полученные в результате исследования структурообразования холодноогеливаемой суспензии, применены при разработке процесса изготовления матриц с тонкорельефной поверхностью. Разработаны рекомендации получения керамизированных форм по пенополистироловым моделям. Керамическая облицовка формируется путем обкладки пенополистироловой модели керамическими элементами. Элементы простой конфигурации могут изготавливаться пластической деформацией, сложные – механической обработкой. Пластины изготавливаются в нормализованных пресс-формах или прокаткой, осуществляемой в валках, из паст, содержащих, %: огнеупорного материала – 78...83; парафина – 15...20; стеарина – 2.

С увеличением содержания пластификатора в пасте и уменьшением толщины пластины до 2 мм увеличивается способность пластин воспроизводить поверхность модели. Применение внешнего давления на поверхность пластины позволяет воспроизводить поверхности модели с углом до 90° . Для механической обработки оптимальными являются пасты с содержанием парафина 12...14 %. Чистота обрабатываемой поверхности керамики повышается с увеличением скорости резания и понижается на один класс в результате дальнейшего обжига. Применение различных методов, и, в частно-

сти, предварительного замораживания керамической пасты перед ее механической обработкой, в значительной мере повышает ее прочность и улучшает обрабатываемость.

По разработанной технологии отлиты кокиль и пресс-форма для литья под давлением. При получении внутренних полостей отливок (пустотелых охлаждаемых лопаток турбин, лопастных колес) перспективность применения керамики твердофазного спекания особенно очевидна. Использование в данном случае керамики обуславливается тем, что отпадает необходимость выщелачивания стержней из тонких полостей отливки.

В качестве огнеупорного материала при изготовлении стержней для отливок из алюминиевых сплавов применяется поваренная соль, имеющая следующие характеристики: плотность – $2,17 \text{ г/см}^3$, температура плавления – $808 \text{ }^\circ\text{C}$, растворимость в воде при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – 317 г/л . Стержни изготавливали из массы следующего состава, %: поваренной соли – 82, парафина – 16 и стеарина – 2. Такая масса в виде пасты хорошо заполняет пресс-форму при запрессовке. Стеарин, вступая в химическое взаимодействие с солью, служит стабилизатором и выполняет роль промежуточного слоя между зернами и парафином. Обжиг стержней производили при температуре $680 \dots 725 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследованы свойства полученных таким образом солекерамических стержней. Стержни имели прочность на сжатие $(1,85 \dots 2,1) \cdot 10^5 \text{ Па}$, коэффициент термического расширения $0,438 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$. Отличительной особенностью таких стержней является высокая чистота поверхности и малая постоянная огневая усадка. Исследования свойств солекерамических стержней позволили разработать технологию изготовления лопастных колес с радиально расположенными лопатками из сплава АЛ2. Разработку технологии вели в двух направлениях: с использованием цельных стержней и со стержнями, состоящими из отдельных секторов, собираемых затем в специальный кондуктор. После заливки жидким металлом стержни из полости отливки удалялись за 10...15 мин в холодной проточной воде, чистота поверхности соответствовала 5-го и 6-го классам (рис. 2.13).

При разработке стержневых составов для отливок из черных сплавов в качестве огнеупорного материала применяли кабрид кальция – материал, обладающий следующими преимуществами: недефицитностью, сравнительно низким коэффициентом термического расширения (1,6 % при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), отсутствием химического взаимодействия с жидким металлом и легкой удаляемостью из отливки.

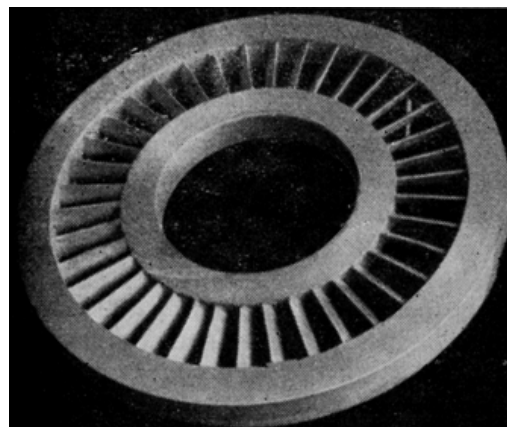


Рис. 2.13. Отливка роторного колеса, полученного при применении легкоудаляемого керамического стержня

Глава 3

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИКИ ТВЕРДОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТОЧНЫХ ОТЛИВОК

3.1. ГПСМО-процесс и его применение для изготовления фасонных отливок^{*}

Задача повышения геометрической точности отливок решается в двух направлениях:

- расширяется область применения точнолитых заготовок (литье в металлические формы свободной заливкой и под давлением, в оболочковые спекаемые формы, по выплавляемым моделям, по пенополистироловым моделям);

- совершенствуются технологические приемы изготовления разовых песчаных форм (увеличение объемов машинной формовки, совершенствование модельной оснастки и ее стабилизация, применение оболочковых форм и стержней, специальных смесей).

В настоящее время выпуск точнолитых заготовок составляет всего 5...8 % общего выпуска литья. Для дальнейшего развития точного литья необходимо выявление его новых технологических возможностей. Например, металлические формы при свободной заливке ранее использовались главным образом для фасонного литья из цветных сплавов и для незначительной номенклатуры литья из черных металлов. Применение комбинированных форм песчаный стержень – металлическая форма позволило использовать металлическую форму для изготовления многих сложных и крупных отливок из черных металлов. Сегодня литье под давлением применяется, в основном для цветных сплавов и развитие его во многом зависит от развития выпуска цветных металлов. Для черных металлов литье под давлением пока проблематично из-за малой стойкости пресс-форм. Для такого литья следует, видимо, также использовать комбинированную форму, применяя разовые негазотворные вставки-стержни из керамики. Таким образом, литье в комбинированные металлические формы является серьезным резервом повышения геометрической точности отливок.

По выплавляемым моделям изготавливается достаточное количество номенклатуры. Однако увеличение габаритов и усложнение внутренних полостей отливок уже в настоящее время требует применения новых модельных составов, новых материалов для форм, а особенно новых приемов оформления полостей (применения керамических стержней). Следовательно, и для литья по выплавляемым моделям возможно использование комбинированных форм.

^{*} ГПСМО-процесс – горячее покрытие солеметаллических моделей с последующим обжигом

Что касается оболочковых форм, представляется правильным в Украине и за рубежом сокращение оболочковых форм и расширение применения оболочковых стержней, что позволяет применять терморезистивные смолы только для этих целей. Следует учитывать, что дефицитность сырья, вредность газов, большая газотворность и необходимость металлической, эксплуатируемой при высокой температуре, оснастки ограничивает область применения не только таких форм, но и стержней.

При помощи набивных форм, наиболее выгодного способа изготовления форм, получают отливки с достаточно высокой размерной точностью, в ряде случаев не уступающие литью по выплавляемым моделям, однако качество поверхности и точность конфигурации в этом случае получаются более низкими. Это вытекает из сущности самого процесса. Керамическая форма имеет высокие огнеупорность, плотность, прочность и позволяет оформлять малые выступы и отверстия, что не может быть выполнено в песчаной форме. Те части отливок, качество которых не может быть обеспечено набивной песчаной формой, можно оформлять при помощи металлических, спекаемых или керамических стержней.

ГПСМО-процесс, предложенный проф. Оболенцевым Ф.Д., опробован на различной номенклатуре и может быть использован для изготовления:

- неразъемных форм; при этом получают отливки, геометрическая точность которых не уступает, а в ряде случаев превышает точность литья, получаемого по выплавляемым моделям;
- отдельных частей форм, которые могут быть использованы в комбинации с металлическими формами, полученными по выплавляемым моделям, и песчаными формами;
- форм специального назначения.

Изготовление неразъемных форм и отдельных частей форм по ГПСМО-процессу позволяет повысить размерную точность отливок, качество поверхности, уменьшить пространственные отклонения, а также увеличить точность конфигурации отливок. Процесс может быть применен для изготовления специальных форм: легкоудаляемых растворяемых стержней, форм с высокой теплопроводностью, форм с двойными стенками для создания теплоизоляторов и обогревателей, а также при заливке форм в вакууме.

Анализ геометрической точности отливок, получаемых по выплавляемым моделям, показывает, что такие отливки имеют невысокую размерную точность и большие пространственные отклонения. Этот процесс удерживается в практике благодаря тому, что он обеспечивает качественные поверхности и большую точность конфигурации. Указанные недостатки связаны с существом процесса изготовления форм по выплавляемым моделям: выплавляемые модели не только сами склонны к деформациям, но и деформируют форму при их выплавлении. Кроме того, суспензии для покрытия моделей, представляющие собой смесь огнеупорного порошка с кремнеорганическими материалами или с растворимым стеклом, имеют два существенных недостатка. Первым недостатком является малая концентрация в суспензии твердого порошка, то есть большая жидкостность раствора, что связано с его строением. Жидкостность, например, маршаллито-жидкостекольной суспензии составляет 30...35 %, а маршаллито-этилсиликатной 25 %. При высокой жидкостности суспензии в процессе тепловой обработки неизбежны деформации и ухудшение поверхности форм во время удаления жидкости. Вторым недостатком этого рода суспензий является выпадение силикогеля в результате гидролиза этилсиликата или огеливания жидкостекольного раствора. Силикогель, окружая частицы огнеупорного порошка и являясь связующим, определяет величину тепловой деформации, которая остается значительной даже при применении огнеупорных порошков с малым коэффициентом термического расширения.

Этими недостатками не обладают формы, изготовленные по ГПСМО-процессу. При этом процессе формы изготавливают по металлическим моделям или в комбинации с соляными частями моделей, которые не деформируются сами и не деформируют форму при их удалении. Такие модели покрывают горячей суспензией (пастой), состоящей из смеси огнеупорных порошков и расплавленных органических материалов типа парафина, стеарина. Пасты содержат до 90 % огнеупорного порошка, т.е. они обладают малой жидкостью. В эти пасты не входят материалы, выделяющие силикогель, что позволяет создать формы с малым коэффициентом термического расширения.

Изготовление форм или отдельных частей форм по ГПСМО-процессу состоит из следующих операций: приготовление пасты; изготовление из пасты литейных форм; тепловая обработка форм.

3.1.1. Приготовление пасты

Приготовление пасты заключается в смешивании огнеупорного порошка с расплавленным стеарином и парафином. Паста должна обладать хорошими литейными свойствами (высокой текучестью, малой и постоянной линейной усадкой, отсутствием склонности к образованию наружных усадочных раковин), а также высокими механическими свойствами.

Для приготовления пасты порошки должны обладать способностью к пастообразованию, высокой огнеупорностью, хорошей спекаемостью при возможно низких температурах, малым коэффициентом термического расширения.

При изготовлении литейных форм можно применять порошки из плавленого кварца, из обезжелезненного циркона, хромистого железняка, хромагнетита. Для мелких и неотчетливых форм может быть использован порошок маршаллита. Все указанные материалы, за исключением маршаллита, нуждаются в дроблении, размоле, просеве, а хромистый железняк – и в прокаливании для разложения карбонатов. Дробление материала можно производить на любых дробилках. При этом можно использовать электрогидравлический эффект. Для размолы применяют шаровые или вибромельницы. Просев осуществляют на качающихся или вибрационных ситах. Помол должен производиться на зерно 50...100 мкм. Применение более мелкого порошка увеличивает вязкость пасты, что сказывается на условиях прессования, а при введении в пасту повышенного количества органических материалов растет линейная и объемная усадка.

Опыт показывает, что при дроблении кварца в шаровых мельницах без специальной защиты в материал попадает до 0,8 % железа, а при помолу на вибромельницах – около 0,6 %.

Порошок любого материала перед смешиванием не должен содержать более 0,2...0,3 % влаги, так как при высоком содержании ее ухудшаются свойства пасты; при содержании влаги более 1 % приготовление пасты вообще затруднено. Поэтому порошки перед употреблением прокаливают при температуре 500...600 °С.

Смешивание порошка с органическими материалами следует производить при температуре 80...85 °С. Для смешивания может быть применен лопаточный смеситель или бегуны с подогревом.

Так как удельный вес диспергированной фазы значительно больше, чем дисперсионной среды, необходима стабилизация пасты. Стабилизацию можно осуществить при введении поверхностно активной добавки, которая создает связь между дисперсионной средой и диспергированной фазой. Увеличивая вязкость дисперсионной среды, также

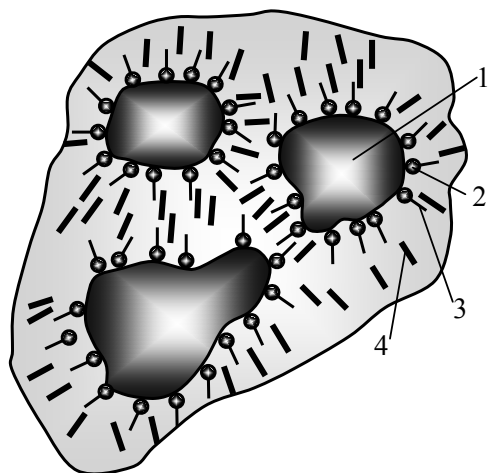


Рис. 3.1. Схема строения пасты (стабилизатор стеарин): 1 – огнеупорный порошок; 2 – полярная группа (СООН) стеарина; 3 – углеводородная часть (С₁₇Н₃₅) стеарина; 4 – парафин

можно стабилизировать пасту, так как скорость оседания твердых частиц большего удельного веса, чем дисперсионная среда, будет при этом соответственно замедлена.

В том случае, если дисперсионной средой служит расплавленный парафин, то стабилизатором может быть жирная кислота, например стеарин С₁₇Н₃₅СООН. Наибольшая устойчивость суспензии достигается тогда, когда происходит взаимодействие полярной группы стабилизатора (СООН) с поверхностными атомами твердых частиц; при этом полярная группа закрепляется с образованием мыла типа Me (СООН), где Me – металл.

Схема строения пасты-суспензии представлена на рис. 3.1, из которой видно, что полярная группа стабилизатора обращена к частицам огнеупорного порошка и прочно с ней связана, а углеводородная часть образует связи с парафином. В том случае, если огнеупорный порошок не вступает в

химическое воздействие, то в парафин, используемый для изготовления пасты, целесообразно вводить полиэтилен.

Полиэтилен, находясь в парафине в высокодисперсном состоянии, создает необходимую вязкость и препятствует расслаиванию огнеупорного порошка и парафина. Для тех огнеупорных материалов, которые вступают в химическое взаимодействие с жирными кислотами, целесообразно применение в качестве стабилизатора стеарина или другой жирной кислоты.

Стабилизирующие свойства жирной кислоты сильнее проявляются при наличии в составе пасты примесей железа, которые попадают в кварц при выплавке его из песка и при размалывании. Жирная кислота оказывает стабилизирующее действие также при наличии оксидов щелочных или щелочно-земельных металлов. Эти оксиды в малых количествах имеются в маршаллите, а оксиды щелочно-земельных металлов – в плавленом кварце.

Наблюдения показывают, что из порошков, содержащих, например, повышенное количество оксидов железа, получается более однородная масса.

Для обеспечения стабильности пасты поверхностно активная добавка должна равномерно покрывать поверхность частиц кремнезема. Поэтому в первую очередь следует тщательно перемешать порошок со стеарином, количество которого для получения равномерного состава пасты составляет 1,5...2,0 % от веса пасты. После этого добавляется 10...16 % парафина, придающего пасте текучесть. Количество парафина зависит от тщательности предварительного перемешивания порошка со стеарином, от зернового и химического состава порошка. При этом чем больше в кварцевом порошке примесей, тем меньше может быть израсходовано парафина. Циркон, хромистый железняк, хромагнетит требуют около 10 % парафина.

После приготовления паста выгружается из смесителя и может длительное время сохраняться до употребления.

Текучесть пасты, являющаяся одной из основных характеристик ее качества, может быть оценена по длине заполнения пробы того или иного сечения и по способности воспроизвести поверхность с различной шероховатостью.

Длина заполнения пробы определяется вязкостью пасты при данной температуре и скоростью ее затвердевания при заполнении пробы. Способность пасты заполнять канал определенного сечения имеет сравнительно ограниченное значение, так как всегда можно осуществить подвод пасты таким образом, что заполнение ею полости не вызывает трудности.

Значительно больший интерес представляет способность пасты воспроизводить поверхность модели, тем более, что от этой характеристики зависит получение качественной поверхности формы, а следовательно, и отливки.

Были проведены опыты по определению способности пасты воспроизводить металлическую поверхность. Образцы изготовлялись из паст прессованием.

Паста состояла из смеси 82 % порошка плавленного кварца, 16 % парафина и 2 % стеарина. Исследовалось две группы поверхностей: с выступами с высотой 0,94 и 0,39 мм.

О текучести пасты судили по «потере профиля» поверхности формы по сравнению с моделью. Установлено, что оптимальная температура прессования составляет 70 °С; при повышении или понижении этой температуры способность пасты воспроизводить поверхность ухудшается. При понижении температуры прессования повышается вязкость пасты, а при повышении температуры происходит расслоение пасты и начинается испарение парафина.

Температура прессования оказывает влияние и на способность пасты воспроизводить поверхность. Например, при температуре прессования 70 °С профиль поверхности формы, изготовленной по модели с выступами 0,39 мм, изменяется до 0,242 мм при заполнении без давления; при заполнении под давлением 3 МПа профиль составляет 0,358 мм.

«Потеря профиля» несколько меньше при воспроизведении грубых поверхностей с величиной выступов 0,94 мм. Например, при отсутствии давления «потеря профиля» составила около 29 % вместо 38 %, а при давлении 3 МПа – всего лишь 1,5 % вместо 8 %. Приведенные данные показывают высокую способность пасты воспроизводить поверхность модели.

Установлено также, что линейная усадка кварцевой пасты составляет 0,4...0,5 %; предел прочности при испытании образцов на изгиб – 5,4...6,4 МПа. Причем пасты из возврата или пасты, содержащее несколько повышенное количество железа, имеют на 10...15 % большую прочность, чем пасты из чистого кварца. Паста из обезжелезненно-го циркона обладает на 30...35 % большей прочностью по сравнению с кварцевой.

3.1.2. Изготовление форм

Изготовление форм можно производить по металлическим моделям, по комбинированным моделям, состоящим из металлических частей и вставок, изготовленных из солей, а также полностью по соляным моделям.

Формы по металлическим моделям могут изготавливаться неразъемные или составные. Отдельные части составных форм (полуформы, стержни, литниковые системы) монтируются, после чего получают неразъемные формы.

Из неразъемных форм модель удаляют путем протяжки или вывинчивания. Такие методы можно использовать при изготовлении сверл, фрез, различных втулок. Форма для втулки диаметром 100 мм со специальными пазами, требующими высокой размерной точности, представлена на рис. 3.2, а. Таковую форму получают одновременно с прибылью. Пресс-форма для ее изготовления показана на рис. 3.2, б.

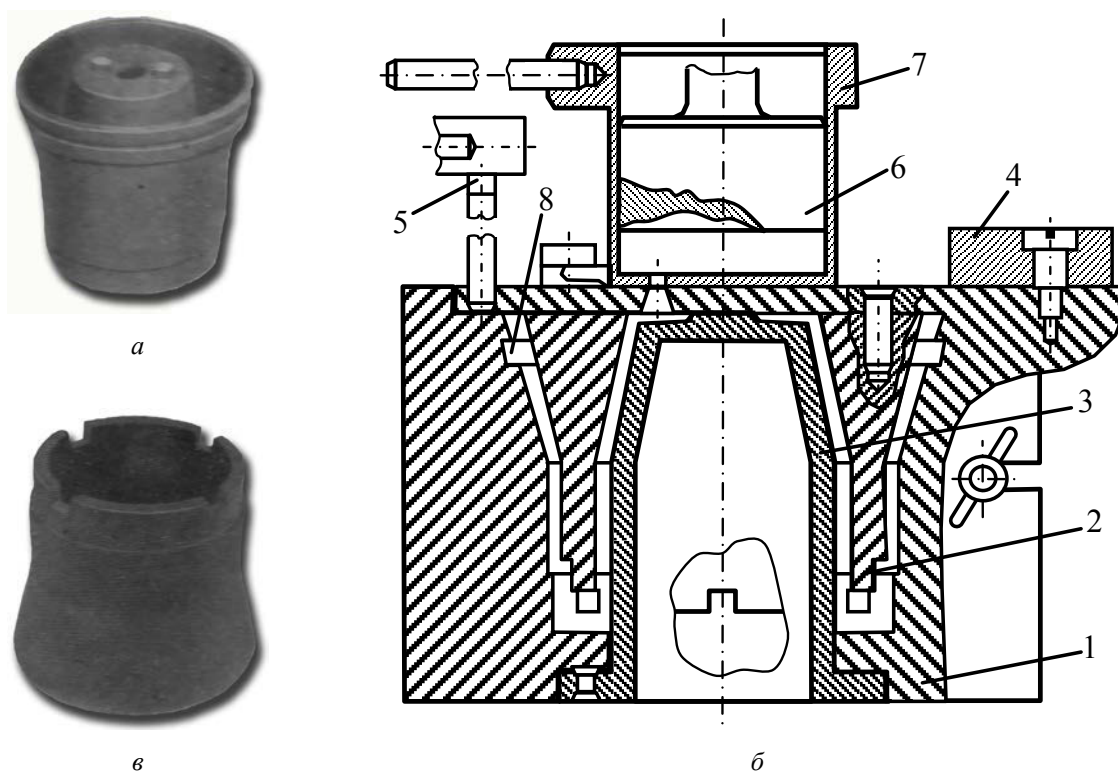


Рис. 3.2. Форма для втулки (а), пресс-форма для ее изготовления (б), готовая отливка (в)

Пресс-форма состоит из трех частей: части 1, формирующей наружную поверхность формы; модели 2, формирующей внутреннюю поверхность формы; разрядника 3. При прессовании верхняя крышка с моделью фиксируется специальными зажимами 4. Паста загружается в стакан 7 и при помощи поршня 6 вдавливается через канал в полость пресс-формы. При этом, несмотря на длинный и изогнутый путь движения пасты, ни одного случая незаполнения или получения нечеткой конфигурации формы не наблюдалось.

После запрессовки пресс-форму можно раскрывать через полминуты, т. е. практически сразу. Вначале при помощи винтов 5 удаляется модель, а затем разрядник. Так как между моделью и формой создается значительное трение, то на наружной поверхности формы делается специальная выточка 8, которая удерживает форму в пресс-форме при удалении модели. После удаления модели и разрядника пресс-форма разнимается.

Если модель не может быть удалена вытяжкой, так как деталь имеет выступы, которые мешают удалению модели, то эти выступы могут быть выполнены из растворимых солей в виде вставок в металлическую модель. После извлечения из формы металлической части модели соляные вставки удаляют растворением.

Стержень, внутреннюю полость которого нельзя выполнить вытяжкой металлического сердечника, представлен на рис. 3.3, а, где показан пустотелый стержень, изготавливаемый для корпуса (форма выполняется набивной). Такие стержни формуют по пресс-формам из эпоксидной смолы, имеющим деревянную окантовку (рис. 3.3, б). Для образования внутренней полости стержня были изготовлены сердечники из алюминия (рис. 3.3, в). Полость стержня в месте седла образовывалась вставкой из растворимых солей (рис. 3.3, в), которая поддерживалась при прессовании выступами на металлических сердечниках. После удаления металлических сердечников соляная вставка растворялась.

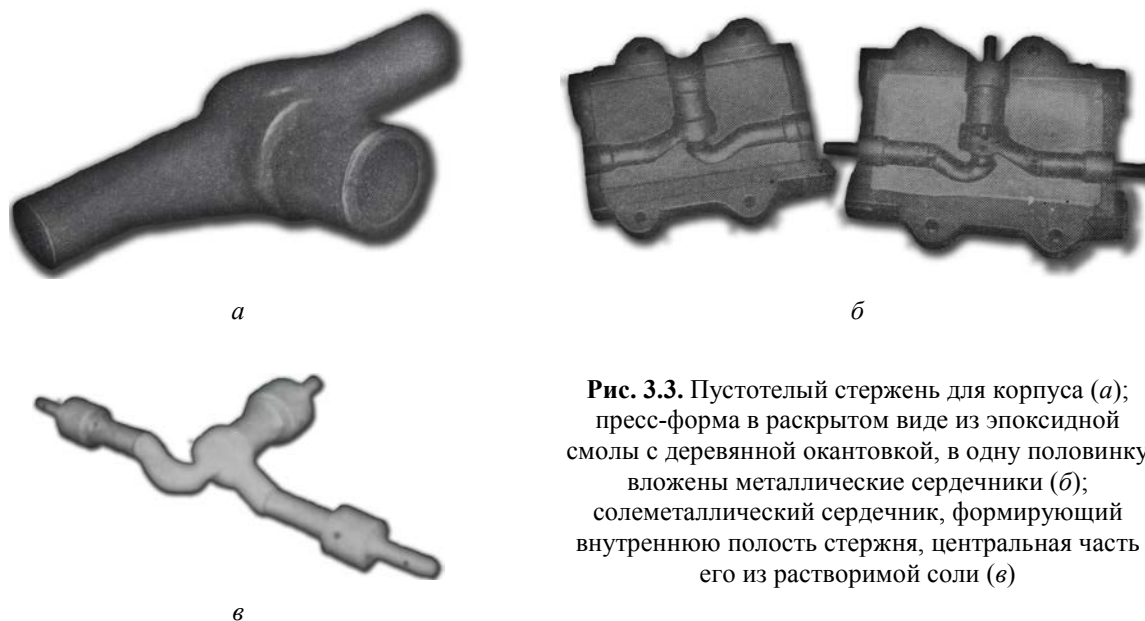


Рис. 3.3. Пустотелый стержень для корпуса (а); пресс-форма в раскрытом виде из эпоксидной смолы с деревянной окантовкой, в одну половинку вложены металлические сердечники (б); солеметаллический сердечник, формирующий внутреннюю полость стержня, центральная часть его из растворимой соли (в)

Изготовление форм из отдельных частей по металлическим моделям может быть применено для деталей любой конфигурации. При этом отдельные части формы изготавливаются прессованием, как и неразъемные формы, после чего они собираются.

Такого рода формы представлены на рис. 3.4 и 3.5.

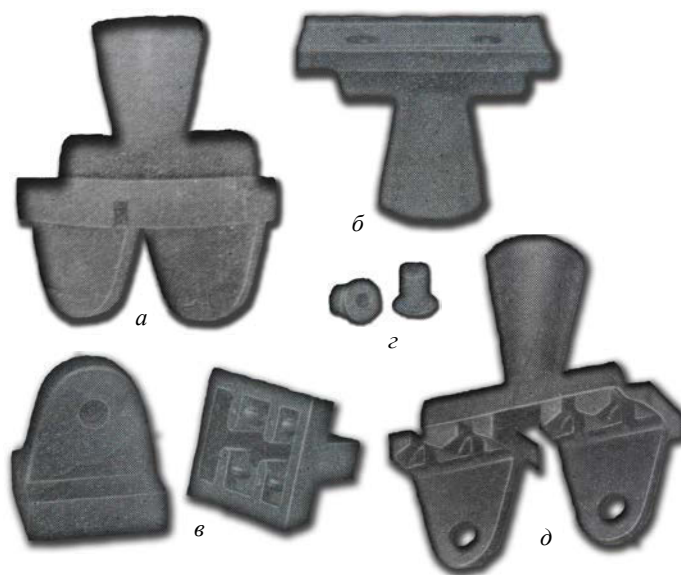


Рис.3.4. Форма для детали «замок», собранная из отдельных частей (а); литниковая система на две детали (б); форма с полостью для отливки (в); стержень (г); отливка (д)

Первая форма для детали «замок» состоит из трех частей: собственно формы (рис. 3.4, в), литниковой системы (рис. 3.4, б), предусмотренной для заливки двух деталей, и стержня (рис. 3.4, г). Наружная поверхность отпрессованной формы имеет конус, которым форма вдвигается в ласточкин хвост литниковой системы. Стержень (рис. 3.4, г) плотно вдвигается в отверстие. Собранный форма после обжига представлена на рис. 3.4, а. В такие формы была отлита партия производственных деталей, внеш-

ний вид которых после удаления из форм показан на рис. 3.4, д. На этом рисунке видно, что каких-либо заливов по плоскости сочленения литниковой системы и формы или в плоскости сочленения форм со стержнем не обнаруживается. Контуры детали четкие, с острыми кромками.

На рис. 3.5 представлена форма, которая состоит из пяти частей: двух полуформ (рис. 3.5, а, б), соединяемых друг с другом в ласточкин хвост (причем в одной полуформе оформляется вся деталь, а вторая полуформа служит крышкой) и трех стержней для образования круглого и двух продольных отверстий (рис. 3.5, г, д, е). После сборки двух полуформ в ласточкин хвост вставляются стержни и устанавливается литниковая система (рис. 3.5, в). Форма в собранном виде показана на рис. 3.5, ж. При обжиге таких форм отдельные части спекаются. Детали, залитые в такие формы, представлены на рис. 3.5, з; каких-либо заливов не обнаружено. Эти детали были обработаны по плоскостям, расстояния между которыми определялись плоскостью разъема формы. Установлено, что при припуске 0,2мм на сторону черновин на детали обнаружено не было.

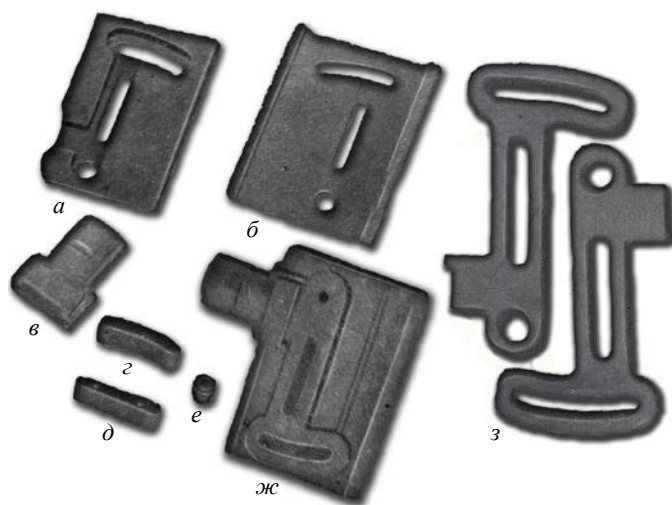


Рис. 3.5. Полуформа левая (а); полуформа правая (б); литник (в); стержни (г, д, е); форма в собранном виде до обжига (ж); готовая оливка (з)

Способность пасты хорошо воспроизводить поверхность модели, незначительная и постоянная по величине усадка позволяют обеспечить такие поверхности форм сырца, которые прилегают друг к другу плотно, без зазора между ними. Это открывает новые возможности для изготовления точного литья.

Размеры шва между двумя полуформами при сборке сырцов зависят от точности прилегания двух плоскостей. Специально проведенные исследования шероховатости поверхности формы показали, что она зависит от шероховатости поверхности пресс-формы, по которой производилось прессование, и отличается от нее примерно одним классом чистоты. Поэтому точность прилегания может быть обеспечена настолько высокой, что трудно обнаружить не только шов, но и заметную разницу точности размеров, перпендикулярных к плоскости разъема, и параллельных к ней.

3.1.3. Тепловая обработка форм

При тепловой обработке происходит удаление органической связки и спекание отдельных частиц огнеупорного материала, а при изготовлении форм из отдельных ча-

стей – и спекание по плоскостям разъема, в результате чего образуется единая неразъемная форма. В процессе тепловой обработки могут происходить различного рода деформации, приводящие к искажению полости и к ухудшению геометрической точности форм по сравнению с сырцом. Особенностью тепловой обработки форм при ГПСМО-процессе является то, что она производится в засыпке того или иного адсорбента. В качестве адсорбента может применяться оксид алюминия. Засыпка может быть осуществлена только с внешней стороны, так как внутренняя полость, предназначенная для заливки металлом, должна быть пустой. Поэтому уже при разработке технологии изготовления форм следует учитывать технологию процесса обжига, с тем чтобы обеспечить контакт между засыпкой и сырцом. Слой засыпки вокруг формы должен быть не менее 20 мм.

Стержни желателно изготавливать пустотелые, с тем чтобы адсорбция органического вещества (парафин, стеарин) протекала также и с внутренней стороны стержня.

При больших размерах пустот во внутренней части формы, засыпаемых адсорбентом, иногда могут наблюдаться трещины на формах, так как засыпка препятствует усадке при обжиге. В связи с этим внутренние пустоты целесообразно засыпать не полностью, создавая в засыпке карманы и используя для этого листовой асбест. Во время обжига высоких форм порошок адсорбента создает значительное давление. Поэтому при благоприятных конфигурациях (например, внутренней части профиля крупных лопаток) может наблюдаться деформация, во избежание которой целесообразно по высоте наружной стороны формы устанавливать ребра.

Тепловая обработка форм включает процесс «томления» с нагревом до температур 200...250 °С для удаления летучих из органической составляющей формы и процесс «прокаливания» с нагревом до 950 °С, во время которого происходит полное удаление органической части формы и спекание огнеупорной основы.

Уже при температуре 50 °С паста размягчается, а при температуре 70...80 °С – приобретает значительную текучесть. При наличии засыпки со всех сторон порошок облегает форму, и она не растекается при нагреве. Если форма засыпается только с внешней стороны, связку следует удалять с внешней стороны формы постепенно.

По мере выгорания пластификатора происходит некоторая усадка изделия и возможно образование зазора между засыпкой и изделием, особенно в том случае, когда засыпка недостаточно подвижна, например при пропитке ее удаляющейся связкой. Однако, если к моменту образования зазора будет удалено около 30 % связующего, то паста теряет свою подвижность, и первоначальная конфигурация формы будет сохранена.

Засыпка должна адсорбировать органические вещества, находящиеся в смеси с огнеупорным порошком, и одновременно не реагировать с ним. Адсорбционная способность засыпки обычно больше, чем адсорбционная способность огнеупорного материала.

Удаление связки из обжигаемой формы происходит следующим образом. При нормальной температуре засыпка входит в контакт с органической составляющей, покрывающей огнеупорные частицы. По мере прогрева и расплавления органической связки частицы засыпки начинают поглощать расплав. При этом передвижение расплава происходит путем фильтрации и диффузионным путем – из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией. Такое представление о механизме удаления связки подтверждается видом образцов в начальной стадии обжига. Вокруг таких образцов наблюдается толстый слой засыпки, пропитанный органическим материалом. Скорость удаления связки будет определяться скоростью диффузии органических материалов через засыпку.

Если засыпка происходит со всех сторон, нагрев может быть форсирован для удаления органической составляющей не только диффузионным путем, но и простым вы-

жиганием. Начинать нагрев следует со скоростью не более 50 °С в час. Однако короба можно устанавливать при температуре 300 °С без включения печи. Только после прогрева коробов за счет тепла печи ее можно включить для дальнейшего нагрева.

При температуре свыше 300 °С происходит удаление остатков органических материалов, а при температуре 800...1100 °С – спекание. Следует учесть, что после удаления органических материалов до начала спекания, т.е. в интервале температур 300...800 °С, прочность формы совершенно незначительна. Поэтому малейшие толчки, неплотная засыпка может привести к деформации или образованию трещин. Процесс спекания отдельных частиц зависит от дисперсности порошка, его состава, наличия примесей, температуры. Особенностью спекания литейных форм является то, что нет необходимости доводить форму до высоких прочностей, так как заливка производится в наполнителе. Поверхностная прочность обычно бывает также вполне достаточной. Поэтому обжиг требует более низкой температуры по сравнению со стержнями.

Процесс спекания – укрупнение частиц – в основном происходит вследствие реакций в твердом состоянии. Температура спекания значительно ниже температуры плавления. Например, температура спекания для металлических материалов составляет 0,3...0,64 температуры плавления $T_{пл}$, для солей $(0,55...0,6) \cdot T_{пл}$, для силикатов $(0,8...0,9) \cdot T_{пл}$. Особое значение реакции в твердом состоянии имеют при изготовлении изделий из чистых оксидов.

Если масса состоит из молекул, не вступающих в химическую реакцию друг с другом, то процесс спекания по мере повышения температуры происходит, следующим образом: «склеивание» частиц, поверхностная диффузия, смещение связи зерен, объемная диффузия, образование новых кристаллических центров.

В реальных условиях вследствие загрязнения основных материалов примесями, дающими легкоплавкие эвтектики, реакции в твердых фазах в чистом виде встречаются сравнительно редко. Чаще реакции протекают с участием стекловидных пленок, занимающих промежутки между отдельными кристаллами. Такие стекловидные пленки облегчают развитие реакций и способствуют более быстрому спеканию литейной формы.

Скорость плавления отдельных частиц зависит также от их величины, что объясняется их разной поверхностной энергией.

Снижение температуры при размельчении частиц может быть подсчитано по формуле:

$$\Delta T = \frac{2\sigma M T_{пл}}{rdQ_{пл}}, \quad (3.1)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления, °С;
 σ – поверхностное натяжение кристалла, Дж/м²;
 M – молекулярная масса, г/моль;
 r – средний радиус частицы, мкм;
 $Q_{пл}$ – скрытая теплота плавления, кДж/моль;
 d – удельный вес частицы, кН/м³.

Когда влияние примесей исключается, тонкий помол может иметь положительное значение. Так, например, в специально проведенном опыте по спеканию порошка кремнезема, полученного путем обработки аммиаком этилсиликата, было установлено, что при изготовлении из такого порошка литейных форм спекание их происходит значительно легче, чем маршаллита, что, видимо, объясняется лучшим спеканием малых частиц.

Обжиг форм можно вести путем выдержки длительное время в печи при сравнительно пониженных температурах. Интенсификация процесса возможна при повышенных температурах.

Исследование качества поверхности показало (измерения производились на двойном микроскопе Линника), что при применении металлической модели 7-го класса чистоты поверхности формы до обжига получались 5-го класса. Обожженная керамика имеет 4-й класс чистоты поверхности. (На поверхности наблюдается мельчайшая пористость, которая снижает чистоту поверхности формы, но не оказывает влияния на чистоту поверхности отливок, которые получают 5-го класса.) Для проверки производилось сравнение этих отливок с отливками, изготовленными по методу выплавляемых моделей. При этом были получены поверхности примерно одного класса. Точность размеров отливок, изготовленных по ГПСМО-процессу, оказалось более высокая.

Пространственные отклонения у отливок, изготовленных по ГПСМО-процессу, также меньше по сравнению с отливками, полученными по выплавляемым моделям, что позволяет иметь меньшие припуски на обработку. Так, например, при изготовлении детали типа «гитара» по выплавляемым моделям назначался припуск 1,0 мм, а при применении ГПСМО-процесса – 0,2 мм, что имеет принципиальное значение, так как в первом случае обработка осуществляется резцом, а во втором возможно шлифование.

По точности конфигурации (выполнения малых полостей и отверстий) результаты при ГПСМО-процессе и при литье по выплавляемым моделям могут быть получены примерно одинаковые.

Изготовление керамических стержней по ГПСМО-процессу из материалов с высокой огнеупорностью, например из циркона, хромомagnesита, хромистого железняка позволяет получать небольшие полости в массивных отливках, что повышает точность конфигурации и снижает припуски на обработку.

3.2. Развитие теории и практики использования керамики твердофазного спекания

3.2.1. Легкоудаляемые стержни для тонкополостных отливок

Тонкополостные детали, используемые для энергетических установок (клапанные плиты, лопастные колеса, лопатки турбин, поршни ДВС, волноводные элементы СВЧ-радиоприборов), определяют повышение удельной мощности агрегатов, что является важнейшей задачей энергетического машиностроения.

Однако, получение тонких полостей механической обработкой связано с большими затратами, а при литом варианте требует очень прочных негасящих стержней. При изготовлении их из оксидной керамики они не могут быть применимы для сплавов на основе алюминия из-за отсутствия решения вопроса по их удалению, поскольку стержни удаляют в щелочах, что недопустимо для алюминия.

Применение таких стержней для сплавов на основе железа, никеля требует длительного выщелачивания, что приводит к падению прочности сплавов на 15...20 % за счет корродирования поверхности и водородного охрупчивания.

Поэтому решение задачи по созданию легкоудаляемых в неагрессивных средах стержней является актуальным для всей проблемы тонкополостного литья.

Для сплавов на основе алюминия в качестве материала для стержней использовали хлористый натрий. Выбору технологического процесса изготовления стержней предшествовал анализ способов, который показал, что наиболее целесообразным является прессование термомпластичных суспензий с последующим обжигом при температуре, обеспечивающей спекание отдельных частиц порошка. Этот способ имеет следующие преимущества:

- технологичность подготовки исходных материалов;
- возможность использования порошков соли с различной величиной зерна для придания стержням необходимых свойств;
- недефицитность органических составляющих для термопластичных суспензий;
- низкое давление прессования при изготовлении стержней.

При использовании этого способа термопластичная суспензия состоит из дисперсной фазы (порошка хлористого натрия) и дисперсионной среды (парафина), придающей суспензии пластичность. Подготовка дисперсной фазы заключается в сушке, помоле и просеивании порошка соли. Установлено, что оптимальным является помол соли в фарфоровых барабанах с уралитовыми цилиндрами. При этом более половины зерен имеют размер до 50 мкм, что позволяет получить максимальный коэффициент упаковки (до 0,7) и, следовательно, минимальную пористость стержней.

Сущностью процесса приготовления суспензий является обволакивание жидким парафином поверхности частиц соли, при этом имеет место снижение свободной поверхности энергии частиц. Тщательным перемешиванием суспензии удается добиться ее однородности, однако устойчивость ее невелика вследствие разности удельных весов парафина и соли.

Хорошая устойчивость суспензии достигается при применении стабилизаторов – жирных кислот, например, стеарина, имеющего полярную группу. Взаимодействие хлористого натрия со стеарином происходит по реакции:



При этом стабилизация осуществляется при взаимодействии полярной группы стеарина $COOH$ с атомами соли по реакции (3.2), углеводородный радикал $C_{17}H_{35}$ объединяется с парафином. Справедливость этого представления подтверждается рентгеноструктурным анализом затвердевшей суспензии, который показал соединения $C_{17}H_{35}COONa$. Это соединение оказывает положительное влияние на устойчивость суспензий, которая определяется величиной расслаиваемости под воздействием центробежных сил. Результаты исследования расслаиваемости суспензий представлены на рис. 3.6, из которого следует, что суспензии на основе солей, стабилизированные стеарином, более устойчивы по сравнению с суспензиями на основе оксидов.

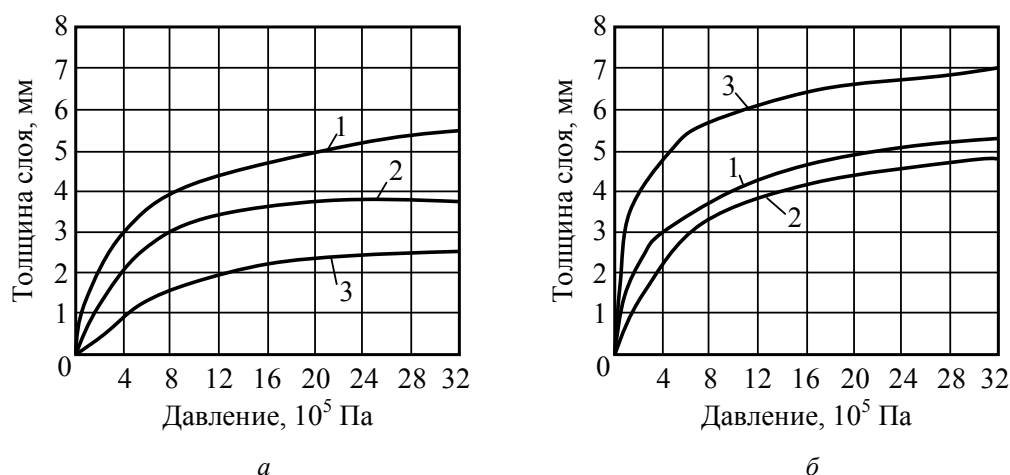


Рис. 3.6. Расслаиваемость суспензий, стабилизированных стеарином (а) и полиэтиленом (б) при дисперсной фазе суспензий: 1 – обезжелезненный плавный кварц, 2 – хлористый натрий, 3 – алюминат натрия

При стабилизации суспензий полиэтиленом химических связей не образуется, а происходит лишь увеличение вязкости парафина за счет растворения в нем полиэтилена. Расплаиваемость в этом случае выше, решающим фактором здесь является удельный вес дисперсной фазы: плавленный кварц – $2,2 \text{ г/см}^3$, хлористый натрий – $2,165 \text{ г/см}^3$, алюминат натрия – $2,65 \text{ г/см}^3$. Высокая устойчивость суспензий на основе солей повышает равномерность упаковки порошка соли в объеме стержня и создает более стабильные условия для спекания в элементарных объемах солекерамики. Это приводит к снижению коробления стержней и повышению геометрической точности отливок.

Как показали исследования, стеарино-парафиновая композиция, применяемая для солекерамики, имеет меньшую усадку, чем парафино-полиэтиленовая (примерно в два раза). Это так же способствует повышению геометрической точности солекерамических стержней.

Обжиг стержней связан с удалением органических составляющих и последующим спеканием порошка соли. Особенностью обжига является необходимость проведения его в порошке с высокой адсорбционной способностью. По мере прогрева и расплавления органических составляющих происходит передвижение расплава путем фильтрации и диффузией из мест с большей концентрацией в места с меньшей концентрацией. Чем прочнее связь между компонентами суспензии, тем медленнее идет удаление связи. Экспериментальным подтверждением этого является увеличение времени удаления органических составляющих (рис. 3.7) при наличии химических связей. Так, если стержень на основе плавленного кварца теряет 60 % органических составляющих за 4 ч, то стержень на основе хлористого натрия теряет примерно такое же количество органических составляющих за 20 ч, а стержень на основе алюмината натрия – за 24 ч. В этой связи скорость подъема температуры, во избежание брака стержней, не должна превышать $100 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, выдержка при $300 \text{ }^\circ\text{C}$ для удаления большей части органических составляющих должна быть не менее 6 час.

На основании экспериментов было установлено, что при температуре спекания солекерамики ($720 \dots 730 \text{ }^\circ\text{C}$) происходит полное удаление органических составляющих. Поэтому солекерамические стержни не газотворны, что имеет важное значение для формирования качественной поверхности отливок.

Различие в спекании солекерамики по сравнению с оксидной приводит к тому, что удовлетворительные механические свойства солекерамики могут быть получены при температуре спекания $T_{\text{спек}}$, равной $0,8 \dots 0,9$ температуры плавления соли $T_{\text{пл}}$, в то время, как для оксидной керамики $T_{\text{спек}} = (0,5 \dots 0,6) T_{\text{пл}}$. Поэтому степень пластической деформации предварительно напряженных зерен соли при обжиге будет несомненно выше, чем у оксидов, ввиду высокой подвижности атомов при нагреве. При этом, по мере размягчения соли, возможно протекание не только поверхностной, но и объемной диффузии.

Исследованиями установлено заметное падение прочности солекерамики при снижении температуры обжига с 725 до $550 \text{ }^\circ\text{C}$, обусловленное уменьшением подвижности атомов и снижением роста перемычек между зернами. Следует отметить, что обжиг при температуре выше $730 \text{ }^\circ\text{C}$ так же приводит к значительному падению прочности, объясняемому образованием микротрещин усадочного происхождения на поверхности стержней.

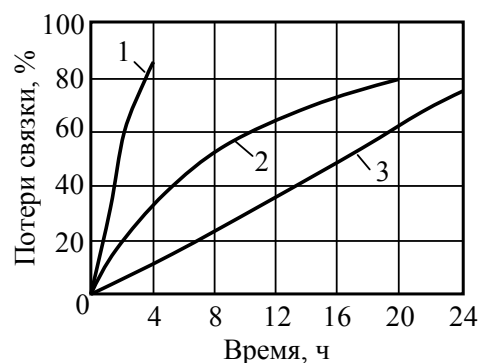


Рис. 3.7. Кинетика удаления органических составляющих в низкотемпературной ($300 \text{ }^\circ\text{C}$) стадии обжига: 1 – обезжелезненный плавленный кварц; 2 – хлористый натрий; 3 – алюминат натрия

Прочность солекерамических стержней зависит от размера частиц соли, участвующих в спекании. Установлено, что увеличение удельной поверхности порошка с 54 до 164 мм^{-1} повышает прочность стержней при изгибе $\sigma_{\text{из}}$ с $1,5$ до $5,9$ МПа. Это явление объясняется более благоприятными условиями для роста зерен в том случае, когда исходная композиция состоит из порошка соли с удельной поверхностью 78 мм^{-1} и выше. Петрографические исследования прозрачных шлифов показывают, что окончательный размер зерен солекерамики, спеченной из порошков с высокой удельной поверхностью, более крупный и достигает величины $60 \dots 80$ мкм.

При обжиге солекерамики за счет припекания частиц и уменьшения пористости происходит усадка стержней. Результаты корреляционного и регрессионного анализа экспериментальных данных показывают, что на усадку оказывают влияние содержание органических составляющих и температура обжига. Изменение размеров стержней при этом велико по абсолютному значению (до 10%) и нестабильно. С целью снижения и стабилизации усадки было предложено введение в суспензии мелкодисперсных порошков оксидов, инертных по отношению к хлористому натрию. Механизм воздействия стабилизатора на усадку заключается в том, что присутствие частиц другой фазы препятствует росту зерен, так как при движении границы зерна через частицу последняя становится частью поверхности границы, в результате чего граница увеличивается, а это требует дополнительной энергии для ее перемещения. Поэтому, когда при движении граница зерна оказывается рядом с включением, оно образует в ней «ямочки», причем, поверхность продолжает движение в другом месте до тех пор, пока не появится возможность обойти это включение. Если число включений около границы становится значительным, то даже большая кривизна границы зерна не способна осуществлять дальнейшее перемещение.

Оптимизация состава стержней со стабилизирующими добавками проводилась методом математического планирования эксперимента. В качестве стабилизатора применялась $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с размером зерен до 10 мкм. Введение стабилизирующей добавки снизило усадку стержней до 3% и уменьшило среднее квадратическое отклонение варьирования – от $2,1$ до $0,73$.

Изменение формы и размера солекерамических стержней при спекании является следствием диффузионного перемещения материала из источников вакансий в места их оседания. При этом для солекерамики характерным является диффузия вакансий из мест их образования – поверхности перемычек между зернами либо краевых дислокаций в пределах самих зерен, к месту оседания – границе зерна. Благодаря этому, зерна двигаются друг к другу и происходит усадка. При спекании керамики из оксидов вакансии диффундируют с поверхности перемычек между зернами к смежной свободной поверхности, либо к краевым дислокациям в пределах самих зерен. Это явление усадки не вызывает.

Очевидно, что место оседания вакансий определяет изменение геометрических размеров и образование пористости. Действительно, при изучении петрографических шлифов на основе оксидов и солей было установлено, что пористость оксидной керамики составляет $28 \dots 30 \%$, а солекерамики – $7 \dots 8 \%$.

Низкая пористость солекерамики имеет преимущество при изготовлении отливок: оксидная керамика создает воздушное давление на границе раздела металл-стержень, приводящее к образованию вмятин и раковин на поверхности отливки. Поэтому, для получения качественной поверхности отливок необходимо применять центробежную или вакуумную заливку, либо перепуск металла. Солькерамические стержни дополнительных технологических приемов не требуют.

Солекерамические стержни для тонкополостных отливок имеют, как правило, сложную конфигурацию, резкие переходы в сечениях, наличие концентраторов напряжений. Все это неблагоприятно сказывается на термической стойкости в момент заливки стержней жидким металлом. Повышение термической стойкости стержней осуществлялось за счет введения оксида алюминия в количестве до 2,5%, что позволило снизить коэффициент термического расширения с $4,3 \cdot 10^{-5}$ до $2,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Расчеты показали, что при этом прочность солекерамики в 1,5...2 раза превышает термические напряжения, возникающие при термоударе.

В качестве агрегата для изготовления суспензий применяют бегуны с подогревом до 80...90 °С. Суспензия запрессовывается в пресс-формы на гидравлическом прессе с давлением 0,15...0,2 МПа, при помощи стакана с электроподогревом, что позволяет стабилизировать размерную точность стержней при прессовании.

Для обжига стержни укладываются в шамотные короба и засыпаются оксидом алюминия. Температурный режим контролируется термопарами, помещенными в рабочее пространство печи и непосредственно в засыпку.

Отливки волноводных элементов радиоприборов СВЧ из сплава АЛ2 получали литьем по выплавляемым моделям. В качестве модельного состава использовали ПС 50-50. Для компенсации разницы температурного расширения солекерамики и этилсиликатной оболочки знаки стержней покрывали слоем парафина толщиной 0,1 мм («плавающие» стержни). Особенностью технологии является необходимость удалять модельный состав не в воде, а выплавлением. Был разработан также режим прокалки оболочек: поскольку стержни плавятся при 808 °С, прокалка проводилась при 650...700 °С в течение 8...10 ч. Удаление стержней из отливок происходило в воде за 15...20 мин. Шероховатость поверхности полостей отливок соответствовала 5-му и 6-му классу (ГОСТ 2789-95).

При использовании модельного состава на основе мочевины для отливок из стали и сплавов специального назначения рекомендовано удаление этих составов при температуре 180...190 °С в вакуумной камере с остаточным давлением порядка 13 Па.

Лопастные колеса и клапанные плиты получали литьем в кокиль, керамизированные и оболочковые формы на термореактивных связующих. При наличии особо сложных проточных полостей стержни для лопастных колес состояли из отдельных секторов, которые перед заливкой собирались в кондукторе.

Для получения тонкополостных отливок из стали и сплавов специального назначения использовалась теплофизическая защита солекерамических стержней из хлористого натрия путем нанесения на их поверхность слоя металлической композиции толщиной 0,1...0,5 мм. Покрытие стержней осуществлялось плазменным напылением, а также электротермическим испарением и конденсацией паров в вакууме.

Экспериментальное определение температурных полей было осложнено, так как незначительная толщина отливок и защитных оболочек часто не позволяет точно измерить температуру на границе раздела сред, а малая металлоемкость системы приводит к быстрому течению процесса во времени и пространстве. В связи с этим применялся аналитический метод решения задачи, ориентированный на использование ЭВМ.

Численные эксперименты по расчету температурных полей отливки, теплофизической защиты и солекерамического стержня производились с использованием конечно-разностного представления дифференциального уравнения теплопроводности Фурье:

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2t_i}{dx^2} \quad (3.3)$$

После подстановки начальных и граничных условий, система разностных уравнений при равномерной разбивке каждой среды на элементы имела вид:

$$T_m^{n+1} = A_i(T_{m-1}^n + T_{m+1}^n) + (1 - 2A_i)T_m^n, \quad (3.4)$$

где T_m^n – температура m-го элемента в n-ый момент времени;

n – индекс строки;

m – индекс столбца;

A_i – параметр, определяющий устойчивость вычислительного процесса.

Определение температуры на границах раздела сред производилось с учетом граничных условий по формуле, полученной на основе баланса тепла для соответствующих элементов сетки:

$$T_m^{n+1} = B_j(T_{m-1}^n + C_j T_{m+1}^n) + (1 - D_j) T_m^n, \quad (3.5)$$

где j – индекс границы среды.

Уравнения (3.4), (3.5) являются алгоритмом при решении задачи теплофизической защиты солекерамики, который был реализован последовательным расчетом температур в точках, соответствующих центрам элементов Δx_i через равные промежутки времени Δt . Все исходные данные и результаты вычислений представлялись в безразмерной форме, при этом в качестве масштабов использовались отношение температуры контакта t_k на границе «защитная оболочка – стержень» к температуре плавления соли $t_{пл}$ и отношение толщины стенки отливки к толщине защитной оболочки r/δ . Получение качественных тонкополостных отливок с использованием теплофизической защиты солекерамики определяется прочным соединением отливки с защитной оболочкой и отсутствием расплавления стержня. Поэтому, при проведении численного эксперимента было проанализировано температурное поле на границе «жидкий металл – защитная оболочка» и «защитная оболочка – стержень» при различном отношении r/δ . Эти данные были сопоставлены с результатами металлографических исследований промежуточных зон, которые показали, что качественное соединение отливки с защитной оболочкой наблюдается при температуре свариваемости $t_{св}$, находящейся в пределах 900 °С и длительности взаимодействия до 1 с.

На рис. 3.8 приведена номограмма, которая показывает зависимость температуры контакта «защитная оболочка – стержень» $t'_k/t_{св}$ и температуры контакта «металл – защитная оболочка» $t_k/t_{пл}$ от различного отношения r/δ .

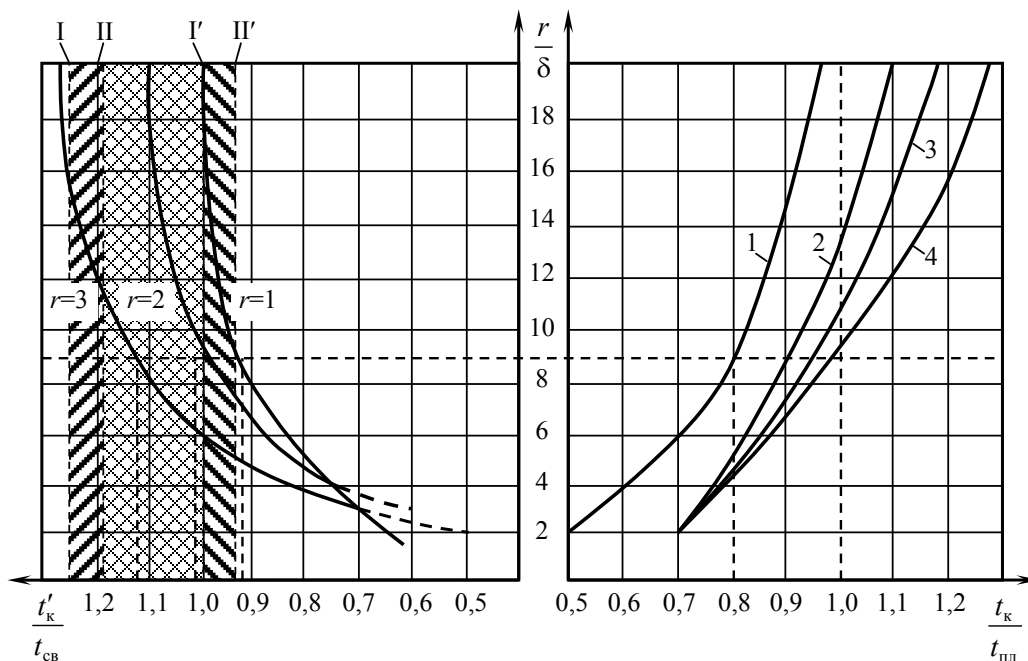


Рис. 3.8. Номограмма для определения $t_k/t_{пл}$ и $t'_k/t_{св}$ для отливок из стали 2Х13Л с различным соотношением r/δ : 1 – заливка в неподогретые формы; 2, 3 и 4 – заливка в формы, подогретые до 400, 500 и 750 °С, соответственно

Задавая различное отношение r/δ можно определить температуру нагрева стержня при заливке стали 2Х13Л в неподогретую оболочковую форму (кривая 1) и при подогреве формы до 400, 500, 750 °С (кривые 2, 3 и 4, соответственно). Вместе с тем, номограмма позволяет установить область свариваемости для отливок с различной толщиной стенки: I-II – область свариваемости для заливки в неподогретые формы, I'-II' – область свариваемости для заливки в формы, подогретые до 500 °С.

Задавая соответствующие конструкторские и технологические параметры, по номограмме можно определить условия получения качественных тонкостенных отливок.

Проверка расчетных данных экспериментом в контролируемых точках показала сходимость результатов 2 %.

3.2.2. Технология получения точных отливок

Рассматриваются вопросы получения легкоудаляемых керамических стержней для точных отливок. Для алюминиевых и магниевых сплавов эта задача решена с применением солекерамических стержней, изготавливаемых твердофазным спеканием (ГПСМО-процесс). Огнеупорным материалом служит поваренная соль промышленной чистоты, пластифицированная органическими добавками. Такая термопластичная суспензия обладает хорошими технологическими свойствами.

Обжиг солекерамических стержней производится при температуре 700...750 °С в окислительной среде в адсорбирующей засыпке. Стержни после обжига имеют прочность 7,8...12,3 МПа поверхность, соответствующую 7 классу (ГОСТ 2789-95) и незначительный коэффициент термического расширения, равный $0,438 \cdot 10^{-4}$ град⁻¹.

Так как температура спекания близка к температуре плавления ($T_{\text{спек}} \approx (0,8 \dots 0,9) \cdot T_{\text{пл}}$), то особое внимание в исследованиях уделялось изучению огневой усадки солекерамики и способам ее стабилизации. При изучении факторов, влияющих на огневую усадку (температура обжига, количество органических связующих, гранулометрия, количество стабилизирующих добавок), использован метод математического планирования эксперимента. Проведенные исследования позволили разработать технологию получения отливок типа закрытых колес, проточная полость которых выполнена с помощью солекерамических стержней. Шероховатость поверхности полостей соответствует 6-му и 7-му классам. Технология предусматривает применение как цельных стержней, так и стержней, состоящих из отдельных элементов и собираемых в кондукторе перед установкой в форму. Удаление стержней из отливок производится за короткое время в проточной воде.

Изготовление легкоудаляемых стержней для сплавов на медной основе и чугунов требует применения более высокотемпературных огнеупорных материалов. Наиболее полно отвечают требованиям огнеупорности и растворимости в неагрессивных средах алюминаты щелочных и щелочно-земельных металлов. Стержни после обжига имеют высокую механическую прочность на сжатие $\sigma_{\text{сж}} = 7,4 \dots 8,8$ МПа, небольшое относительно удлинение $\delta = 0,96$ % при 1200 °С, а также высокое качество поверхности.

Петрографические исследования показывают, что стержни на основе алюминатов имеют незначительное количество пор, заполненных воздухом (до 8 %), в отличие от стержней на основе оксидов. Это объясняется тем, что спекание алюминатов происходит при температурах, близких к температурам плавления, когда преобладающими процессами являются объемная диффузия и образование новых кристаллических центров.

Наиболее перспективными материалами из исследованных являются карбид кальция и сульфид церия. Получены экспериментальные отливки с применением стержней из карбида кальция.

Разработан технологический процесс получения легкоудаляемых стержней с помощью нанесения никельсодержащих композиций на солекерамику. Сущность этого процесса заключается в том, что на легкоудаляемую подложку-стержень наносится металлическая композиция в виде тонкой оболочки. Эта оболочка в одних случаях играет роль стержня, в других – препятствует термическому взаимодействию стержневого материала с жидким металлом. Толщина оболочки может быть от 0,8 до 1,5 мм, в зависимости от толщины стенки отливки.

Проведены металлографические исследования отливок, свидетельствующие о наличии непрерывного переходного слоя в зоне контакта напыленной оболочки и матрицы отливки. Этот слой обеспечивает высокую механическую прочность и теплопроводность соединения. Важным преимуществом технологии изготовления тонких полостей с помощью напыленных на солекерамику оболочек является высокое качество поверхности полостей.

3.2.3. Геометрическая точность отливок при использовании солекерамики

Получение тонких внутренних полостей в отливках из алюминиевых сплавов (клапанных плитах, лопастных колесах с малым проходным сечением и др.) затруднено из-за высоких требований, предъявляемых к стержням, оформляющим такие полости. Эти требования сводятся к следующему: высокая геометрическая точность (допуски на размер в пределах $\pm 0,1$ мм и менее, шероховатость поверхности $Ra=2,0\dots 2,5$ мкм); высокая механическая прочность при температуре заливки сплава; отсутствие химического взаимодействия с жидким металлом; удаляемость стержней из отливок в неагрессивной среде.

Традиционные способы изготовления стержней не обеспечивают комплекс этих свойств, в частности высокую механическую прочность в тонких сечениях и удаляемость в неагрессивных средах. Применение стержней, спекаемых из оксидов, также не решает эту проблему из-за необходимости выщелачивать их, и таким образом, растворять отливку.

Наиболее полно отвечают этим требованиям солекерамические стержни, получаемые прессованием термопластичных суспензий с последующим обжигом. Огнеупорным материалом для стержней является хлористый натрий, удаляемый из отливок в воде.

При обжиге солекерамики происходит выгорание органических составляющих и спекание высокодисперсного порошка соли, вследствие чего размеры стержней уменьшаются на величину огневой усадки. Близость температуры спекания ($700\dots 730$ °С) к температуре плавления соли (808 °С) приводит к тому, что массоперенос происходит под действием поверхностной и объемной диффузии, конечная пористость материала незначительна и составляет $7\dots 8$ %. В этих условиях величина огневой усадки нестабильна и колеблется в пределах $1,5\dots 10$ %, что неприемлемо при разработке технологического процесса получения точных отливок.

Цель настоящей работы – исследование влияния технологических факторов на огневую усадку, а также определение возможности снижения абсолютной величины усадки и ее стабилизации.

Изменение геометрических размеров до и после обжига фиксировали на стержнях сечением 1,5×7 мм и длиной 85 мм. Обжиг производили при 700...730 °С. Перед обжигом стержни помещали в шамотные короба с засыпкой глинозема.

Обработку результатов исследований проводили с применением статистических методов анализа в такой последовательности:

- проверка однородности рассматриваемых массивов зависимых переменных при различных температурах обжига и соотношениях ингредиентов;
- корреляционный анализ; для всех переменных, за исключением температуры обжига, проверяли их парную независимость;
- определение уравнений регрессии.

Исследования показали, что при прочих равных условиях огневая усадка в значительной степени зависит от температуры обжига и в интервале температур 700...780 °С колеблется от 1,5 до 10 %. Поэтому как в исследованиях, так и в практических разработках температура обжига стержней составляла 720 °С. При такой температуре стержни имели прочность при изгибе 4,9...5,9 МПа.

Установлено, что огневая усадка солекерамических стержней колеблется в значительных пределах.

С целью стабилизации и снижения величины усадки было предложено вводить в суспензию стабилизирующие добавки. Механизм воздействия стабилизатора на спекание, а следовательно, и огневую усадку заключается в том, что присутствие частиц другой фазы препятствует росту зерен, так как при движении границ зерен через частицу поверхность последней становится частью поверхности граница зерна. Увеличение поверхности границы зерна требует дополнительной энергии для ее движения. Когда граница зерна достигает включения, поверхностная энергия уменьшается пропорционально величине поперечного сечения включения. Для того чтобы граница миновала включение, поверхностная энергия должна вновь увеличиться. Следовательно, при наличии на границе большого числа включений нормальная кривизна зерна становится недостаточной для обеспечения непрерывного роста зерен после достижения ими некоторого предельного размера. Установлено, что предельный размер зерна определяется из выражения:

$$D_i = \frac{\alpha}{f_\alpha}, \quad (3.6)$$

где α – размер включения;

f_α – объемная доля включений.

Это выражение позволяет лишь приблизительно определить размер D_i . Однако оно показывает, что посторонние включения оказывают тем большее сопротивление росту зерен, чем меньше их размер и больше объемная доля. Вместе с этим замедляются диффузионные процессы при спекании и уменьшается огневая усадка.

Эффективность действия добавки зависит не только от размеров и количества включений, но и от их инертности по отношению к хлористому натрию. В качестве стабилизатора усадки использовали оксид алюминия с размерами зерен до 10 мкм. Оптимизацию составов стержней со стабилизирующими добавками проводили методом математического планирования эксперимента.

Температура обжига стержней 720 °С, содержание стеарина в суспензии 2,5±0,5 %.

На основании матрицы планирования был составлен план эксперимента, в соответствии с которым проводили опыты.

Дисперсионный анализ полученного по данным планируемого эксперимента уравнения множественной регрессии показал, что исследуемые факторы и их взаимодействие не оказывают значимого влияния на варьирование усадки, и в исследуемых пределах изменения факторов получено следующее уравнение регрессии; $\bar{y} = 2,8$.

Сравнение всех характеристик суспензий без добавок и со стабилизирующими добавками приведено в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики суспензий

Характеристики	Данные для суспензий	
	без добавок	со стабилизирующими добавками
Уравнение регрессии	$Y = -9,01 + 0,88X_2$	$\bar{y} = 2,8$
Диапазон изменения:		
содержания парафина	2	2
содержания стеарина	0,1	0,5
содержания хлористого натрия	3	3
содержания оксида алюминия	–	0,5
Усадки	3,9	2,1
Основной уровень:		
содержания парафина (X_2)	14	16
содержания стеарина	2,1	2,5
содержания хлористого натрия (X_3)	84	79
содержания оксида алюминия	–	2,0
усадки ($X_2=16$; $X_3^*=79$)	4,2; 3,7*	2,8
Оценка СКО варьирования усадки	2,1	0,73

Производственная проверка результатов исследований была проведена при изготовлении клапанных плит ККХ 12 010 герметичных компрессоров. По ранее принятой технологии клапанные плиты получали сложными методами механической обработки из четырех деталей с последующим соединением их пайкой в единое изделие. Использование солекерамических стержней позволило применить технологию литья по выплавляемым моделям.

Стержни после обжига проходили внешний контроль и контроль размеров с помощью комплекта шаблонов. После контроля их устанавливали в пресс-форму для получения модели, заполнение пресс-формы модельным составом (ПС 50-50) производили при температуре 45...50 °С.

С целью компенсации перемещений при прокалке оболочки знаковые части стержней покрывали слоем парафина толщиной до 0,1 мм для создания зазора между стержнем и оболочкой («плавающие» стержни). Готовые модели напайвали на стояк в блоки; с целью лучшего заполнения тонких стенок (до 1 мм) отливок была принята этажная литниковая система с вертикальным расположением моделей.

Формирование огнеупорного покрытия оболочковых форм производили методом послойного нанесения керамической суспензии с последующей обсыпкой их кварцевым песком и сушкой каждого слоя. Применяли суспензию на основе гидролизованного этилсиликата - 40 с наполнителем – пылевидным кварцем.

Удаление моделей из оболочки производили в ванне с расплавленным модельным составом. После установки в форма и засыпки наполнителем форма прокаливала в камерной печи при температуре 650...700 °С в течение 8...10 ч. Перед заливкой формы

* Значение усадки рассчитано по уравнению регрессии $Y = -14,22 + 0,88X_2 + 0,062X_3$, учитывающему разницу содержания хлористого натрия в первой и второй серии опытов

охлаждали до 250...300 °С и заливали сплавом АЛ2 при 690 °С. Сплав готовили в индукционной печи ЛПЗ-67 с графитовым тиглем. Рафинирование сплава проводили гексахлорэтаном, затем модифицировали его комплексным модификатором из смеси хлористых и фтористых солей калия и натрия. После выдержки в течение 20 мин сплав разливали по формам.

Удаление стержней из полостей отливок осуществляли в проточной воде при комнатной температуре за 5...17 мин. Шероховатость поверхности полостей соответствовала 5-му и 6-му классам (ГОС Т 2789-95), размерная точность находилась в пределах 10-го и 11-го квалитетов.

3.2.4. Моделирование температурных полей отливок

Методологической основой исследования любого вновь разрабатываемого технологического процесса является синтез результатов натурального и численного эксперимента. Этот принцип положен в основу настоящей работы.

В качестве математической (теплофизической) модели исследуемых технологических процессов использовалось конечно-разностное представление краевой задачи теплопроводности Фурье.

Температурные поля многослойной среды описывались системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2t_i}{dx^2}, \quad (3.7)$$

где $i=1, 2, 3, \dots$ – индексы, которые относятся к соответствующим средам;
 a_i – температуропроводность соответствующей среды.

В начальный момент времени температура во всех точках однородной среды одинакова и равна соответственно температуре заливки металла и температуре цеха:

$$\begin{aligned} t_3(X, 0) &= t_{\text{зал}} = 1853 \text{ К}; \\ t_i(X, 0) &= 293 \text{ К}, \quad i=1, 2, 4, 6, 7. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Возможен также случай, когда литейная форма перед заливкой подогревается, т.е. температура к начальному моменту времени задается по координате $t_i(X, 0)$

$$t_i(X, 0) = f_i(X) \quad (3.9)$$

где $f_i(X)$ – заданные функции.

Граничные условия учитывают плотный контакт на границах раздела сред.

$$\lambda_i \frac{dt_i(r_i, \tau)}{dx} = \lambda_{i+1} \frac{dt_{i+1}(r_{i+1}, \tau)}{dx}; \quad (3.10)$$

$$t_i(r_i, \tau) = t_{i+1}(r_{i+1}, \tau), \quad (3.11)$$

где λ_i – коэффициенты теплопроводности соответствующих сред;

r – геометрический параметр среды.

Так как через среднюю точку проходит плоскость (ось) симметрии системы многослойная форма-отливка-стержень, то для этой точки справедливо условие:

$$\frac{dt_6(r_6, \tau)}{dx} = 0. \quad (3.12)$$

Кроме того, на достаточно большом расстоянии от отливки окружающая среда за время снятия тепла перегрева металла не успевает прогреться, поэтому

$$t_1(0, \tau) = 0; \quad \frac{dt_1(0, \tau)}{dx} = 0. \quad (3.13)$$

Конечно-разностные аналоги приведенных выше дифференциальных уравнений определялись по явной схеме.

Численные эксперименты реализовались последовательным расчетом температур в точках, соответствующих центрам элементов ΔX_1 через равные промежутки $\Delta \tau$.

Результаты численного моделирования температурных полей отливок и литейных форм использовались при исследовании и разработке следующих технологических процессов:

- изготовление отливок в керамизированных формах;
- изготовление отливок при использовании пористых металлокерамических стержней с последующей пропиткой их металлом;
- изготовление тонкополостных отливок при применении легкоудаляемых стержней.

Описанная математическая модель обеспечивала исследование процессов по следующим физическим моделям:

- задача теплофизической дегазации пограничного отливке (жидкому расплаву) пористого слоя;
- задача качественного сцепления (сваривания) отливки с пограничным пористым металлокерамическим слоем;
- задача теплофизической защиты легкоудаляемого стержня от теплового воздействия отливки;
- задачи по тепловому расчету специальных тепловых и газовых барьеров (слоев) литейной формы.

Основной и общей для всех рассматриваемых задач физической (теплофизической) особенностью является тот факт, что параметры процесса должны быть оптимальными (по тем или иным критериям) к моменту образования твердой корочки металла отливки (к моменту ее затвердевания). Это обстоятельство позволило применить для всех процессов математическую модель без учета скрытой теплоты кристаллизации металла отливки.

Контрольные эксперименты подтвердили достаточную для инженерных задач точность расчетных данных к данным физического эксперимента. Проведенная работа позволила оптимизировать параметры разрабатываемых технологических процессов. При этом в численных экспериментах роль экспериментальной установки (по аналогии с физическим экспериментом) выполняла ЭВМ, работающая по изложенному выше алгоритму.

3.2.5. Литье рабочих колес центробежных насосов с проточными полостями без механической обработки

Важнейшей задачей насосного машиностроения является получение рабочих колес, используемых для насосных установок (скваженных, герметических, циркуляционных), с оптимальными гидравлическими параметрами и экономным расходом электроэнергии.

Такие колеса должны иметь качественную поверхность проточных полостей, которую получают, например, при литье по выплавляемым моделям. Однако это возможно лишь для колес среднего габарита из сплавов на железной и медной основах. Для крупных и тонкополостных колес, особенно из алюминиевых и цинковых сплавов, приме-

нение литья по выплавляемым моделям затруднено. Крупные колеса получают с применением песчаных стержней и проточные полости обрабатывают механическими методами с большими трудозатратами, в том числе зачисткой вручную. Тонкополостные колеса из алюминиевых и цинковых сплавов получают механическими методами, в связи с невозможностью применения керамических стержней, а применение выплавляемых металлических стержней вызывает затруднения при их удалении, деформацию дисков колес, что делает их неприемлемыми. Поэтому разработка технологии литья колес различных габаритов широкой гаммы сплавов с проточными полостями без механической обработки крайне важна для насосного машиностроения, позволяющая повысить гидравлические характеристики, кавитационный запас, виброакустические показатели, надежность и долговечность.

Анализ литературных источников по существующим способам получения рабочих колес центробежных насосов и обследование ряда заводов показали, что в настоящее время колеса получают литьем и механической обработкой с последующей их сваркой или пайкой (при ширине каналов на выходе менее 0,006 м).

Все колеса могут быть разделены на три класса: 1 класс с шириной канала проточной полости до 0,01 м; 2 класс – 0,01...0,04 м; 3 класс – свыше 0,04 м (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Рекомендуемые способы получения литых колес с повышенным качеством поверхности проточных полостей



Ширина полости B , м	Диаметр отливки D , м	Группа	Сплав	Тип стержня**			***	
				1	2	3		
1 класс, B до 0,01	До 0,2	Тонкополостные	Железный		+		0	
	Свыше 0,2		Медный	0	+		0	
Алюминиевый*			0	+				
2 класс, $B=0,01...0,04$	До 0,2		Железный			+		
			Медный			+		
			Алюминиевый*			+		
	0,2...4	Железный		0	0	0	+	
		Медный	0	0	0	0	+	
		Алюминиевый*	+	0	0	0		
Свыше 0,4	Железный		0	0	0			
	Медный		0	0	0			
	Алюминиевый*		0	0	0			
3 класс, B свыше 0,04	До 0,4	Крупнополостные	Железный			0	+	
	Свыше 0,4		Медный		0	+	0	
Алюминиевый*			0	+				
Свыше 0,4		Железный		0	+			
	Медный		0	+				
	Алюминиевый*		0	+				

* алюминиевый или цинковый сплав

** 1 – соляной, 2 – гальванический оболочковый, 3 – облицованный керамикой: «+» – рекомендуемый; 0 – возможный вариант

*** другие способы формообразования

Ширина канала на выходе, взятая в качестве критерия для определения класса колес, дает ориентировку для выбора способа изготовления стержней. Для каждого класса колес рекомендованы типы стержней, позволяющие получить проточные полости с высококачественной поверхностью, а именно: для получения литых колес с тонкими полостями (1-го и 2-го классов) из алюминиевых и цинковых сплавов предложены соляные и оболочковые гальванические стержни. Для получения крупных колес (3-го класса) предложены песчаные стержни с керамической облицовкой.

В качестве исходных материалов для литых соляных стержней при получении металлических оболочек проточных полостей были выбраны нитраты щелочных металлов – KNO_3 , $NaNO_3$, а для литья колес из алюминиевых сплавов применили хлористые соли.

Первый этап исследования включал: выбор оценок критериев качества соляных стержней из нитратов – пределов прочности при растяжении и при сжатии, качества поверхности, линейной усадки, жидкотекучести расплава солей, коробления, теплоустойчивости, удаляемости; выбор переменных и стабилизируемых факторов X : реализацию планов основных и контрольных экспериментов. У стержней из хлористых солей определяли прочность, термостойкость, линейную усадку и смачиваемость поверхности жидким металлом.

Выбранные критерии качества стержней разбиты по группам в порядке убывания приоритета. К первой группе отнесены прочностные характеристики и качество поверхности стержня.

Результаты опытов первого этапа исследований по пятифакторному плану Хартли Na_5 после расчета коэффициентов математических моделей и первичной оптимизации дали следующие зависимости по прочности при растяжении (3.14), качеству поверхности (3.15) и усадке (3.16) нитратов щелочных металлов:

$$Y_1 = 21,8 - 7,5X_1 - 2X_2 - 3,8X_1^2 - 5,5X_2^2; \quad (3.14)$$

$$Y_2 = 5,6 - 1,8X_1 - 0,65X_1^2; \quad (3.15)$$

$$Y_3 = 0,36 - 0,29X_1 - 0,03X_2 + 0,03X_2^2, \quad (3.16)$$

где X_1 – температура металлической оснастки,

X_2 – давление на соляной расплав (переменные в кодированном виде).

Для нахождения индивидуального оптимума каждого критерия Y_1 , Y_2 и Y_3 строили блок-схемы поиска решений. После определения индивидуальных технологических решений их сравнивали. В случае компромиссности значений факторов оптимальный режим выбирали графоаналитически или опытным путем с последующей экспериментальной проверкой.

Установлены основные технологические параметры литья соляных стержней в металлические формы: температура нагрева расплава солей перед заливкой; диаметр литникового отверстия; температура оснастки; величина давления на расплав в период его кристаллизации в оснастке.

Соляные стержни характеризуются следующими показателями: предел прочности при растяжении – 1,70 МПа, качество поверхности – 6,5 баллов, усадка – 0,43 %.

Выявлено, что стержни, изготовленные из оптимальных по жидкотекучести солей, соответствуют требованиям по качеству поверхности, но недостаточно прочны при использовании в качестве опорных для гальванопластических оболочек проточных полостей колес.

На втором этапе исследования были предложены смеси на основе солей с минеральными добавками: кальцитом, маршаллитом, силлиманитом. Введение тугоплавких порошкообразных наполнителей в составы нитратов щелочных металлов позволило в

более широком интервале варьировать свойства стержней, в частности, изменением температур нагрева расплава солей и оснастки перед заливкой.

Значения факторов в экспериментах по четырехфакторному плану Рехтшафнера и показатели критериев качества изменяли в различных направлениях. По коэффициентам рассчитанных математических моделей до их оптимизации сделаны следующие выводы о влиянии технологических факторов в диапазоне варьирования на исследуемые критерии качества соляных стержней:

- предел прочности при сжатии растет при увеличении содержания (до 30...33 %) наполнителя – минеральной добавки;
- удаляемость стержней растворением в воде ухудшается при введении в смеси нерастворимых добавок.

Предварительные выводы говорят о наличии конкурирующих факторов, что затрудняет принятие решений при оптимизации моделей, если не учитывать установленный приоритет критериев качества.

После проведения индивидуальной оптимизации математических моделей по главным критериям задача упростилась. Подстановкой значений стабилизируемых факторов и построением для каждой модели двухфакторных диаграмм определяли зону компромиссных решений в исследуемом диапазоне экспериментальной области. После чего были построены номограммы для определения основных показателей качества соляных стержней в зависимости от состава смеси и режима литья. На номограммах указаны также направления улучшения каждого показателя. Для уточнения их проводили контрольные испытания разработанных водорастворимых смесей.

Номограммы позволяют рационально выбирать составы смеси и режимы изготовления соляных стержней, отвечающих конкретным условиям формообразования точных полостей рабочих колес и аналогичных деталей насосов.

Решение задачи изложенными методами обеспечило повышение качества водорастворимых стержней по всем критериям, в том числе: предел прочности при растяжении вырос почти втрое (до 5 МПа); при сжатии – вдвое (до 130 МПа); линейная усадка при оптимальном режиме стала в два раза меньше; повышена теплостойкость стержней при незначительном их короблении; существенно улучшено качество литой поверхности соляных стержней (до 7 баллов); сохранена достаточная жидкотекучесть расплавленной смеси и хорошая удаляемость стержней растворением в воде.

Закономерности регулирования качества соляных стержней проверяли введением в расплав исходных солей при найденных оптимальных режимах других добавок: трепела, карбидов.

Механизм упрочнения соляных композиций изучали при микроскопическом исследовании образующихся структур, а также снятием термограмм и рентгенограмм более 20 составов смеси.

Свойства каркасных систем жесткости соль – минерал во многом зависят от природы порошкообразных наполнителей. Упрочнение композиций происходит за счет структурирования матрицы, химического взаимодействия компонентов, создания механических связей. Так, тонкодисперсные добавки минералов могут служить дополнительными центрами кристаллизации расплава соли. При этом в соляной основе создается каркас из связанных зерен за счет жидкой оболочки расплавляемой соли. Этот каркас придает жесткость композиции после ее охлаждения и наиболее высокую прочность можно ожидать при полном контакте частиц наполнителя и их плотной упаковке.

В действительности частицы наполнителя имеют поверхностные неровности, поэтому, как и за счёт округлости, наблюдается неполный контакт частиц, то есть не вся пленка соли, окружающая частицу наполнителя, играет активную роль в упрочнении композиции.

Повышенную прочность соляной смеси с добавкой дистен-силлиманита можно объяснить тем, что, кроме связывания его частиц за счет пленок соли, каркас упрочняется за счет механического зацепления пилообразных частиц дистен-силлиманита в системе и образования войлочной структуры. Это установлено при микроскопическом изучении прозрачных шлифов солей в проходящем и поляризованном свете.

После гидрофобизации токопроводным лаком поверхности соляных стержней на них наносили металлическое покрытие. Медную оболочку толщиной до 0,001 м формовали по соляному стержню из смеси на основе нитрата натрия с добавкой 20...25 % дистен-силлиманита электролитическим осаждением. Такие стержни с гальванопластической оболочкой применили для получения биметаллических рабочих колес насосов. Их устанавливали в металлическую форму и заливали сплавом типа ЦАМ.

Прочность соединения основного металла с электроосажденным металлом оболочки увеличивается за счет диффузии, которая изменяется в зависимости от температуры заливки, и за счет механического соединения, зависящего от величины дендритов структуры осадка.

Качество поверхности металлической оболочки зависит, в основном, от качества поверхности стержня. Профилограмма оболочки со стороны проточных полостей колеса показала, что шероховатость поверхности соответствует 6-му классу (ГОСТ 2789-95).

Для получения тонкополостного колеса насоса со слоем металла, имеющего более высокую температуру плавления, чем цинковый сплав, металлическую оболочку освобождали от опорного соляного стержня растворением и заполняли смесью с повышенной термостойкостью.

Сопоставлением термостойкости и линейной усадки стержней из смеси на основе хлористого натрия с минеральными добавками установлено, что с увеличением содержания добавки указанные характеристики изменяются в благоприятную сторону. Тонкодисперсный оксид алюминия с температурой плавления более высокой, чем у хлористого натрия, повышает термостойкость литых стержней почти в 2,5 раза за счет изменения характера кристаллизации расплава соли и коэффициента линейного расширения.

Введение в расплав хлористого натрия 30...33 % порошкообразного наполнителя приводит к увеличению предела прочности стержней при растяжении до 4,5 МПа и к повышению качества их поверхности до 6 баллов.

Изготовление рабочих колес 2 класса с применением соляных стержней осуществляли в последовательности: отливали диск с лопастями из сплава ЛК80-3Л; диск устанавливали в металлическую оснастку, нагретую до 240 °С, и заливали межлопастное пространство смесью из хлористого натрия с 20...25 % дистен-силлиманита под давлением 1,5...2,5 МПа. После охлаждения ведущий диск со стержнем извлекали из ящика и устанавливали в пресс-форму, оформляющую ведомый диск. Ее заливку производили сплавом АЛ9 при температуре 720...740 °С. После охлаждения и извлечения отливки стержень из проточных полостей удаляли растворением в воде в течение 1500...1800 с.

Стержни из хлористого натрия без наполнителя и с наполнителем слабо смачиваются жидким алюминиевым сплавом (контактный угол изменяется от 157 до 121⁰), а также имеют малые поры, поэтому капиллярного проникновения расплава в стержень не происходит. Шероховатость поверхности отливок соответствовала 5-му классу (ГОСТ 2789-95).

Для получения колес с шириной каналов на выходе свыше 0,04 м (3-й класс) выбраны песчаные стержни с керамической облицовкой. Изготовление стержней осуществляли в последовательности: формирование опорного стержня, нанесение на него гидрофобизатора, нанесение слоя керамики из огеливаемой суспензии с последующей термической обработкой облицовки. В качестве гидрофобизирующего покрытия при-

меняли лак МЛ-92, в качестве материала опорного стержня – ХТС, которая обеспечивает легкую выбиваемость стержней из проточных полостей отливок.

Такой двухслойный стержень подвергали тепловой обработке с целью дегазации облицовки, что сопровождалось прогревом ХТС и приводило ее к разупрочнению. Для устранения потерь механической прочности стержня из ХТС при дегазации облицовки предложены следующие пути:

– обработка в вакууме, которая дает лишь частичное решение задачи, так как процесс все же сопровождается разложением связующего ХТС, несмотря на понижение температуры прокали до 400...450 °С;

– защита за счет создания теплового барьера (в этом случае нагрев пограничных слоев опорного стержня уменьшается до заданной величины и разложение связующего с разупрочнением ХТС исключает).

Установлены зависимости прочности стержней и газотворности их облицовки от режимов термообработки.

В стержнях с керамической облицовкой при заливке жидкого металла на границе «металл – стержень» возникает газовое давление. Установлено, что если оно достигает 50 Па, то поверхность отливки может поражаться газовыми дефектами и шероховатостью.

Проведены исследования газового давления с помощью тензометрического датчика в заливаемых сталью 20Х13Л цилиндрических образцах с различными толщинами облицовки, составами опорного стержня, а также режимами термической обработки. Как показали результаты, наибольшее снижение газового давления в облицованном керамикой стержне дает тепловая обработка. Так, газовое давление при опорном стержне из ХТС после обработки при 700 °С в течение 600 с снижается в 2...2,5 раза и составляет через 10 с после заливки металла 190 Па.

Газообразование в ХТС вызывает необходимость создания барьера между дегазированным слоем керамики и опорной частью стержня. В качестве такого противогазового барьера предложена стеклоэмалевая пленка, которая образуется из предварительно нанесенного на опорный стержень шликера при дегазации керамической облицовки термообработкой. Толщина пленки составляет, примерно 0,001 м.

Исследования кинетики прогрева стержня из ХТС, облицованного керамикой, подтвердили необходимость противогазовой защиты. Температуру прогрева стержня в условиях всестороннего воздействия сплава в зависимости от времени устанавливали экспериментально или аналитическим путем. Для реальной системы «форма – отливка – стержень» температурные поля сред определяли с использованием ЭВМ. Численные эксперименты по расчету температурных полей отливки, облицовки и опорного стержня проводили с использованием конечно-разностной схемы вычислительного процесса.

Для расчетов применили уравнения:

$$t_{m,n+1} = \frac{1}{M_i} (t_{m-1,n} + t_{m+1,n}) + \left(1 - \frac{2}{M_i}\right) t_{m,n}, \quad (3.17)$$

где $t_{m,n}$ – температура m -го элемента в n -й момент времени;

$$t_{m,n+1} = \frac{2}{M_i(1+NP)} (t_{m-1,n} + Nt_{m+1,n}) + t_{m,n} \left(1 - \frac{2}{M_i} \cdot \frac{1+N}{1+NP}\right); \quad (3.18)$$

$$N = \frac{\lambda_{i+1} \delta X_1}{\lambda_i \delta X_{i+1}}, \quad P = \frac{M_{i+1}}{M_i};$$

M – параметр, определяющий устойчивость процесса вычислений.

Уравнения (3.17) и (3.18) являются алгоритмом решения задачи предупреждения разложения связующего ХТС опорного стержня до образования корочки металла на поверхности отливки. Они были решены последовательным расчетом температур в точках, соответствующих центрам элементов δ_{x_i} сред через равные промежутки времени Δt .

При расчетах варьировали размеры сред, материал формы, наличие покрытия и режим предварительной обработки формы. Численные эксперименты показали, что толстостенные отливки приводят к более высокому и быстрому нагреву керамической облицовки и опорного стержня. Керамическая облицовка толщиной до 0,01 м не предохраняет ХТС в стержне от нагрева до температуры разложения связующего (смола Фуритол-107) прежде, чем образуется корочка металла в отливке. Таким образом, в связи с интенсивным газовыделением эта облицовка не обеспечивает получение качественной литой поверхности. Поэтому, наличие противогазовой защиты при керамической облицовке стержней из ХТС является обязательным.

При использовании ХТС с пониженной термостойкостью (ниже 650 °С) связующего (например, СФ-3042) и проведении дегазации облицовки без применения вакуума, в стержнях предусматривали тепловой барьер из керамики холодного отверждения или сажи. Теплозащитный слой располагали между слоем эмали и ХТС. Измерение температур в стержнях с тепловым барьером при прокатке (700 °С) показали, что слой сажи толщиной до 0,001 м обеспечивает перепад температуры на границах раздела сред эмаль – сажа и сажа – ХТС в 100 °С. Для обеспечения перепада температур между аналогичными поверхностями порядка 200 °С, согласно расчету с последующей экспериментальной проверкой, необходим слой керамики толщиной не менее 0,007 м.

Экспериментальная проверка показала незначительное запаздывание прогрева элементов системы при сравнении с расчетными точками, что объясняется понижением теплопроводности материала опорного стержня при повышении температуры.

Проверка качества дегазации облицовки керамизированного стержня с тепловой и противогазовой защитами термической обработкой (при 760 °С) по снятым дериватограммам показала, что общая потеря массы пробы составила всего 0,5 %.

Для получения крупнопустотных отливок насосов изготавливали стержни из ХТС на связующем Фуритол-107. Затем на них наносили эмалевый шликер с содержанием: SiO_2 – 45,5, Na_2O – 23,9, Al_2O_3 – 5,2 % и наполнителей. После сушки эмалевой прослойки в течение 480 с стержни облицовывали (заливкой суспензии в полость между стержневым ящиком и опорным стержнем) керамикой холодного отверждения. Далее стержень извлекали из оснастки и подвергали поверхностной тепловой обработке при 700 °С и производили все обычные операции сборки формы и подготовки к заливке. Отливки из стали 20Х13Л, полученные в песчаных формах с керамизированным стержнем проточной полости, имели следующую шероховатость: на наружной поверхности (при цирконовом покрытии формы) – 120 мкм; в поточной полости – 40 мкм.

Применение таких многослойных стержней исключило операцию механической зачистки поверхности проточных полостей отливок.

3.2.6. Солекерамические стержни для отливок из алюминиевых сплавов

Повышение технико-экономических характеристик машин и оборудования в значительной степени связано с изменением конструкции деталей, имеющих сложные внутренние полости, требующие высокой чистоты поверхности. Для деталей типа ло-

пастных колес характерны высокие требования, предъявляемые к геометрии (точность и повторяемость размеров, тонкие кромки). Сечение лопастей представляет собой настолько сложную кривую, что затрудняется возможность какой-либо механической обработки, в том числе и ручной зачистки.

Выполнение всех этих требований при существующих технологических процессах чрезвычайно затруднено. Песчаные стержни с различными связующими не обеспечивают нужной шероховатости поверхности. Применение керамических стержней из глинозема, силикатов, кремнезема при литье алюминиевых сплавов неприемлемо из-за необходимости удалять их путем выщелачивания.

Решение задачи получения тонкостенных полостей с учетом легкого удаления стержней из алюминиевых отливок стало возможным с использованием солекерамических стержней. В качестве огнеупорного материала для этих стержней применяется хлористый натрий со следующими характеристиками: плотность $2,1 \text{ г/см}^3$, температура плавления $808 \text{ }^\circ\text{C}$, температура кипения $1440 \text{ }^\circ\text{C}$, растворимость в воде при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 317 г/л .

Технология изготовления стержней заключается в получении термопластичной суспензии (пасты), состоящей из $80...87\%$ тонкомолотой соли, 2% стеарина и $12...18\%$ парафина. Приготовление суспензии заключается в смешивании соли с расплавленным стеарином и парафином при температуре $70...80 \text{ }^\circ\text{C}$ в бегунах с подогревом. Готовая суспензия запрессовывается в пресс-форму для получения стержня-сырца. Спекание солекерамических стержней производится в засыпке адсорбентом при температуре $720 \text{ }^\circ\text{C}$. Процесс спекания сопровождается огневой усадкой и связанным с ней короблением стержней, что приводит к изменению геометрии стержня и полости отливки. Если учесть, что в тонкостенных отливках допуски на размеры полостей составляют $0,05...0,1 \text{ мм}$, становится очевидной необходимость управления этим процессом.

Исследования показали, что усадка солекерамики при спекании направлена перпендикулярно границам зерен. В агрегате частиц такой анизотропный эффект сопровождается возникновением напряжений, поскольку сумма всех векторов усадки будет отлична от нуля. В результате возникают напряжения растяжения или сжатия, вызывающие локальное замедление или ускорение спекания. Деформация стержня Δf при этом происходит под действием растягивающих усилий, причем величина этих усилий зависит от дисперсности порошков соли, участвующих в спекании. Эксперименты проведенные с порошками соли различной фракции (рис. 3.9), позволили получить удовлетворительные результаты при использовании порошков с удельной поверхностью S более 80 мм^{-1} .

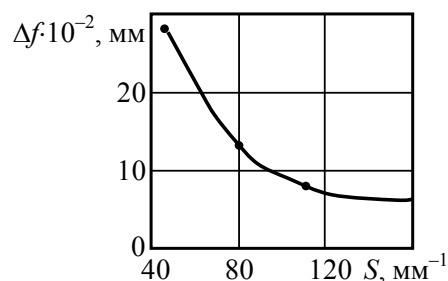


Рис. 3.9. Влияние удельной поверхности порошка соли на коробление стержней при спекании

На размерную точность стержней значительное влияние оказывают термомеханические характеристики солекерамики, которые изучали путем измерения прогиба стержней сечением $(5 \times 5) \text{ мм}$ под действием собственной массы при расстоянии между опорами 300 мм .

Полученные результаты (табл. 3.3) позволяют сделать следующие выводы:

– солекерамические стержни, в отличие от оксидных, имеют температуру размягчения, близкую к температуре плавления соли. Такая способность солекерамики позволяет повысить размерную точность отливок, поскольку температура заливки алюминиевых сплавов ниже температуры размягчения стержней;

Таблица 3.3

Прогиб стержней из NaCl и NaCl с добавлением Al₂O₃ при различных температурах испытаний T

T, °C	Прогиб стержней $\delta \cdot 10^{-2}$, мм	
	NaCl	NaCl+Al ₂ O ₃
200	0	0
250	1,3	0,4
300	3,1	1,1
350	11,9	1,6
400	17,1	3,1
450	22,8	15,5
500	30,6	20,6
550	35,8	–
600	41,3	23,5
650	43,1	23,6
700	43,8	23,8
710	43,9	23,8
720	76,2	24,7
730	–	24,8
740	–	25,1
750	307,8	25,7
760	–	29,5
800	–	75,0
805	–	250,0

– модифицирование стержневой смеси оксидом алюминия в количестве 4...6 % позволяет значительно повысить термомеханические характеристики стержней.

Испытания солекерамики на термостойкость показали, что стержни из хлористого натрия с добавками оксида алюминия лучше переносят термоудар (рис. 3.10), чем стержни из хлористого натрия без добавок.

Результаты (рис. 3.10) показали, что наиболее целесообразным является применение стержней с добавками оксида алюминия. Эти стержни, хотя и имеют меньшую начальную прочность, однако не растрескиваются при пятнадцати теплосменах и сохраняют остаточную прочность порядка $\sigma_{сж} \approx 3,8 \cdot \text{МПа}$.

Натурные испытания термостойкости стержней проводили при циклическом нагрев-охлаждении цилиндров диаметром 50 мм, высотой 75 мм и с толщиной стенки 3 мм. Испытания показали, что стержни выдерживают два-три цикла до появления первой трещины на образующей цилиндра, что свидетельствует об их достаточной термостойкости для получения каче-

ственных отливок.

Для определения термических напряжений, возникающих в солекерамике, измеряли относительное удлинение стержней δ . Солькерамика из хлористого натрия имеет относительное удлинение 2,95 %, введение оксида алюминия позволило снизить эту величину до 1,78 % (рис. 3.11). При этом замечено, что с увеличением температуры спекания солекерамики наблюдается тенденция к некоторому повышению относительного удлинения за счет уменьшения общей пористости системы. Так, в исследованном интервале температур спекания стержней относительное удлинение колеблется от 2,78 % при температуре спекания 650 °C до 2,95 % при температуре спекания 720 °C.

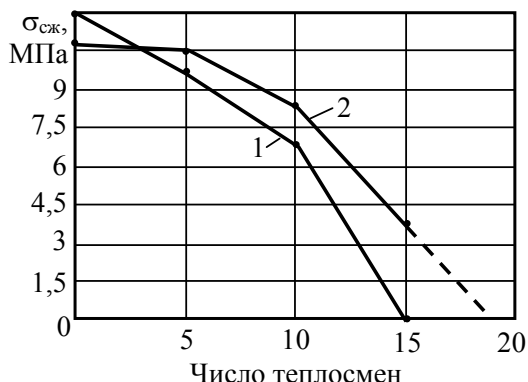


Рис. 3.10. Зависимость прочности стержней от числа теплосмен состава: 1 – NaCl; 2 – NaCl+Al₂O₃

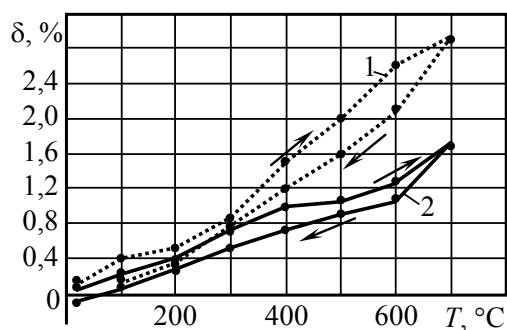


Рис. 3.11. Относительное удлинение солекерамики на основе: 1 – NaCl; 2 – NaCl+Al₂O

По результатам измерения относительного удлинения стержней был рассчитан коэффициент термического расширения. Для стержней из хлористого натрия $\alpha_1=4,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а для стержней из хлористого натрия с добавками оксида алюминия $\alpha_2=2,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Модуль упругости солекерамики определяли по деформации образцов под действием нагрузки.

Модуль упругости E рассчитан в зоне упругой деформации солекерамического стержня, где свойства стержня подчиняются закону Гука. Коэффициент Пуассона μ принят равным 0,25. Результаты вычисления термических напряжений стержней представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Результаты вычисления термических напряжений стержней

Характеристика образцов, № партии	Нагрузка $P \cdot 9,8$, Н	Абсолютное удлинение Δl , см	Модуль упругости E , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа
Стержни из NaCl					
№ 28	750	0,250	309,7	11,77	18,01
№ 13	650	0,221	304,3	11,56	16,00
№ 4	720	0,201	364,8	13,86	17,39
№ 27	680	0,195	365,2	13,88	17,25
№ 22	712	0,200	367,6	13,969	18,65
Стержни из NaCl+Al ₂ O ₃					
№ 18	620	0,192	339,6	7,81	16,00
№ 11	565	0,199	300,0	6,90	14,03
№ 6	510	0,151	337,7	7,77	12,585
№ 24	545	0,185	303,4	6,98	13,163
№ 29	450	0,150	312,7	7,19	12,676
№ 5	465	0,150	319,2	7,34	11,44

Результаты испытаний и расчетов показали, что у стержней с добавкой оксида алюминия термические напряжения ниже, чем у стержней из чистого хлористого натрия. Предел прочности при сжатии этих стержней в 1,6...2,1 раза выше термических напряжений, возникающих в стержнях при заливке металла.

3.2.7. Теплофизическая защита стержней для получения тонкополостных отливок

Получение тонкополостных отливок (пустотелых лопаток турбин, лопастных колес и т.д.), связанное с удалением стержней из полостей, упрощается при использовании солекерамики. Вследствие разницы температур плавления солей и металла отливки (773...1073 К) указанные стержни должны быть защищены от расплавления. Теплофизическую защиту осуществляют гальваническим покрытием или напылением Cu, Ni, Cr. При этом для получения качественных отливок нельзя допускать размягчения стержня до окончания кристаллизации отливки и взаимодействия защитного слоя с материалом отливки. Достичь этого можно правильным выбором соотношения между толщинами стержня, отливки и защитного слоя, а также теплофизических параметров системы.

Экспериментальное определение температуры в заданных граничных точках для тонкополостных отливок осложнялось несоизмеримостью скорости протекания теплофизических процессов и инерционностью приборов, регистрирующих температуру, а

также большим числом геометрических и теплофизических параметров. Поэтому возникла необходимость численного моделирования температурных полей в рассматриваемой системе с использованием конечно-разностного представления дифференциального уравнения теплопроводности Фурье.

Процессы теплопереноса в средах 1 – 6 (рис. 3.12) описываются дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье:

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2t_i}{dx^2},$$

где $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ – индексы, которые относятся соответственно к окружающему воздуху, материалу формы, жидкому металлу отливки, теплофизической защите, солекерамическому стержню, соответственно.

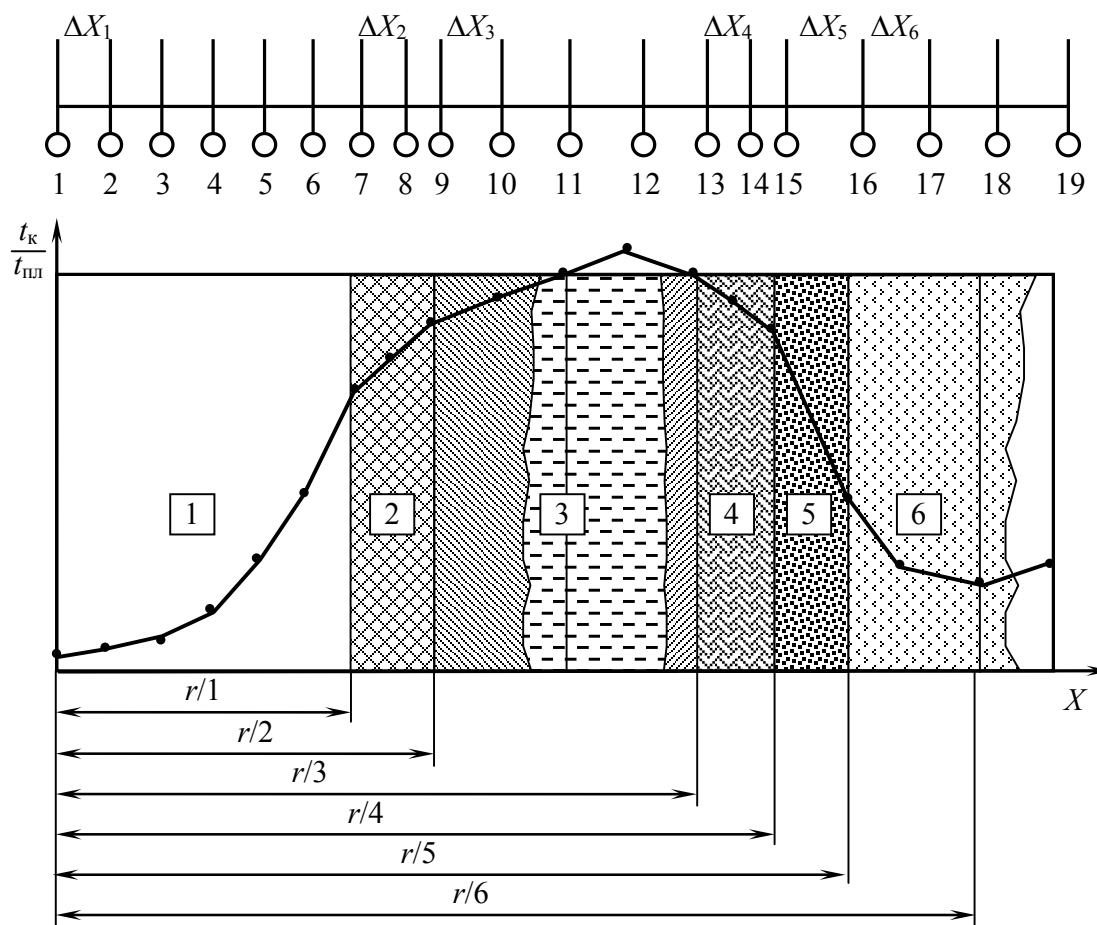


Рис. 3.12. Теплофизическая схема защиты солекерамики при характеристике сред: 1 – воздух; 2 – материал литейной формы; 3 – жидкий металл отливки; 4 – теплофизическая защита; 5 – геометрическая защита; 6 – солекерамический стержень

Теплофизическая защита 4 в случае размягчения солекерамического стержня 5 является одновременно и геометрической защитой. В начальный момент времени температура во всех точках однородной среды одинакова и равна соответственно температурам заливки (среда 3), цеха (среда 1) и формы (среды 2, 4, 5 и 6): $t_1(X, 0)=293$ К; $t_2(X, 0) = t_4(X, 0) = t_5(X, 0) + t_6(X, 0) = t_{\phi} = 1223$ К; $t_3(X, 0)=t_{зал}=1853$ К; $t_{кр}=1723$ К (t_{ϕ} – температура формы; $t_{зал}$ – температура заливки; $t_{кр}$ – температура кристаллизации).

Граничные условия учитывают плотный контакт на границах раздела сред 1 – 6:

$$\lambda_i \frac{dt_i(r_i, \tau)}{dx} = \lambda_{i+1} \frac{dt_{i+1}(r_i, \tau)}{dx};$$

$$t_i(r_i, \tau) = t_{i+1}(r_i, \tau),$$
(3.19)

где λ_i – коэффициент теплопроводности.

Из соображений симметрии на оси плоского стержня задается условие

$$\frac{dt_5(r_5, \tau)}{dx} = 0$$
(3.20)

На достаточно большом расстоянии r_3 (рис. 3.12) от отливки окружающая среда за время снятия перегрева металла не успевает прогреться, потому

$$t_1(x, 0) = 293 \text{ К}; \quad \frac{dt_1(0, \tau)}{dx} = 0.$$
(3.21)

Для численного расчета среды 1 – 6 разбивали на конечные интервалы Δx_i , различные для каждой среды. При этом последовательно решали разностные уравнения, аппроксимирующие дифференциальное уравнение Фурье и его краевые условия.

В общем виде система уравнений при равномерной разбивке каждой среды на элементы (рис. 3.13) имеет вид:

$$T_m^{n+1} = A_i(T_{m-1}^n + T_{m+1}^n) + (1 - 2A_i)T_m^n,$$
(3.22)

где T_m^n – температура m -го элемента в n -й момент времени;

n – индекс строки;

m – индекс столбца;

$A_i = \frac{\Delta\tau\alpha_i}{\Delta x_i^2}$ – параметр, определяющий устойчивость вычислительного процесса;

$\Delta\tau$ – шаг по времени;

α_i – температуропроводность соответствующих сред.

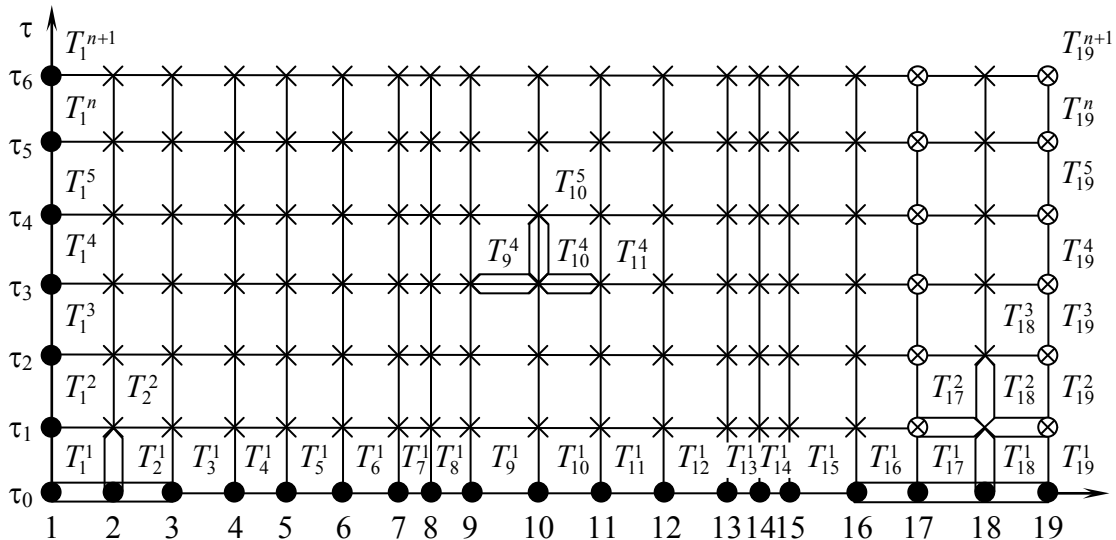


Рис. 3.13. Конечно-разностная схема расчета температурных полей

Температуру на границах раздела сред определяли на основе граничных условий (см. формулу (3.19) для λ_i и t_i) по формуле, полученной из условия баланса теплоты для соответствующих элементов (рис. 3.13):

$$T_m^{n+1} = B_j(T_{m-1}^n + C_j T_{m+1}^n) + (1 - D_j)T_m^n, \quad (3.23)$$

где j – индекс границы среды;

$$B_j = \frac{2\lambda_j \alpha_j \alpha_{j+1} \Delta\tau}{\lambda_j \alpha_{j+1} \Delta x_j^2 + \lambda_{j+1} \alpha_j \Delta x_j \Delta x_{j+1}};$$

$$D_j = \frac{2\lambda_j \alpha_j \alpha_{j+1} \Delta\tau}{\lambda_j \alpha_{j+1} \Delta x_j^2 + \lambda_{j+1} \alpha_j \Delta x_j \Delta x_{j+1}} + \frac{2\lambda_{j+1} \alpha_j \alpha_{j+1} \Delta\tau}{\lambda_j \alpha_{j+1} \Delta x_j \Delta x_{j+1} + \lambda_{j+1} \alpha_j \Delta x_{j+1}^2};$$

$$C_j = \frac{\lambda_{j+1} \Delta x_j}{\lambda_j \Delta x_{j+1}};$$

$$\Delta\tau = \frac{\Delta x_{\min}^2}{\alpha_{\min} l^*};$$

α_{\min} – температуропроводность среды, для которой принят минимальный шаг Δx_{\min} ;

l^* – число, определяющее устойчивость вычислительного процесса.

Уравнения для T_m^{n+1} являются алгоритмом при решении задачи, который был реализован на ЭВМ последовательным расчетом температур в точках, соответствующих центрам элементов Δx_i , через равные промежутки времени $\Delta\tau$.

Все исходные данные и результаты вычислений представлялись в безразмерной форме, при этом в качестве масштабов использовано отношение температуры контакта T_k на границе защитная оболочка — стержень к температуре плавления $T_{пл}$ хлористого натрия и отношение толщины r стенки отливки к толщине δ защитной оболочки.

На рис. 3.14 показано влияние параметра r/δ на отношение $T_k/T_{пл}$ в различные промежутки времени с момента заливки стали 2Х13Л в формы по выплавляемым моделям для стержня толщиной 7 мм. Если за 0,1 с максимальная температура прогрева границы составляла 0,7 от $T_{пл}$ (кривая 1), то за 0,5 с температура возросла до 0,93 от $T_{пл}$, а через 5 с она становилась равной 1,03 от $T_{пл}$ соли (кривые 2 и 3, соответственно). С увеличением времени до 10 с (кривая 6) температура прогрева стержня снижается. Сопоставление данных численного расчета прогрева защитной оболочки (кривая 6) с экспериментальными данными (кривая 4) подтверждает достаточно высокую точность вычислительной схемы. С уменьшением толщины стержня от 7 до 3 мм (кривая 5) резко повышается температура контакта, при которой создается опасность расплавления стержня ($1,18 \cdot T_{пл}$). Поэтому, если в данном случае по конструктивным соображениям нельзя изменить отношение r/δ (принимали по приведенной таблице), необходимо снижать температуру заливки металла, либо изменять теплофизические характеристики защитной оболочки. В данном случае при использовании в качестве защитной оболочки Ni,

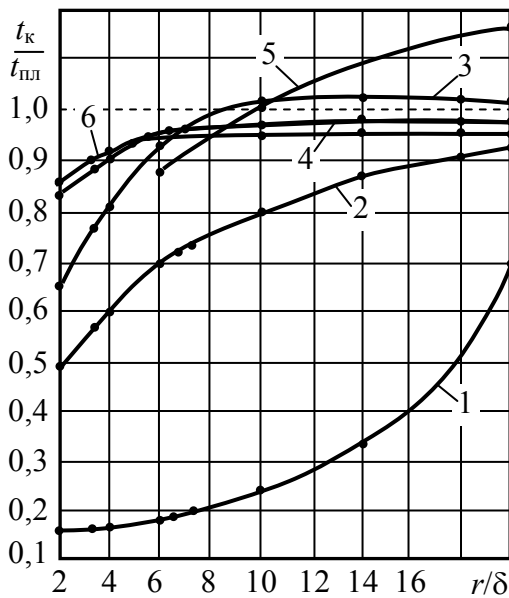


Рис. 3.14. Влияние параметра r/δ на температуру контакта защитная оболочка-солекерамический стержень в различные моменты времени: 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 5; 4 – 10 с (данные эксперимента); 5 – 5 с, стержень толщиной 1,5 мм; 6 – 10 с (данные расчета)

для стержня толщиной 7 мм. Если за 0,1 с максимальная температура прогрева границы составляла 0,7 от $T_{пл}$ (кривая 1), то за 0,5 с температура возросла до 0,93 от $T_{пл}$, а через 5 с она становилась равной 1,03 от $T_{пл}$ соли (кривые 2 и 3, соответственно). С увеличением времени до 10 с (кривая 6) температура прогрева стержня снижается. Сопоставление данных численного расчета прогрева защитной оболочки (кривая 6) с экспериментальными данными (кривая 4) подтверждает достаточно высокую точность вычислительной схемы. С уменьшением толщины стержня от 7 до 3 мм (кривая 5) резко повышается температура контакта, при которой создается опасность расплавления стержня ($1,18 \cdot T_{пл}$). Поэтому, если в данном случае по конструктивным соображениям нельзя изменить отношение r/δ (принимали по приведенной таблице), необходимо снижать температуру заливки металла, либо изменять теплофизические характеристики защитной оболочки. В данном случае при использовании в качестве защитной оболочки Ni,

напыленного на установке плазменного напыления, теплофизические характеристики изменяли, управляя пористостью плазменного покрытия.

При получении качественных отливок с использованием теплофизической защиты солекерамики необходимо иметь прочное соединение отливки с защитной оболочкой. Процесс соединения при смачивании оболочки жидким металлом обуславливается температурой контакта T_k на границе «жидкий металл – защитная оболочка» и продолжительностью взаимодействия. Поэтому при проведении численного эксперимента была проанализирована температура на границе «жидкий металл – защитная оболочка». Полученные данные сопоставили с результатами металлографических исследований промежуточных зон. Это позволило сделать вывод о том, что качественное соединение отливки с защитной оболочкой достигается при температуре $T_{св} \leq 1173$ К и продолжительности взаимодействия до 1 с. В табл. 3.5 приведены расчетные зависимости температуры на границе «защитная оболочка – металл отливки» от геометрических соотношений системы «отливка – защитная оболочка – стержень» для стали 2Х13Л через 0,5 с после заливки.

Таблица 3.5

Расчетные зависимости температуры на границе «защитная оболочка – металл отливки» от геометрических соотношений системы «отливка – защитная оболочка – стержень»

Стенки отливки r	Толщина, мм		r/δ	T'_k	$T'_k/T_{св}$	Свариваемость (данные эксперимента)
	Защитной оболочки δ	Стержня Δ				
1	0,5	3	2	853	0,64	Отсутствует
1	0,3	3	4	953	0,75	Отсутствует
2	0,5	7	4	953	0,75	Отсутствует
3	0,5	7	6	1173	1	Хорошая
3	0,5	3	6	1273	1,11	Хорошая
1	0,15	7	7	1053	0,87	Частичная
2	0,3	7	7	1123	0,94	Хорошая
3	0,3	7	10	1308	1,15	Хорошая
3	0,3	3	10	1353	1,2	Хорошая
2	0,15	7	14	1263	1,1	Хорошая
3	0,15	3	20	1433	1,28	Прожоги защитной оболочки
3	0,15	7	20	1373	1,22	Хорошая

В результате сравнения экспериментальных и расчетных данных построили номограмму, показывающую зависимость температур контакта «металл — защитная оболочка» $T'_k/T_{св}$ и контакта «защитная оболочка – стержень» $T_k/T_{пл}$ для различного отношения r/δ в отливках из стали 2Х13Л и стержне толщиной 7 мм. Задавая различное отношение r/δ , можно определить температуру нагрева стержня при заливке. Основная задача номограммы – установление области свариваемости для отливок с различной толщиной стенки: Задавая соответствующие конструктивные и технологические параметры, по номограмме можно определить условия получения качественных тонкополостных отливок.

3.2.8. Физико-механические свойства солекерамики

Одним из основных направлений развития современного литейного производства является повышение геометрической точности отливок. Это направление способствует всемерному развитию конструкторских разработок, позволяющих создавать компакт-

ные узлы и агрегаты. Многие детали узлов и агрегатов такого рода имеют тонкие полости, которые характеризуются следующими параметрами: отношение минимального размера в сечении полости к ее длине не менее 1:50, отношение к толщине стенки отливки – 1:1; абсолютные размеры полостей 0,6...3 мм. Получение литых заготовок с такими полостями затруднено, поскольку применение керамических стержней из оксидных составов наряду с известными преимуществами создает трудности в технологическом процессе: разброс огневой усадки, коробление стержней, нестабильность прочностных характеристик, сложность проводимого в щелочных средах удаления стержней из отливок. Последний недостаток особенно ощутим для алюминиевых сплавов, которые подвергать выщелачиванию нельзя.

Стержни для получения тонких полостей должны иметь следующие свойства: стабильность конфигурации при температуре заливки жидким металлом; высокую механическую прочность; химическую инертность материала по отношению к заливаемому металлу; низкую (до 20 мкм) шероховатость поверхности; способность к выплавлению (растворению) в неагрессивной среде.

Этот комплекс требований обеспечивается при применении солекерамических стержней на основе поваренной соли.

Солкерамика отличается от керамики на основе оксидов механизмом стабилизации суспензии. Поскольку порошок соли и органические составляющие имеют различную плотность, стабилизация их достигается введением в суспензию поверхностно-активных веществ типа жирных кислот. При этом жирная кислота взаимодействует своей полярной группой с поверхностными атомами огнеупорных частиц и образует химические соединения. Рентгеноструктурный анализ суспензий по методу Дебая-Шеррера показал наличие соединения Na(COON). Сравнение дебаграммы суспензии, стабилизированной стеарином (рис. 3.15, *a*), с дебаграммой суспензии, стабилизированной полиэтиленом (рис. 3.15, *б*), увеличивающим вязкость органической среды, показывает изменение постоянной решетки $\Delta\alpha$ вследствие образования химического соединения.

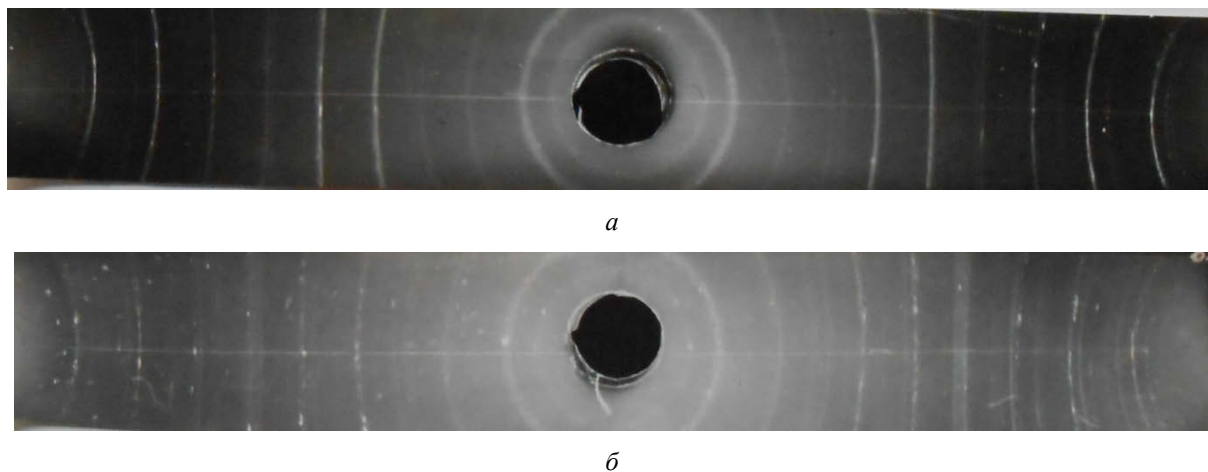


Рис. 3.15. Дебаграммы суспензий: *a* – стабилизированной стеарином; *б* – стабилизированной полиэтиленом

Эта особенность определяет порядок смешивания компонентов при изготовлении суспензии: в подогретый до 70...80 °С порошок соли вводится стеарин, после тщательного перемешивания в течение 30 мин в композицию добавляется расплавленный парафин. Наличие химических связей органики с солью положительно влияет на технологические свойства суспензии и качество стержней в целом. Особенно заметно возрастает

Таблица 3.6

Линейная усадка стержней-сырцов от содержания органики в суспензиях *

Номер состава	Содержание органики в суспензиях, вес. %	Линейная усадка стержней-сырцов, %
1	Стеарин – 2 Парафин – 16	0,42...0,63
2	Парафин – 17,55 Полиэтилен – 0,45	0,51...0,57
3	Парафин – 17,1 Полиэтилен – 0,9	0,62...0,87
4	Парафин – 16,65 Полиэтилен – 1,35	0,87...0,91
5	Парафин – 16,2 Полиэтилен – 1,8	0,95...0,98
6	Парафин – 16 Полиэтилен – 2	1,02...1,10

ет (на 25 % по сравнению с полиэтиленовой) текучесть, позволяющая заполнять пресс-форму самой сложной конфигурации. Кроме того, химические связи уменьшают расслоение суспензий на 10...15 %. Выбор исходных материалов для изготовления суспензии обоснован необходимостью удаления стержней из отливок в воде (поваренная соль), обеспечения седиментационной устойчивости суспензии (стеарин), пластичности суспензии при запрессовке сложных по геометрии пресс-форм (парафин) и стабилизации огневой усадки (Al_2O_3).

Применение стеарина дает еще и то преимущество, что усадка стеарино-парафиновых композиций меньше, чем парафино-полиэтиленовых (табл. 3.6). Минимальная усадка стержней-сырцов состава № 1 способствует повышению геометрической точности отливок.

Температура спекания солекерамических стержней равна 720...730 °С (0,8...0,9 от температуры плавления). Близость температуры спекания к температуре плавления обуславливает интенсивное развитие диффузионных процессов, проходящих с изменением формы и размеров изделия. Поэтому огневая усадка стержней находится в значительных пределах и нестабильна. Путем подбора гранулометрического состава соли фракций: 10...20 мкм – 20 %, 20...50 мкм – 30 %, 50...70 мкм – 50 % удалось снизить усадку стержней, однако и это оказалось недостаточным. Дальнейшее снижение абсолютной величины и стабилизации усадки достигалось введением в состав суспензии мелкодисперсных порошков, инертных по отношению к основному огнеупорному материалу.

Механизм воздействия стабилизатора на огневую усадку заключается в том, что присутствие частиц другой фазы препятствует росту зерен, так как при движении межфазной границы поверхность частицы становится частью поверхности границы. Увеличение поверхности границы требует дополнительной энергии. Поэтому, когда при движении граница оказывается рядом с включением, оно образует в ней «ямочки», причем поверхность продолжает движение в другом месте до тех пор, пока не появится возможность обойти эту примесь.

Если число включений около границ становится значительным, то даже сильная кривизна границ не способна осуществить дальнейшее ее перемещение. Поэтому существует связь между числом и размерами включений и минимальной кривизной, необходимой для роста зерен. Уравнение, связывающее эти параметры, имеет вид:

$$\frac{R}{r} = \frac{3}{4f}, \tag{3.24}$$

где R – суммарный радиус кривизны зерна;
 r – радиус сферических включений;
 f – объемная доля присутствующих включений.

* во всех суспензиях содержится 77 вес. % поваренной соли и 5 вес. % оксида алюминия

В качестве стабилизатора применялась $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с размерами зерен до 10 мкм. Результаты исследований размеров огневой усадки ε стержней на основе поваренной соли приведены на рис. 3.16.

Диффузионные процессы, протекающие при спекании стержней, влияют на их прочностные характеристики. Экспериментально было установлено, что основными факторами, влияющие на прочность солекерамики, являются: температура обжига, количество органики, добавки Al_2O_3 , конечный размер зерен керамики.



Рис. 3.16. Огневая усадка ε солекерамических стержней при температуре обжига 730 °С: а – без стабилизирующих добавок; б – с Al_2O_3 (содержание органики 15 %)

При увеличении количества органики (парафина) предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$ резко падает (рис. 3.17) и при содержании органики 19 % достигает 2,6 МПа. Для применения стержней при температурах заливки такая прочность недостаточна, поэтому количество твердой фазы в суспензии должно быть максимальным. Снижение температуры обжига с 730 до 710 °С также уменьшает прочность, что объясняется неполным протеканием диффузионных процессов. Необходимо отметить, что введение в суспензию оксида алюминия для стабилизации усадки также приводит к резкому падению прочности (рис. 3.18). Поэтому в тех случаях, когда по технологическим причинам нижний предел прочности ограничен 2,9 МПа, следует вводить оксид алюминия в количестве, удовлетворяющем как требованиям прочности, так и обеспечения минимальной усадки.



Рис. 3.17. Зависимость прочности солекерамики от количества органики при температурах обжига 730 (1) и 710 °С (2)

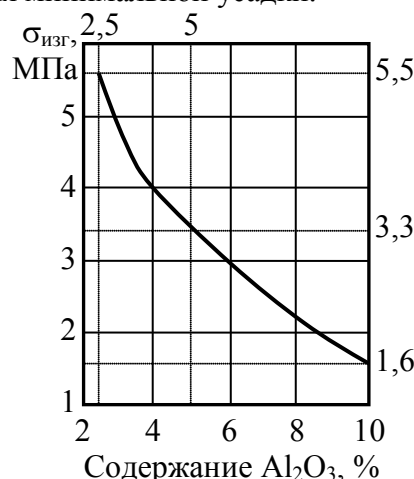


Рис. 3.18. Зависимость прочности солекерамики от содержания оксида алюминия

При спекании солекерамики в результате рекристаллизации изменяются ее механические свойства. Крупнозернистая керамика имеет более высокие показатели прочности, чем мелкозернистая (рис. 3.19). При исследовании зависимости прочности стержней от их гранулометрии состав суспензий оставался строго постоянным, изменялся только размер зерен поваренной соли, вводимой в суспензию. Максимальный размер зерна (80...90 мкм) после обжига получали, когда спекали огнеупорный порошок прерывистой гранулометрии. Повышение прочности солекерамики в этом случае можно объяснить тем, что у мелкозернистой керамики (10 мкм) излом идет по границам зерен, тогда как крупное зерно (выше 40 мкм) ломается по толщине, при этом растет энергия излома и, следовательно, прочность.

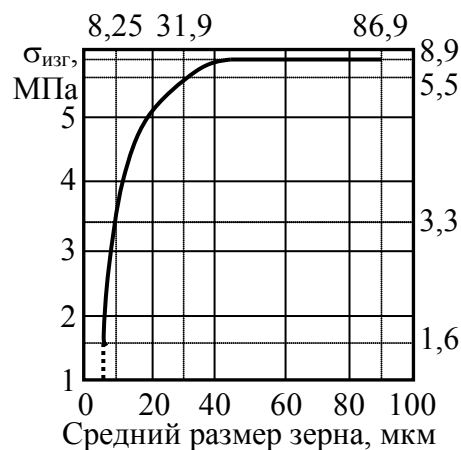


Рис. 3.19. Зависимость прочности солекерамики от размера ее зерна

Относительное удлинение солекерамики влияет как на размерную точность отливок, так и на термостойкость стержней, поскольку тепловые напряжения, возникающие в материале стержня, зависят от коэффициента линейного расширения. Измеренное на дифференциальном dilatометре относительное удлинение солекерамики составило 2,95 % при температуре 700 °С. Эта величина является чрезмерно высокой и проявляется в растрескивании стержней при заливке их жидким металлом. Введение в состав стержней 10 % оксида алюминия позволяет снизить относительное удлинение стержней до 1,78 % и исключить растрескивания стержней при заливке. Величину относительного удлинения стержней особенно тщательно нужно выбирать при использовании их в литье по выплавляемым моделям. Если же по тем или иным причинам не удастся получить равными относительное удлинение стержней и оболочки, необходимо знаки стержней делать «плавающими» во избежание появления трещин оболочки либо стержней.

Термостойкость стержней исследовали при циклическом нагреве – охлаждении цилиндров диаметром 50, высотой 75 и толщиной стенки 3 мм. Цикл испытаний заключался в нагреве стержней до температуры 720 °С в течение 1 мин и охлаждении на воздухе в течение 1 мин. Термостойкость оценивали по количеству циклов до появления первой трещины. Испытания показали, что стержни выдерживают два-три цикла, что свидетельствует об их достаточной термостойкости для получения качественной отливки.

Термомеханические характеристики солекерамики выгодно отличаются от характеристик оксидных составов, применяемых в настоящее время в производстве. Размягчение стержней из поваренной соли, а следовательно, изменение геометрии, начинается с 720...750 °С, т.е. выше температуры заливки сплавом. Этот фактор оказывает положительное влияние на повышение геометрической точности отливок.

В результате исследований солекерамических стержней оптимальным следует считать состав, вес. %: оксид алюминия – 4...8, стеарин – 2,0...2,5, парафин – 12...16, поваренная соль – остальное. Такой состав позволяет сочетать низкую огнеую усадку стержней, достаточную механическую прочность, высокие термомеханические характеристики и термостойкость. Оптимальный гранулометрический состав поваренной соли следующий, %: фракции 10...20 мкм – 20, фракции 20...50 мкм – 30, фракции 50...70 мкм – 50. Температура обжига стержней 725...730 °С.

3.2.9. Особенности технологии изготовления солекерамических стержней

В практике производства отливок из легких сплавов не решен вопрос удаления стержней из узких, сложных полостей, требующих высокой чистоты поверхности. Характерные представители таких отливок – закрытые лопастные колеса с радиально расположенными лопастями. Геометрия этих колес настолько сложна, что затрудняет или полностью исключает механическую обработку. К этой же категории относятся литые детали из алюминиевых сплавов, работающие при повышенных температурах и ударно-циклических нагрузках. В связи с тем, что за последние годы нагрузка на поршни двигателей внутреннего сгорания увеличилась в отдельных случаях в четыре раза, возникает опасность их прогара. Если же снизить температуру поршня на 30 °С, стойкость его возрастает в десять раз. Снизить температуру и напряжения за счет изменения конструкции поршня очень сложно, поэтому предпринимают меры для его искусственного охлаждения, например предусматривают в поршне литые каналы, охлаждаемые маслом.

Отливки поршня с такими каналами получают прогрессивными способами – литьем под давлением, литьем в кокиль и др. Для формирования внутренних полостей отливок необходимо применять стержни, стабильные по размерам и конфигурации при температуре заливки, имеющие высокую механическую прочность для создания достаточного сопротивления давлению жидкого металла, не взаимодействующие с жидким металлом, с малой шероховатостью поверхности (5-го, 6-го и 7-го классов по ГОСТ 2789-95), а также стержни, которые могут частично разупрочняться или полностью растворяться в неагрессивных средах при удалении из отливки.

Известные способы изготовления стержней в большинстве случаев не удовлетворяют этим требованиям. Стержни из песчаных смесей на смоляных связующих обладают низкой механической прочностью в тонких сечениях и повышенной газотворностью. Кроме того, получение полостей при помощи песчаных стержней невозможно, так как нельзя полностью удалить остатки стержневой смеси из карманов отливки.

Стержни, получаемые плавлением и заливкой в подогретые стержневые ящики, имеют шероховатую поверхность (3-й и 4-й классы) и способствуют появлению газовых раковин в отливках.

Решение задачи получения сложных полостей в отливках с высокой чистотой поверхности стало возможным при использовании солекерамических стержней.

В качестве огнеупорного материала для этих стержней применяют поваренную соль промышленной чистоты. Стержни изготавливают по технологии твердофазного спекания, включающей следующие операции: помол и просеивание огнеупорного порошка, приготовление пасты, прессование и обжиг стержней. Вначале для размола соли применяли фарфоровые шары диаметром 25...40 мм общей массой 2 кг, соль не подогревали. Однако в процессе размола соль налипала на стенки мельницы, что увеличивало время помола. Подогрев соли до 60...70 °С не дал ощутимых результатов, время помола было велико – 70...80 ч.

Замена фарфоровых шаров стальными диаметром 15 мм, общей массой 10 кг несколько ускорила процесс, но не ликвидировала налипание соли на стенки мельницы. При одновременном нагреве соли и шаров до 200 °С налипание соли на стенки мельницы не происходило и время помола было сокращено. Ситовым анализом установлено, что необходимое технологическое время помола соли – 48 ч (рис. 3.20). При этом соль имеет следующие фракции (табл. 3.7).

Керамическую пасту (суспензию), состоящую из тонкомолотой соли и пластификатора со стабилизатором, приготовляли в бегунах с подогревом. Для этого лаборатор-

ные бегуны модели 017 оборудовали водоподогреваемым кожухом со спиральми мощностью 3 кВт. В качестве пластификатора применяли парафин, в качестве стабилизатора – стеарин, создающий химическую связь между зернами огнеупора и аполярным углеводородом – парафином. Состав пасты, вес. %: соляной наполнитель – 87, парафин – 11, стеарин – 2.

Таблица 3.7

Фракционный состав поваренной соли после помола в течении 48 ч

Размер ячейки сит, мм	Остаток на сите, %
2,5	–
1,6	–
1	–
0,63	0,11
0,4	0,15
0,315	0,34
0,25	0,65
0,16	3,09
0,1	3
0,063	17,7
0,05	28,8
Газик	4,62

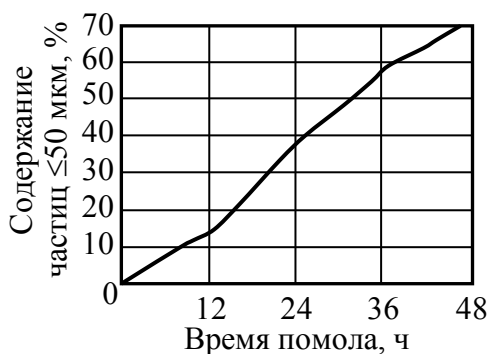


Рис. 3.20. Зависимость количества фракций размерами ≤50 мкм от времени помола

Перед приготовлением пасты кожух бегунов разогревали в течение 1 ч до температуры 60...70 °С. Затем загружали предварительно просушенную соляную пудру и перемешивали в течение 10 мин, вводили стеарин и смесь перемешивали еще в течение 30 мин для качественного обволакивания зерен огнеупора, после чего заливали расплавленный парафин, перемешивали в течение 20 мин и готовую пасту выгружали из бегунов. Общее время приготовления пасты 50...60 мин. Готовая паста может храниться неограниченное время.

Стержни прессовали в пресс-формах на гидравлическом прессе с усилием 0,1...0,15 МПа при помощи специального стакана с электроподогревом (рис. 3.21). Температуру нагрева паст регулировали автотрансформатором.

При изготовлении стержней-сырцов изучали следующие параметры: температуру пасты, температуру пресс-формы, давление, скорость заполнения пресс-формы пастой, время выдержки пасты в пресс-форме. В зависимости от температуры пасты изменяются ее текучесть, усадка при охлаждении, т. е. основные свойства, определяющие ход процесса прессования.

Практика изготовления стержней показала, что запрессовывать пасту обычного состава (на парафино-стеариновой связке) следует при температуре не более 70...80 °С; при повышении ее до 90...100 °С интенсивно выгорают органиче-

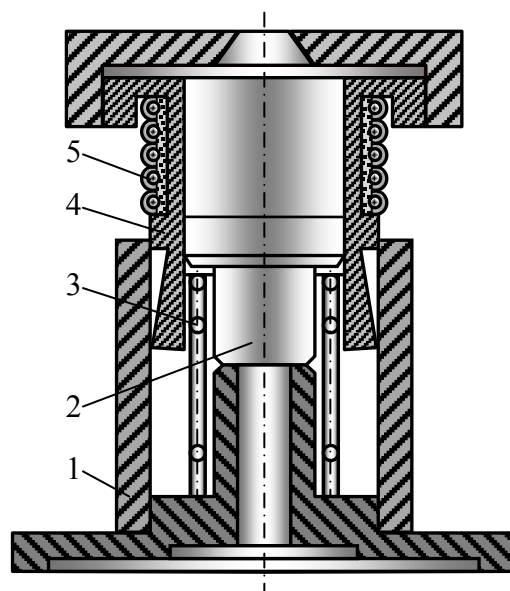


Рис. 3.21. Стакан с электроподогревом для запрессовки стержней: 1 – корпус; 2 – шток поршня; 3 – пружина; 4 – внутренний цилиндр; 5 – нагреватель

ские составляющие и снижается качество стержня-сырца за счет увеличения усадочных пороков на его поверхности. Интервал температур 70...80 °С пригоден для изготовления стержней толщиной 5...6 мм, шириной 100 мм и длиной 160 мм.

При запрессовке стержней толщиной не менее 10 мм во избежание появления усадочных дефектов необходимо снижать температуру пасты до 60 °С. Значение температуры пресс-формы как параметра режима прессования заключается в том, что она определяет изменение скорости охлаждения пасты. Опытным путем установлено, что качество стержня-сырца повышается при снижении температуры пресс-формы. Повышение температуры до 50 °С приводит к уменьшению скорости затвердевания пасты и снижению производительности. Кроме того, появляются усадочные пороки.

Однако при прессовании тонких (1...2 мм) стержней и стержней сложной конфигурации низкая температура пресс-формы может привести к недоливам вследствие большой скорости охлаждения пасты, а также к трещинам, возникающим вследствие переохлаждения стержня-сырца, усадке которого противодействуют элементы пресс-формы. Поэтому температура пресс-формы должна выбираться наиболее низкой, но с учетом конфигурации и размеров стержней. Оптимальной температурой пресс-форм является интервал 20...35 °С для стержней толщиной до 5 мм и 10...20 °С – свыше 5 мм.

В зависимости от величины давления изменяются скорость заполнения пресс-формы, интенсивность компенсации усадочных явлений и условия затвердевания стержня. Для получения стержней с достаточной прочностью необязательно наличие большого давления (0,3...0,5 МПа) – достаточно ручного или пневматического пресса с развиваемым давлением около 0,1 МПа. Скорость заполнения пресс-формы пастой как параметр прессования определяет возможность качественного заполнения полости (без недоливов, неслитин и подобных дефектов). Большая скорость заполнения приводила к тому, что в наиболее удаленных местах пресс-формы регулярно образовывались трещины или неслитины. В результате экспериментов выяснилось, что необходимо снизить скорость заполнения пресс-формы, чтобы воздух успевал выйти из полости пресс-формы и не образовывал воздушной подушки, препятствующей плотному соединению пасты.

Время выдержки при прессовании, определяющее производительность процесса и в какой-то мере влияющее на качество стержня-сырца, является величиной, зависящей от текучести пасты, температурного режима прессования и размеров стержня. Время выдержки должно быть достаточным для затвердевания всего объема стержня. Практически при соблюдении температурного режима прессования стержень-сырец толщиной 5...6 мм затвердевает за 30 с.

При тепловой обработке стержней удаляется органическая связка и спекается огнеупорный порошок. Удаление связки, которое может быть частичным или полным, осуществляется в засыпке стержня адсорбентом (оксид алюминия). При полном удалении связки выжигание органических компонентов происходит почти до температур начала спекания, при частичном процессе заканчивается при относительно низкой температуре (150...250 °С), при этом в полуфабрикате остается некоторое количество связки, обеспечивающее достаточную механическую прочность полуфабриката и не приводящее к его деформации.

Связка удаляется за счет миграции в засыпку адсорбента в жидком состоянии и за счет испарения. В зависимости от температуры нагрева, свойств пасты и порошка засыпка изменяет значение каждого из этих способов. Таким образом, механизм удаления связки можно представить в следующем виде: разогрев полуфабриката и расширение его в твердом состоянии; переход из твердого в жидкое состояние, миграция связки в жидком состоянии; переход связки из жидкого состояния в газообразное; нагрев и выгорание

остатков связки, дальнейший нагрев и начало спекания частиц порошка в точках контакта, сопровождаемого уменьшением объема полуфабриката (усадкой).

В зависимости от толщины стержня и скорости нагрева в различных его местах будут происходить различные явления. При этом могут происходить одновременно все этапы удаления связки, поэтому очень большая скорость нагрева при обжиге нежелательна, но она может быть тем выше, чем тоньше полуфабрикат. Опасными моментами являются переходы из твердого в жидкое состояние и из жидкого в газообразное. При больших температурах следует давать выдержку для равномерного прогрева всего изделия.

На рис. 3.22 приведен график обжига солекерамики для стержней сложной конфигурации. Обжиг стержней проводили в электропечи сопротивления СНЗ с регулированием температуры потенциометром КСП-3П. При обжиге главным требованием являлось обеспечение в рабочем пространстве печи квазистационарного режима нагрева. Практически это достигалось за счет того, что в течение всего времени обжига скорость возрастания температуры поддерживалась постоянной за счет автоматического регулирования мощности печного трансформатора. Для обжига стержни укладывали в шамотные короба и засыпали слоем оксида алюминия толщиной 30...40 мм.

Исследование процесса обжига показало наличие зависимости прочностных характеристик стержней от количества органической связки и температуры обжига. Экспериментально установлено, что при повышении температуры обжига прочность стержней возрастает (рис. 3.23). Повышение температуры обжига выше 725 °С, несмотря на рост прочности, приводит к резкому увеличению усадки стержней, что отрицательно влияет на геометрическую точность отливок. Установлено также, что увеличение органических составляющих в пасте с 13 до 19 % приводит к снижению прочности за счет повышения пористости обожженных стержней. Вводить в пасту органические составляющие в количестве менее 13 % не рекомендуется, так как в этом случае снижаются ее текучесть и способность заполнять полость сложной пресс-формы.

Резкое падение прочности на изгиб (рис. 3.24, а) при температурах 730 °С и выше свидетельствует об образовании микротрещин во всем объеме стержня. Плавное падение прочности на сжатие при повышении температуры испытания (рис. 3.24, б) стержней не приводит к их поломке при заливке сплавом АЛ2. Отливки опытной партии, полость которых получена солекерамическими стержнями (рис. 3.25), не имели брака, вызываемого поломкой стержней.

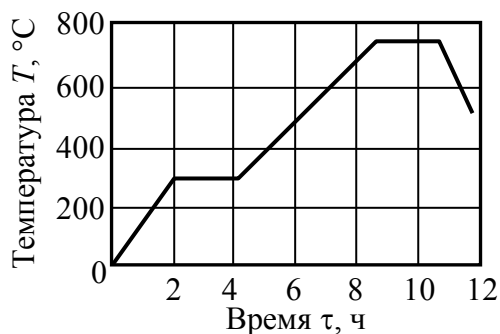


Рис. 3.22. График обжига солекерамики для стержней сложной конфигурации



Рис. 3.23. Зависимость прочности стержней от температуры обжига (1 – 725; 2 – 650 и 3 – 550 °С) и содержания органических составляющих

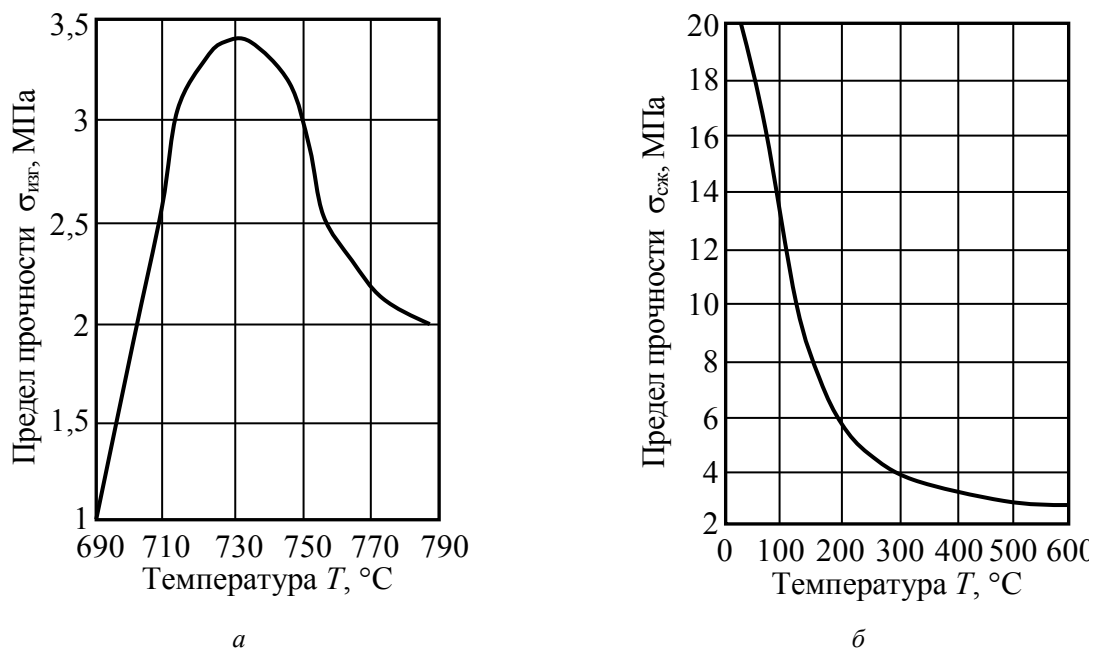


Рис. 3.24. Зависимость прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ (а) и при сжатии $\sigma_{сж}$ (б) от температуры обжига

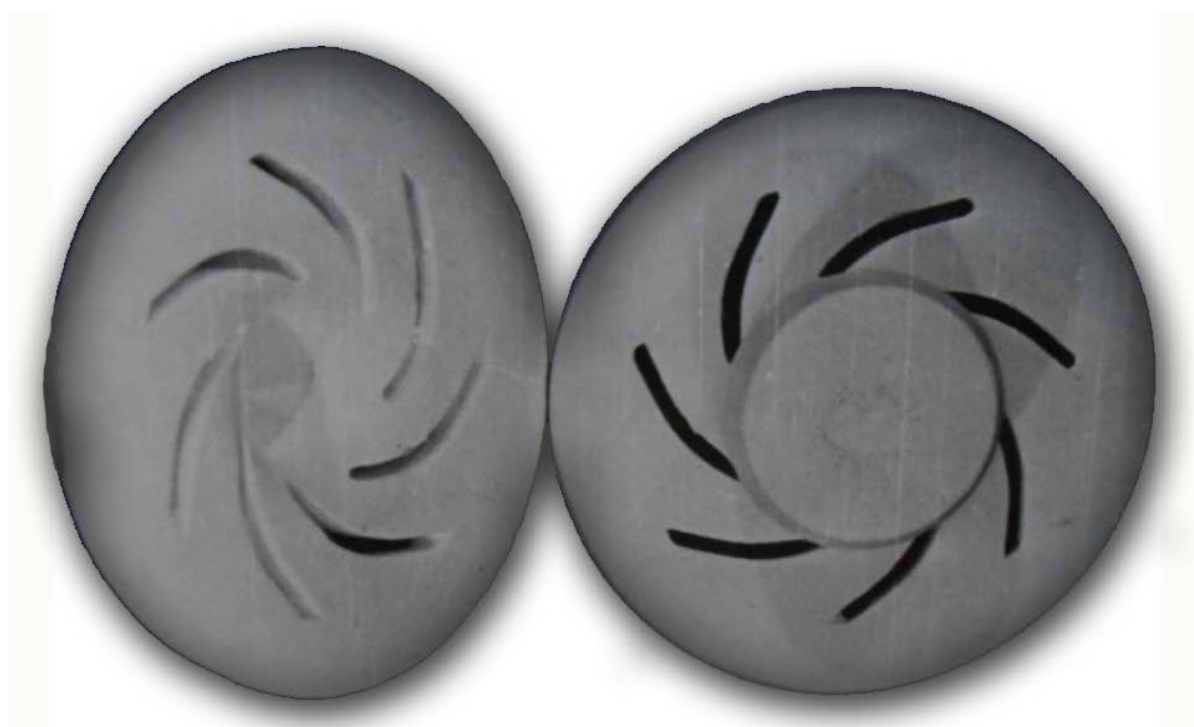


Рис. 3.25. Солекерамические стержни для лопастных колес

На рис. 3.26 показаны отливки из сплава АЛ2, полученные по разработанной технологии, которая предусматривает как применение цельных стержней, так и стержней, собранных из отдельных элементов.

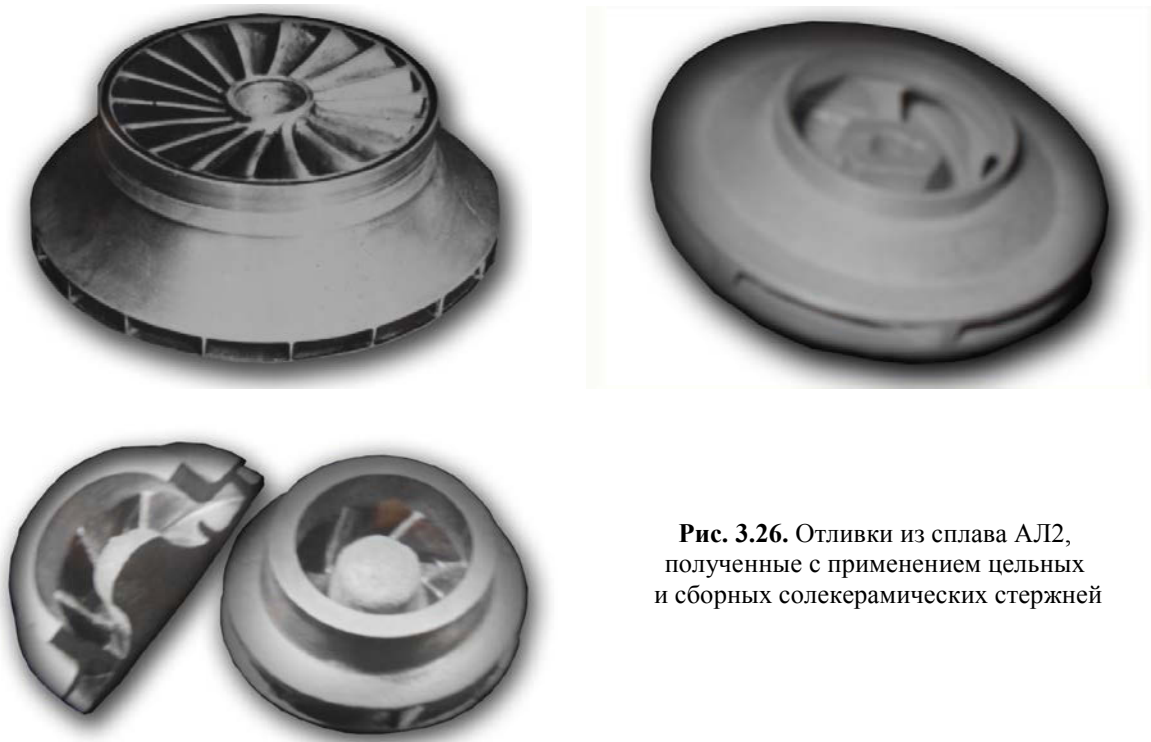


Рис. 3.26. Отливки из сплава АЛ2, полученные с применением цельных и сборных солекерамических стержней

Профилограмма полости отливки, образованной солекерамическим стержнем, приведена на рис. 3.27 (6-го и 7-го классов по ГОСТ 2789-95).

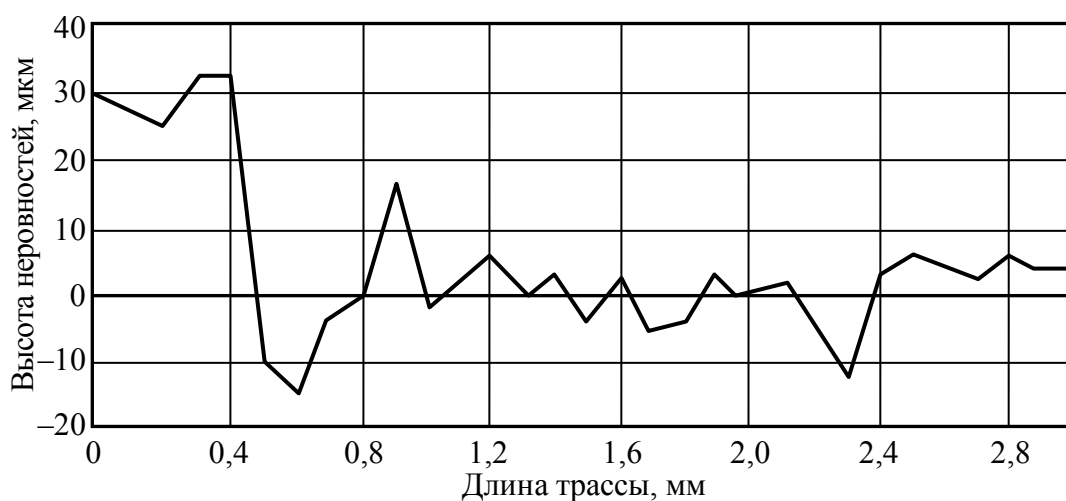


Рис. 3.27. Профилограмма полости отливки, образованной солекерамическим стержнем

Стержни удаляются в проточной холодной воде за 8...15 мин. Применение регенерации раствора для повторного использования поваренной соли повышает технико-экономические показатели процесса.

3.2.10. О применении легкоудаляемых стержней для тонкополостных отливок

В машиностроении значительное место занимают точные отливки с тонкими внутренними полостями – пустотелые лопатки турбин, лопастные колеса со сложными проточными полостями, клапанные плиты и др. При этом размеры полостей (в свету) составляют иногда десятые доли мм при толщине стенки 0,6...1 мм и протяженности полостей до нескольких десятков мм. Так как особую трудность представляет получение тонких полостей в литом исполнении, до недавнего времени их получали механической обработкой.

Литье тонкополостных отливок стало возможным в результате использования спекаемых керамических стержней, которые должны обладать следующими свойствами: высокой точностью и стабильностью геометрии как после обжига, так и при заливке форм, так как даже небольшое коробление стержня приводит к недопустимому изменению толщин стенок отливки; высокими механическими свойствами в широком температурном интервале, обеспечивающими прочность ажурных стержней как в процессе изготовления форм, так и во время заливки; высокой термостойкостью, предотвращающей разрушение при термическом ударе во время заливки; химической инертностью материала стержней к заливаемому металлу; низкой шероховатостью поверхности стержней (≤ 20 мкм).

Все эти требования, хотя и с большими трудностями (значительный разброс огневой усадки, коробление стержней, нестабильность прочностных характеристик), могут быть все же обеспечены при получении стержней, например, твердофазным спеканием из оксидов Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 как в чистом виде, так и в различных комбинациях.

Однако удаление таких стержней из отливок (в концентрированных растворах щелочей или фтористых соединений) представляет большую сложность. Процесс интенсифицируется ультразвуком, использованием автоклавов, циклами давление – разрежение. Вымываются остатки стержней струей воды на специальных установках (давление 15 МПа). Длительное выщелачивание (до 10 и более суток) жаропрочных сплавов, содержащих Al и Cr, может привести к снижению предела выносливости.

Ухудшение механических свойств сплавов при воздействии щелочей кроме коррозионного воздействия зависит так же от водородного охрупчивания. Поэтому общим направлением в изыскании материалов для стержней тонкополостных отливок должно быть применение материалов, удаляемых в неагрессивных средах за минимально возможное время.

Одним из перспективных направлений является применение солекерамических стержней, удаляемых в воде, особенно для отливок Al-сплавов (рис. 3.28, а) и сплавов на основе Cu и Fe- $NaAlO_2$ (рис. 3.28, б). Перспективным материалом является также карбид кальция, однако для его применения требуется ряд технологических доработок.



Рис.3.28. Отливки из алюминатанатрия (а) и из сплавов на основе Fe и Ni (б)

Технология получения солекерамики отличается от технологии получения керамики на основе оксидов. Наличие в поваренной соли и в алюминатах Na приводит к взаимодействию его с жирными кислотами. При этом со стеарином образуются мыла.

При изготовлении суспензии необходима следующая технологическая последовательность: в горячий смеситель вводят мелкодисперсный порошок соли, затем его смешивают с жирной кислотой (стеарином) и после этого вводят парафин.

При замене полиэтилена на стеарин (2 % – в качестве стабилизатора) линейная усадка суспензии (NaCl – 82 %; парафин – 16 %) уменьшается с 1,02...1,10 до 0,42...0,63 %.

При изготовлении стержней термопластичные суспензии запрессовывают в металлические формы. Стабильность суспензии под действием давления изучали на центробежной машине ЦУМ-1 по схеме (рис. 3.29) и оценивали по толщине отделившегося слоя органики. Для этого в карманы 2 предварительно нагретого до 150 °С ротора 1 устанавливали пробирки с суспензией 3. Число оборотов ротора 1000...8000 об/мин, время опыта 0,5 ч. При стабилизации суспензий полиэтиленом, увеличивающим вязкость пластификатора, решающим фактором является плотность диспергированной фазы: плавный кварц – 2,2, NaCl – 2,165, NaAlO₂ – 2,65 г/см³. Суспензии, стабилизированные стеарином, более устойчивы по сравнению с оксидными, что повышает текучесть, четкость воспроизведения, увеличивает плотность упаковки и облегчает процесс спекания.

От скорости удаления органики на первой стадии обжига зависит качество стержней – образование трещин, вздутий, расслоений. При обжиге солекерамики потеря связки происходит с меньшей скоростью, чем у оксидной, что можно объяснить химическими связями между органикой и огнеупорным порошком. Так, если суспензия на плавном кварце теряет 80 % связки через 4 ч, то суспензия на основе NaCl теряет то же количество связки за 20 ч, а суспензия на основе NaAlO₂ – за 24 ч. Поэтому режим обжига должен быть «мягким», скорость повышения температуры до 100 °С/ч, выдержка при 300 °С свыше 6 ч.

Удовлетворительные механические свойства солекерамики могут быть получены при температуре, равной 0,8...0,9 температуры плавления, в то время как температура спекания оксидной керамики составляет всего лишь 0,5...0,6 температуры плавления. Спекание солекерамики требует сравнительно узкого температурного интервала, так как в солекерамике при недостаточных температурах обжига (например, для NaCl < 720 °С) не обеспечивается достаточная механическая прочность, а при высоких температурах (> 750 °С) изменяется геометрия и образуются микротрещины, снижающие прочность стержней. Близость температур спекания и плавления приводят к тому, что стержни при нагреве во время прокаливания форм и заливки не размягчаются и сохраняют геометрическую точность.

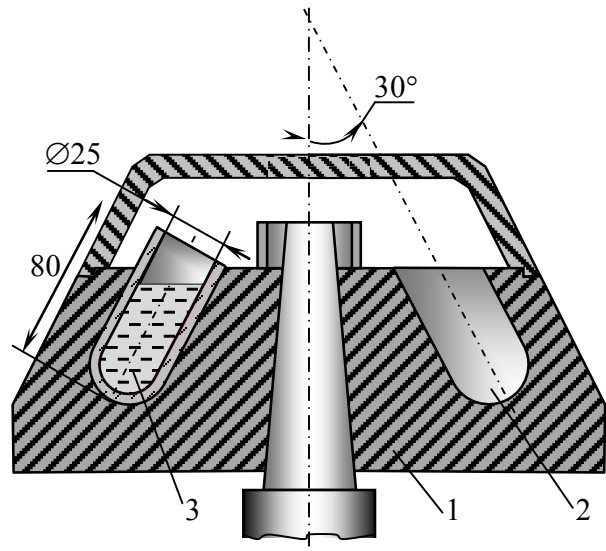


Рис. 3.29. Схема исследования стабильности суспензий на центробежной машине ЦУМ-1 под действием давления

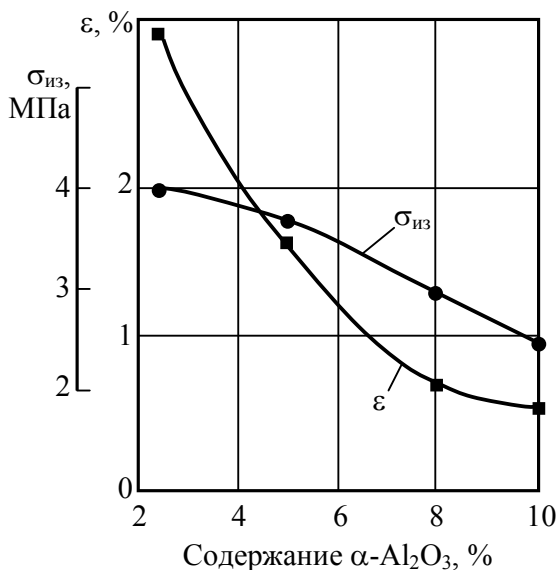


Рис. 3.30. Изменение огневого усадки и прочности стержней в зависимости от содержания $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в суспензии

При одинаковых размерах частиц и времени спекания этот процесс зависит от материала, ширины перемычки между зернами при спекании и вида диффузионного процесса. Формирование перемычки при спекании солекерамики можно представить в следующем виде. При прессовании суспензий органический материал, окружающий зерна огнеупорного наполнителя, может выжиматься так, что частицы контактируют друг с другом и будут упруго деформированы. По мере разогрева материала появляется пластическая деформация, которая для оксидов наступает при относительно низкой температуре (по сравнению с температурой плавления), а для солей – при относительно высокой. В процессе пластической деформации увеличивается площадь контакта, интенсифицируется диффузия и развивается прочность материала (при относительно высокой температуре) – по мере

размягчения соли возможно не только поверхностная, но и объемная диффузия с интенсивной усадкой. Петрографические исследования подтверждают, что пористость оксидной керамики 28...30 %, а солекерамики – 7...8 %, что дает ей важное технологическое преимущество. Оксидная керамика создает воздушное давление на границе «металл – стержень», что приводит к образованию вмятин и раковин на поверхности отливки. Для получения качественной поверхности необходим перепуск металла, либо противодавление (центробежным или иным способом), или заливка в вакууме. Солькерамические стержни не требуют этих технологических дополнений.

Стабилизацию усадки солекерамики и снижение ее абсолютной величины возможно достигнуть введением в суспензию мелкодисперсных огнеупорных порошков, инертных к основному соляному наполнителю (например, для NaCl – это Al_2O_3). Механизм воздействия стабилизатора на огневую усадку заключается в том, что присутствие частиц другой фазы препятствует росту зерен. Изменяя количество этой фазы, можно управлять усадкой стержней. Так, введением в суспензию $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ можно управлять не только величиной огневого усадки ϵ , но и прочностью при изгибе $\sigma_{из}$. Размер зерна $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \approx 10$ мкм при величине зерна NaCl – 50...70 мкм (рис. 3.30).

При размельчении зерен и, следовательно, увеличении удельной поверхности коробление солекерамических стержней уменьшается при прочих равных условиях. Эксперименты показывают, что увеличение удельной поверхности порошка NaAlO_2 от 40 до 180 мм^{-1} снижает коробление до 0,2 мм.

Глава 4

ПОЛУЧЕНИЕ ТОЧНЫХ ОТЛИВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗОВЫХ ПЕСЧАНЫХ ФОРМ

4.1. Управление качеством отливок в песчано-смоляных формах

Повышение качества отливок за счет оптимального управления процессом их охлаждения в песчано-смоляной форме – фундаментальная проблема теории и технологии литейного производства.

Такую проблему можно решить оптимизацией атмосферы таких форм, что приводит также к улучшению экологических условий литья. Как известно, главной причиной возникновения дефектов поверхности отливок типа газовых раковин, пригара и др. является взаимодействие металла отливки с газами в порах литейной формы. Причем, важно не только общее давление газов в форме у поверхности отливки, но и их состав, особенно парциальное давление оксида углерода CO.

Эти параметры зависят от многих причин внутреннего и внешнего по отношению к форме характера, поэтому они не являются постоянными и могут меняться даже в течение одного цикла техпроцесса. Кроме того, при существующих условиях такие параметры, как правило, неблагоприятные с точки зрения получения отливок без поверхностных дефектов. Все это ставит перед специалистами, которые проектируют и поддерживают техпроцесс, потребность в управлении последним за счет внешнего воздействия на базе адекватной модели такого процесса.

В настоящее время отсутствует единая многоцелевая модель, которая могла бы быть положена в основу системы управления процессами тепломассопереноса в песчаных формах. Поэтому исследования и разработка современных компьютерных систем управления процессами взаимодействия отливки и формы на основе схмотехнических моделей тепломассопереноса является актуальной задачей.

Установлено, что значительное количество дефектов отливок является следствием неблагоприятных взаимодействий между металлом отливки и газами, содержащимися в порах формы. Существующие составы литейных смесей для оболочкового литья и параметры процесса приводят к такому составу атмосферы формы (высокое содержание CO), который практически не позволяет получать стальные отливки без дефектов.

В свою очередь, использование внешнего газового действия: наддува или отсасывания может значительно улучшить качество отливок. Для оперативного управления этим процессом необходима многоцелевая модель, которая может учитывать самые разнообразные

условия процесса. Наиболее подходящей к этим целям может стать электрическая модель при условии ее реализации на ЭВМ языком схемотехнической САПР.

В работе использовали песчано-смоляную холодноплакированную смесь кварцевого песка КО1А и связующего ПК-104. Металл для отливок – углеродистую сталь 45Л выплавляли в индукционной печи.

Для измерения температуры в системе «отливка – форма» была изготовлена лабораторная установка, которая позволяла учитывать термическое воздействие внешних газов. Суммарные расходы газов измеряли с помощью трубок Пито.

Химический анализ газов выполняли методами газовой хроматографии, фотоэлектродколориметрии и газоадсорбционной хроматографии.

Для построения и анализа схемотехнической модели процесса тепломассопереноса в системе «отливка – форма» использовали САПР «MICRO-CAP III», реализованную на ПЭВМ.

Процесс теплообмена в системе «отливка – оболочка – опорный слой» рассматривали с учетом двух дополнительных факторов – отвода тепла из-за выноса его отсасываемым газом, и притока тепла из-за экзоэффекта деструкции смоляного связующего. В условиях такого действия уменьшилась скорость охлаждения отливки, что можно объяснить ростом экзоэффекта вследствие повышения окислительного потенциала газовой атмосферы. Таким образом, главным фактором влияния термических условий литья с отсасыванием на качество поверхности отливок является замедление охлаждения отливки. Этот фактор проявляется двояко и в противоположных направлениях: замедление начала кристаллизации позволяет пропустить через жидкий металл отливки большее количество газов из формы; с другой стороны, более долгое существование «горячей» отливки способствует интенсификации процесса его науглероживания из газовой фазы.

При деструкции смолы без доступа кислорода содержание СО в газах составляет 23,2...24,8 %, а СО₂ – только следы. Перенос оксида углерода от отливки через форму к контейнеру и далее в окружающую среду состоит из двух этапов: движение СО внутри формы и движение СО в контейнере. Определяющим здесь будет первый этап, потому что перенос газов через форму встречает значительно большее сопротивление.

Интенсивность первого этапа определяется градиентом давлений, то есть разницей парциальных давлений СО у отливки и на границе форма-засыпка. Отсасывая газы из контейнера, мы увеличиваем эту разницу, а значит и интенсивность эвакуации СО из формы (рис. 4.1).

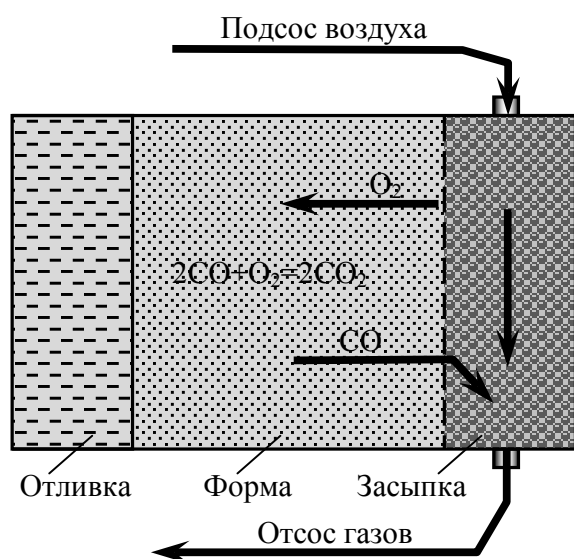


Рис. 4.1. Схема эвакуации газов из контейнера

Вместе с потоками газов от отливки в порах формы существует встречный диффузионный поток O₂ и N₂, который вызывается разницей концентраций (парциальных давлений) этих газов на границах формы. Диффузию кислорода, при этом, можно существенно интенсифицировать за счет молекулярного водорода, который образуется при разложении углеводородов связующего, так как коэффициент диффузии O₂ в H₂ гораздо выше коэффициентов диффузии O₂ в других компонентах газовой атмосферы формы.

Естественно предположить, что интенсивное отсасывание газов из контейне-

ра, которое сопровождается подсосом воздуха из окружающей среды, повышает разницу парциальных давлений на затылочной и рабочей поверхностях формы, стимулируя тем самым встречный поток кислорода через форму к отливке (рис. 4.1).

Существование встречных потоков CO и O₂ приводит к тому, что из-за эвакуации одной части CO и окисления другой его части, содержание последнего в отсасываемом газе быстро падает, изменяясь на повышенное содержание CO₂ (рис.4. 2).

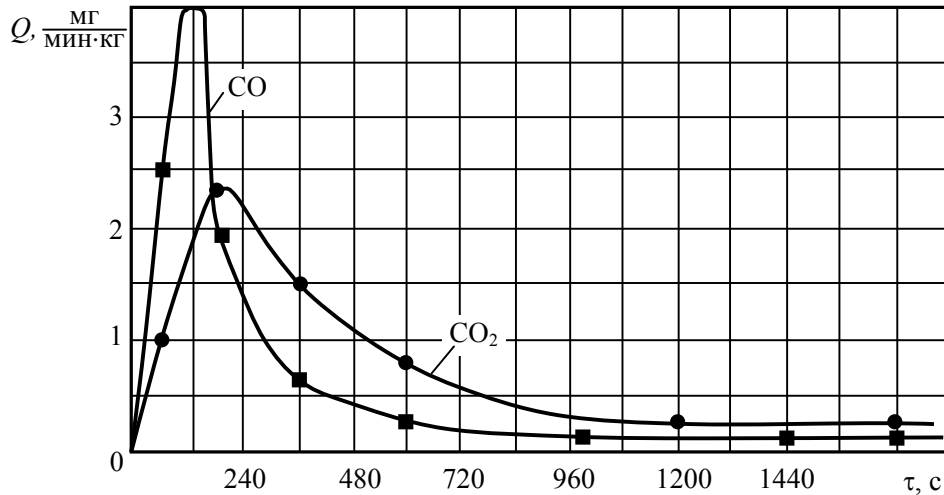


Рис. 4.2. Интенсивность выделения CO и CO₂ в удаляемом газе

Таким образом, отсос действует на содержание CO двояко и в одном направлении - на снижение концентрации. Экспериментально установлено, что с повышением интенсивности отсоса с поверхности стальных отливок сначала исчезают газовые раковины химико-усадочного происхождения (рис.4.3). Далее следует зона оптимальности, когда дефекты поверхности отсутствуют. Дальнейшее повышение приводит к возникновению дефектов другого происхождения: механического (из-за снижения суммарного давления в порах формы), а затем и химического (из-за роста присутствия кислорода у металла) пригара.

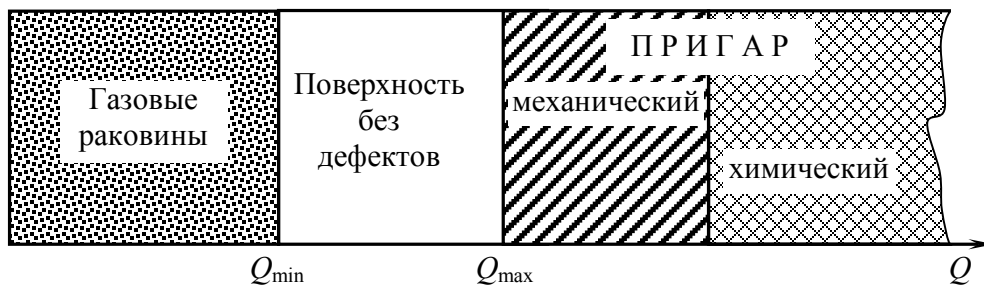


Рис. 4.3. Схема влияния интенсивности отсоса на качество отливки

Существование оптимальной зоны интенсивности отсоса, ширина и координаты которой зависят от многих технологических факторов, ставит перед технологом и конструктором задачу поиска таких значений интенсивности, которые обеспечивали бы получение бездефектных отливок в широких диапазонах упомянутых факторов. К последним в работе относили содержание связующего, плотность материала формы и ее толщину, а также температуру заливки жидкого металла. Поиск оптимальной интенсивности внешнего воздействия в этих условиях выполняли с помощью компьютерной

модели, которую строили, исходя из такой последовательности: принцип моделирования, физическая модель, схемотехническая модель.

Принцип моделирования (рис. 4.4) выбирали исходя из главного требования – модель должна предоставлять пользователю возможность воспроизводить внешнее воздействие на систему «отливка – форма» путем вдува газа (смеси газов) или интегрального отсасывания из пространства вокруг формы (засыпки контейнера). Модель системы строили в виде, изображенном на рис. 4.5.

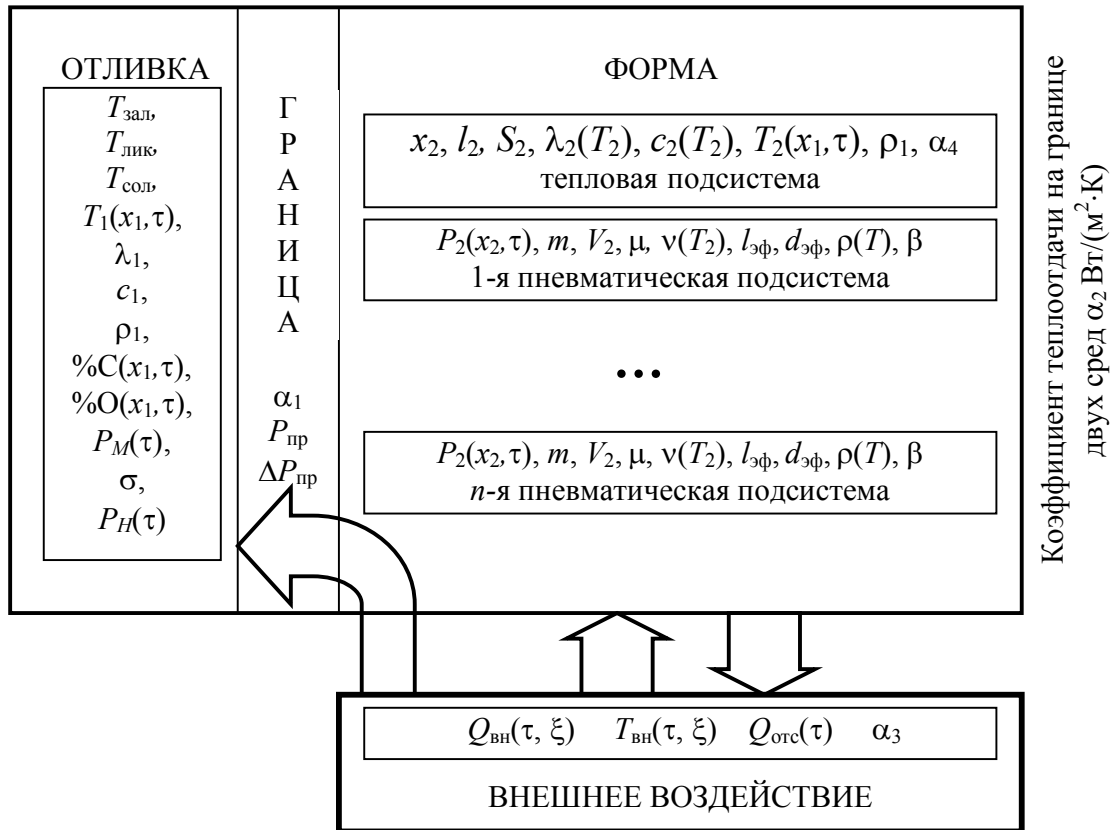


Рис. 4.4. Функциональная схема модели взаимодействия отливки с формой

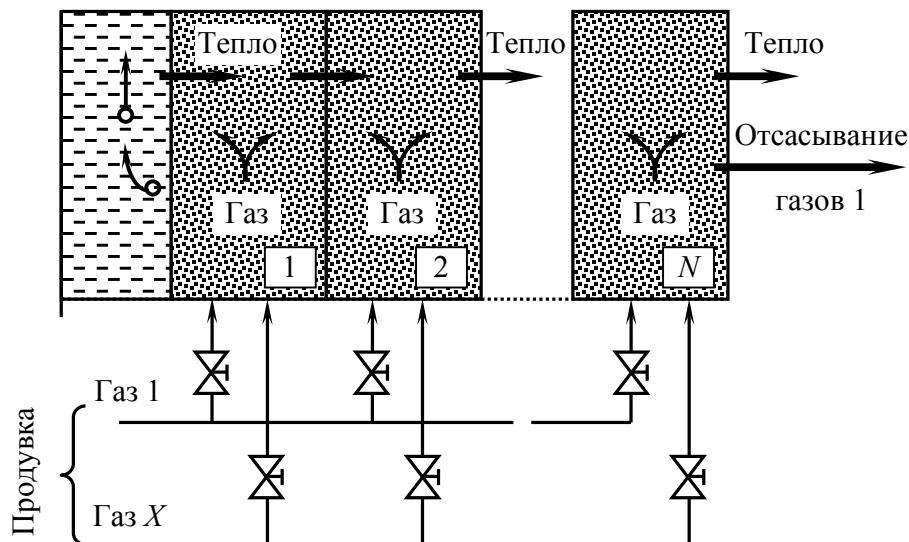


Рис. 4.5. Физическая модель процесса теплообмена с учетом внешнего воздействия

Схемотехническая модель тепломассопереноса в системе «отливка – форма» приведена на рис. 4.6, а.

Функциональные блоки, которые приведены на схеме, служат для аналогового преобразования напряжения в точке 3 соответствующего блока S , который моделирует тепломассоперенос в отдельном слое формы в управляющие функции $f_{1R_{pi}} \dots f_{1\Phi_{pi}}$.

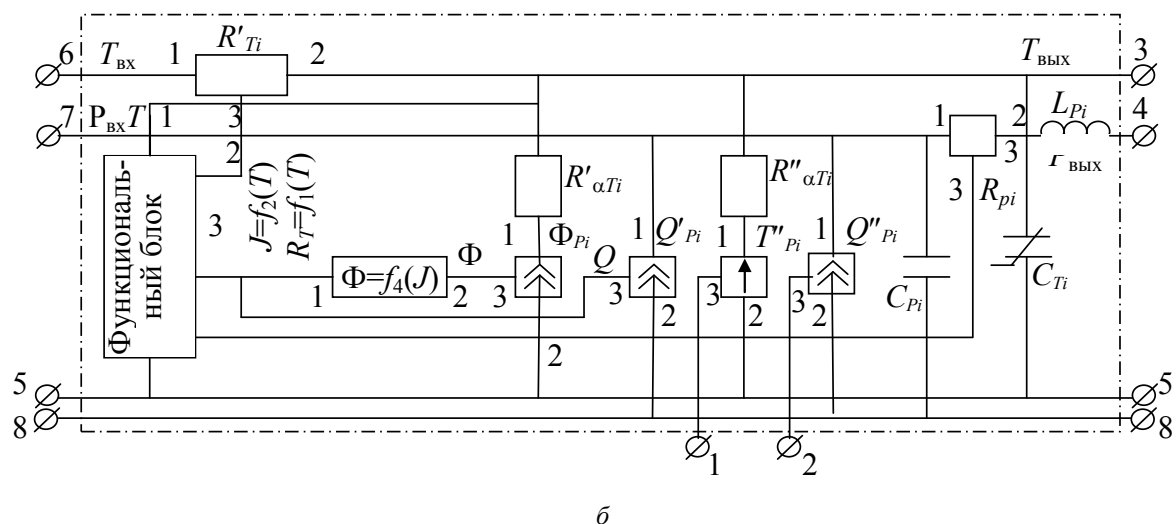
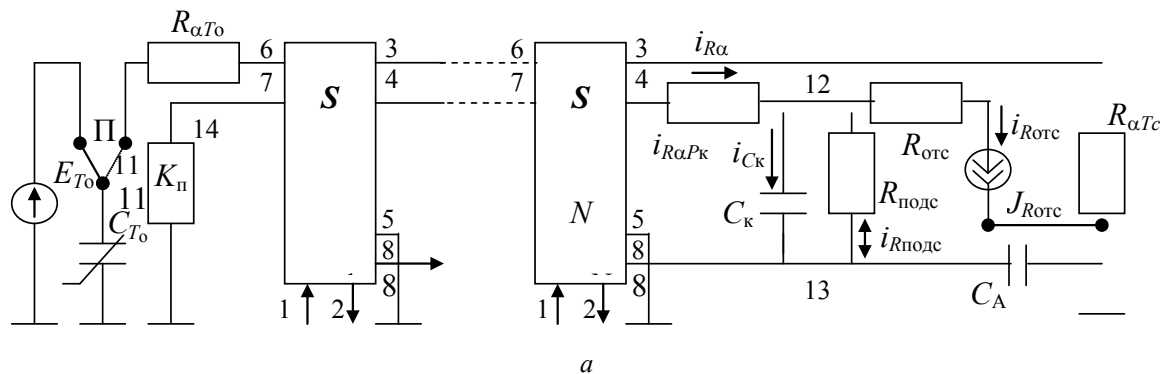


Рис. 4.6. Принципиальная схема процесса охлаждения отливки в песчаной форме:
а – общий вид; б – схема блока S

Принципиальная схема состоит из N однотипных блоков S , соответствующих N слоям оболочковой формы. Схема каждого блока приведена на рис. 4.6, б. Каждый i -ый блок S_i состоит, в свою очередь, из элементов двух подсистем: «термической» (R_{Ti} , C_{Ti} , $R'_{\alpha Ti}$, $R''_{\alpha Ti}$, Φ'_{pi} , T_{pi}), «пневматической» (R_{pi} , L_{pi} , C_{pi} , Q'_{pi} , Q''_{pi}) и двух функциональных аналоговых преобразователей, которые реализуют функции $R_T=f_1(T)$, $J=f_2(T)$, $R_P=f_3(T)$ и $\Phi=f_4(T)$. Выходы блока имеют такую спецификацию:

- 1 – управление притоком тепла с вдуваемыми газами;
- 2 – управление притоком массы с вдуваемыми газами;
- 3 – отвод тепла;
- 4 – отвод массы;
- 5 – температура окружающей среды;
- 6 – приток тепла;
- 7 – приток массы;
- 8 – давление окружающей среды.

Внешние подключения блоков имеют такие элементы.

Со стороны отливки: E_{T_0} – источник тепла плавления; C_{T_0} – теплоемкость отливки; П – заливка формы; $R_{\alpha T_0}$ – теплоотдача от отливки в форму; K_{Π} – прорыв пузырьков газа в отливку.

Со стороны засыпки: $R_{\text{арк}}$ – пневматическое сопротивление проникновению газов из формы к засыпке (контейнеру); $C_{\text{к}}$ – емкость порового пространства засыпки; $R_{\text{отс}}$ – пневматическое сопротивление в путях отсасывания; $R_{\text{подс}}$ – пневматическое сопротивление проникновению газов из засыпки в атмосферу; $C_{\text{А}}$ – емкость атмосферы ($C_{\text{А}} \rightarrow \infty$); $J_{p_{\text{отс}}}$ – производительность вакуумного насоса; $R_{\alpha T_c}$ – теплоотдача на внешней границе формы.

Среднюю температуру i -го слоя моделирует напряжение на выводе 3 i -го блока S_i , среднее давление в i -м слое – напряжение на выводе 7 i -го блока S_i , температуру отливки – напряжение в точке 11 схемы, давление газов в контейнере – напряжение в точке 12, атмосферное давление – в точке 13.

Поток газов из формы моделирует ток $i_{R\alpha}$, поток газов через засыпку в атмосферу (или наоборот) – ток $i_{R_{\text{подс}}}$, поток газов к вакуумнасосу – ток $i_{R_{\text{отс}}}$, поток газов на изменение давления в контейнере – ток $i_{\text{ск}}$. Наконец, главный параметр, который моделируется, – давление газов на границе «металл – форма» соответствует напряжению в точке 14 принципиальной схемы (рис. 4.6, б).

Идентификацию модели выполняли путем сравнения результатов моделирования и измерения давления газов на границе «металл – форма» и соответствующим подбором значений параметров элементов компьютерной модели.

Для воспроизведения зависимости характеристик объекта от исследуемых параметров схема снабжена тремя типами нелинейных элементов, величины которых зависят, соответственно, от напряжения на их выводах C_{Ti} , от напряжения в других местах схемы (R_{Ti} , R_{pi} , Q'_{pi} , Φ'_{pi}) и от внешнего управляющего сигнала (Q''_{pi} , T'_{pi}).

Системы управления и проектирования при литье в песчано-смоляные формы построены на базе идентифицированной схмотехнической модели. Система управления имеет блок обратной связи, отслеживает качество отливок со стороны наличия или отсутствия поверхностных дефектов и сообщает об этом блоку, который вырабатывает сигнал на изменение внешнего воздействия, предварительно отработав эти изменения на модели. Система снабжена также экспериментальным блоком для измерения характеристик металлов и песчаных смесей и банком данных.

Работая в составе САПР ТП, схмотехническая модель позволила, например, получить оптимальные значения параметров отсасывания:

$$Q_{\min} = 0,18\alpha_c + 0,3 \cdot 10^{-5} \rho + 0,53x^2 - 0,8 \cdot 10^{-2}, \quad (4.1)$$

$$Q_{\max} = 0,15 - 0,8\alpha_c - 1,7 \cdot 10^{-5} \rho - 2,2x_2, \quad (4.2)$$

где Q_{\min} , Q_{\max} – минимальная и максимальная граница оптимальной интенсивности отсасывания;

α_c – концентрация связующего;

ρ – плотность формы;

x_2 – толщина формы; и построить номограмму для расчета параметров внешнего воздействия, которые обеспечивают получение стальных отливок с качественной поверхностью в оболочковых формах (рис. 4.7).

Дополнительное влияние внешнего воздействия. Установлено также, что отсос газов положительно влияет на развитие усадочных процессов в отливке, а также на выбиваемость формы. Последняя связана с глубиной деструктивных процессов в связующем. Разработана математическая модель этих процессов. Совпадение расчетных и экспериментальных данных подтверждает упомянутый механизм повышения выбиваемости.

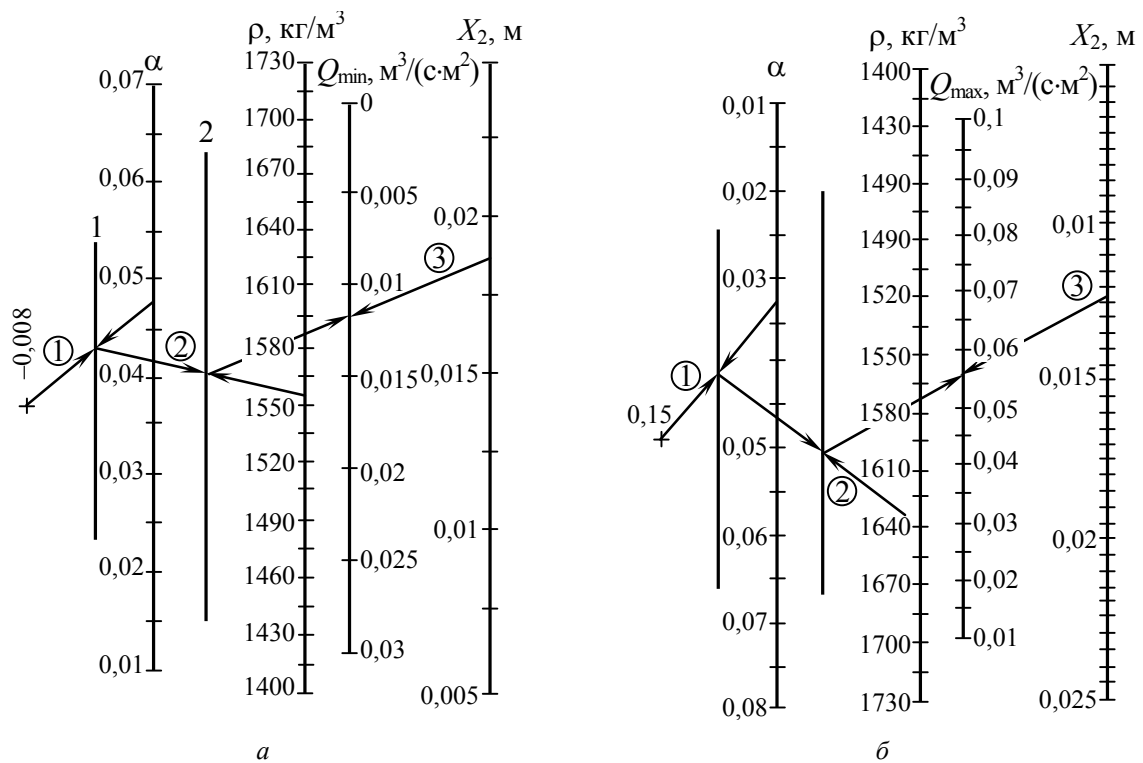


Рис. 4.7. Номограммы для расчета минимального (а) и максимального (б) значений интенсивности внешнего воздействия.

Наиболее значительным дополнительным действием отсоса является его влияние на экологические условия литья в оболочковые формы. Установлено, что такое внешнее действие – радикальный метод улавливания газообразных вредностей, выделяемых из формы. Так, в составе воздуха рабочей зоны при выключенном отсасывании обнаружены бензол, толуол, гексан, формальдегид, крезолы, фенол, оксид азота, аммиак, оксид углерода. При этом содержание в воздухе формальдегида и фенола превышает ПДК в 3,2 и 4,9 раз соответственно; зарегистрированы концентрации оксида углерода, превышающих ПДК в 2...40 раз.

В условиях действующего отсасывания содержание в воздухе фенола, формальдегида и оксида углерода не превышало ПДК, оксидов азота содержалось в 2,5, а аммиака – в 22 раза меньше, отсутствовали бензол, толуол, крезолы, гексан.

Влияние наддува газов на качество поверхности стальных отливок. Вдув газов в оболочковую форму преследует цель частичной замены атмосферы формы. Для моделирования такого процесса использовали трехкомпонентную модель для одной термической и двух газовых (СО и СО₂) подсистем.

Разработаны математические закономерности, позволяющие переходить от трехмерной системы точечного вдува к одномерной. Это позволило моделировать несимметричную систему вдува с помощью одномерной схмотехнической модели. Установлено, что при вдуве СО₂ в рабочий слой формы уменьшается соотношение парциальных давлений P_{CO}/P_{CO_2} . Наилучшие результаты можно получить при одновременном проведении наддува и отсоса.

Выведены уравнения для расчета геометрических параметров наддува.

4.2. Оптимизация технологических процессов получения отливок из железоуглеродистых сплавов путем синхронизирующего управления тепломассообменом в литейной форме

Известно, какую большую роль в технологичности изготовления и эксплуатационной надежности литых деталей из железоуглеродистых сплавов играет «литейная корка» – поверхностный слой отливок. Поверхностный слой состоит из части, которая изымается при поверхностной обработке и части, которая остается в детали и существенно влияет на уровень ее эксплуатационных свойств. Поэтому одной из основных проблем современного литейного производства является снижение количества и размеров дефектов поверхностного слоя отливок до их полного устранения. Особенно важен последний фактор при изготовлении в разовых формах сложных деталей из труднообрабатываемых материалов.

Анализ современного состояния проблемы показывает, что несмотря на то, что перечень литейных дефектов поверхностного слоя и причины их возникновения известны, а методы их устранения предложены, большинство мероприятий по устранению дефектов оказывались зачастую либо нетехнологичными, либо малоэффективными из-за нестабильности получаемых результатов. В итоге количество брака по дефектам поверхностного слоя в современном литейном производстве остается недопустимо большим, например, для среднеуглеродистых сталей, полученных в разовых формах: пригар – 15...20 %, газовые раковины – 20...30 % от общего брака.

Над этой проблемой работали и работают многие исследователи в области теории и технологии, а также современных методов управления процессами литья. Их опыт показал, что одним из действенных путей устранения подобных дефектов является управление тепломассообменом в системе «отливка – форма».

При этом обращает на себя внимание тот факт, что в технологических процессах литья в разовые формы малопредсказуемое влияние каждого из факторов процесса отдельно приводит к неадекватным результатам с точки зрения качества поверхностного слоя отливок.

Способы управления процессами тепломассообмена в литейной форме сталкиваются со значительными трудностями, поскольку иногда изменение технологических параметров в заведомо «лучшую» сторону приводит к противоположному результату – качество отливки резко ухудшается и наоборот. Например, добавление карбонатов в фенол-формальдегидную смесь, которое теоретически должно способствовать изменению газовой атмосферы в форме и устранению дефектов отливок газового происхождения, на практике часто приводит к их увеличению.

Этот пример, как и многие другие, приводит к выводу о том, что существуют неисследованные причины, влияющие на формирование дефектов, знание которых позволило бы повысить качество отливок без больших материальных и энергетических затрат, разработки новых сложных технологий и оборудования. Очевидно также, что в условиях существования математических моделей тепломассообмена в системе «отливка – литейная форма» поиск этих причин должен проводиться с целью выявления новых переменных, характеризующих процесс, усовершенствованных моделей, учитывающих влияние этих переменных и новых видов управления, основанных на этих моделях.

Конкретный набор значений переменных состояния: температуры, давления, концентрации и т.д., которые характеризуют систему как набор элементов и связей между ними, необходимых и достаточных для выполнения системой заданных функций для

каждого момента времени определяет некоторое особое – фиксированное состояние, как самой системы, так и ее подсистем. Некоторые из этих фиксированных состояний являются уникальными, такими, которые позволяют дальнейшую эволюцию системы и результаты ее функционирования. К таким состояниям в литейном производстве относятся, например, моменты начала кристаллизации расплава, движения пузырька газа, заданное распределение температуры или давления в системе и т.д.

Время достижения подобных фиксированных состояний при затвердевании отливки в форме является функцией начальных значений переменных состояния системы «отливка – форма» и некоторых внешних воздействий (управлений) и может само по себе служить важной характеристикой эволюции системы в условиях управляющих воздействий. Совпадение же во времени заданных фиксированных состояний в различных подсистемах объекта управления становится целью синхронизирующего управления, которое во многих литейных технологиях приводит к повышению качества отливки, в основном, технологическими методами.

Поэтому исследования, направленные на разработку теоретических основ и создание синхронизирующего управления, которое позволяет технологическими методами, без существенных энергетических и материальных затрат повышать качество отливок, являются весьма актуальными.

Поэтому проведен анализ проблем повышения качества поверхностного слоя среднеуглеродистых стальных отливок при литье в разовые формы, рассмотрены дефекты поверхностного слоя отливок, в основном, пригара и раковин, появление которых связано с взаимодействием расплава с газами в порах литейной формы, причины их образования; проанализированы успехи и неудачи существующих технологических методов борьбы с дефектами отливок, получаемых в разовых формах. Проанализированы также методы моделирования и управления процессами теплообмена в системе «отливка – разовая форма» с целью повышения качества поверхностного слоя.

В результате анализа установлено, что борьба за качество продукции литейного производства в значительной степени связана с качеством поверхностного слоя отливок. Это связано с тем, что свойства отливок в значительной степени определяются именно качеством их поверхностного слоя. Благодаря повышению качества поверхностного слоя, можно более полно использовать его положительные свойства: резко повысить точность отливок, сократить трудоемкость очистных работ, улучшить обрабатываемость, уменьшить припуски на обработку резанием и тому подобное.

Опыт теории и практики литейного производства свидетельствует о том, что для улучшения качества поверхностного слоя отливок необходимо управлять процессами теплообмена в системе «отливка – форма», однако это управление не может опираться на существующие методы, поскольку классический подход далеко не всегда обеспечивает стабильность получаемых результатов. Одним из важнейших направлений повышения качества отливок является широкое внедрение автоматизированных систем управления литейными технологиями, основанных на глубоком понимании процессов, происходящих в системе «отливка – форма» на всех этапах ее существования.

С этой целью описаны разработанные теоретические основы управления состояниями относительно разовой формы в литейном производстве. Современные требования к качеству управления сложными объектами в литейном производстве привели к тому, что во многих случаях методы классической теории управления, системного анализа, принятия решений, исследования операций и т.д. оказались неэффективными, а иногда вообще неработоспособными. Сложность такого объекта, как система «отливка – разовая форма», порожаемая ее многомерностью, нелинейностью, стохастичностью, нестационарностью, высоким уровнем априорной и текущей неопределенности, а также

свойствами постоянно меняющейся окружающей среды и дефицитом необходимой информации, резко усложняет задачу построения математической модели объекта, а иногда вообще не позволяет получить положительное решение.

Современная теория автоматического управления насчитывает, в зависимости от цели, шесть основных его видов: стабилизирующее, программное, следящее, экстремальное, оптимальное и адаптивное. В то же время существует цель управления, недостижимая ни одним из перечисленных видов. Эта цель принципиально иная – обеспечить совпадение во времени некоторых конкретных состояний, которые достигаются объектом управления. Постановка такой задачи связана с существованием объектов, основная отличительная черта которых такова: результаты их «деятельности» при практически одинаковых условиях и некоторых внешних и внутренних возмущениях мало предсказуемые, поскольку зависят, в основном, не от этих условий и возмущений, а от самого факта совпадения состояний во времени.

Варьирование переменных состояния (температуры, давления, концентрации и т.д.) во времени, накапливаясь, приводит к тем или иным качественным изменениям в системе «отливка – разовая форма». К таким качественным изменениям могут быть отнесены, например, кристаллизация, начало движения газовых пузырей и тому подобное. Назовем такие изменения состояниями первого рода. К состояниям второго рода отнесем достижения одной из переменных состояния некоторого заранее заданного значения, которое, хотя и не приводит к физико-химическим превращениям, но предполагает переход к любому новому отношению, например, «давление в порах формы с некоторого конкретного значения (состояния второго рода) становится безопасным с точки зрения перемещения газового пузырька к отливке».

Пусть ОУ описывается уравнением в частных производных:

$$\mathbf{A}[\partial \mathbf{x}(z, \tau) / \partial \tau] = \mathbf{f}[\mathbf{x}(z, \tau); \partial \mathbf{x}(z, \tau) / \partial z; \partial^2 \mathbf{x}(z, \tau) / \partial z^2; \mathbf{u}(z, \tau)], \quad (4.3)$$

где z – пространственная координата,

τ – время,

$\mathbf{x}(z, \tau)$ – n -мерный вектор переменных состояния,

$\mathbf{u}(z, \tau)$ – m -мерный вектор управления,

\mathbf{A} – матричная функция размерности $n \times n$.

Разделим объект на p подсистем: $\mathbf{x}_1(z, \tau) \in \mathbf{x}(z, \tau) \dots \mathbf{x}_p(z, \tau) \in \mathbf{x}(z, \tau)$, которые могут частично пересекаться между собой. Каждая из подсистем движется в пространстве своих переменных состояния под действием управлений $\mathbf{u}_1(z, \tau) \dots \mathbf{u}_p(z, \tau)$, которые могут не только пересекаться, но и полностью совпадать друг с другом.

Зададим общее для всех подсистем единое начальное $\mathbf{x}(z, 0) = \mathbf{x}_0$ и p конечных $\mathbf{x}_1^*(z, \tau_{s1}, \mathbf{u}_1^*) \dots \mathbf{x}_p^*(z, \tau_{sp}, \mathbf{u}_p^*)$ состояний, которые интерпретируются как «состояния $S_1 \dots S_p$ », соответственно.

Задание синхронизации состояний $S_1 \dots S_p$ сводится в этом случае к достижению при помощи синхронизирующих управлений $\mathbf{u}_1^* \dots \mathbf{u}_p^*$ такого конечного состояния $\mathbf{x}_1^*(z, \tau_{s1}, \mathbf{u}_1^*) \dots \mathbf{x}_p^*(z, \tau_{sp}, \mathbf{u}_p^*)$, при котором для любой пары k и l из множества p подсистем выполняются соотношения:

$$|\tau_{sk} - \tau_{sl}| \leq \varepsilon, \quad (4.4)$$

где ε – малое число.

Для систем с распределенными параметрами, состоящих из двух подсистем ($p=2$) и руководимых единым управлением ($\mathbf{u}=u$), задача сводится к достижению условия:

$$|\tau_{s1}(u^*) - \tau_{s2}(u^*)| \leq \varepsilon. \quad (4.5)$$

Таким образом осуществляется новое, предложенное в работе преобразование: переход математической модели объекта от пространства переменных состояния $\Phi(\tau)$ (Φ – любая переменная состояния: температура, давление и т.д.), которые зависят от времени τ , в пространство времени достижения поименованных (конкретных) состояний $\tau_s(u)$, которые зависят от управления u , что позволяет по-новому оперировать процессами, которые происходят в объекте.

Рассмотрим зависимости $\tau_{s1}(u)$ и $\tau_{s2}(i)$ в пространстве состояний (рис. 4.8). Точка O здесь особая, она соответствует ситуации, когда, благодаря управлению u^* , состояния S_1 и S_2 достигаются одновременно:

$$\tau_{s1}(u^*) = \tau_{s2}(u^*). \quad (4.6)$$

Расчет и поддержка u^* и есть главной целью управления состояниями. Возможность достижения этой цели вытекает из следующих соображений. Пусть некоторое состояние S_i может быть достигнуто в i -ом объекте управления (i -ой подсистеме системы «отливка – форма») в интервале времени $\tau_{si}^{\min} - \tau_{si}^{\max}$ (рис. 4.9).

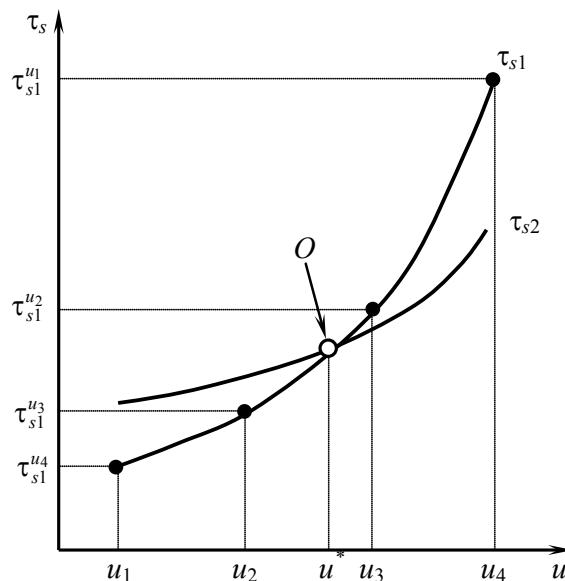


Рис. 4.8. Схема определения понятия «синхронизация состояний»

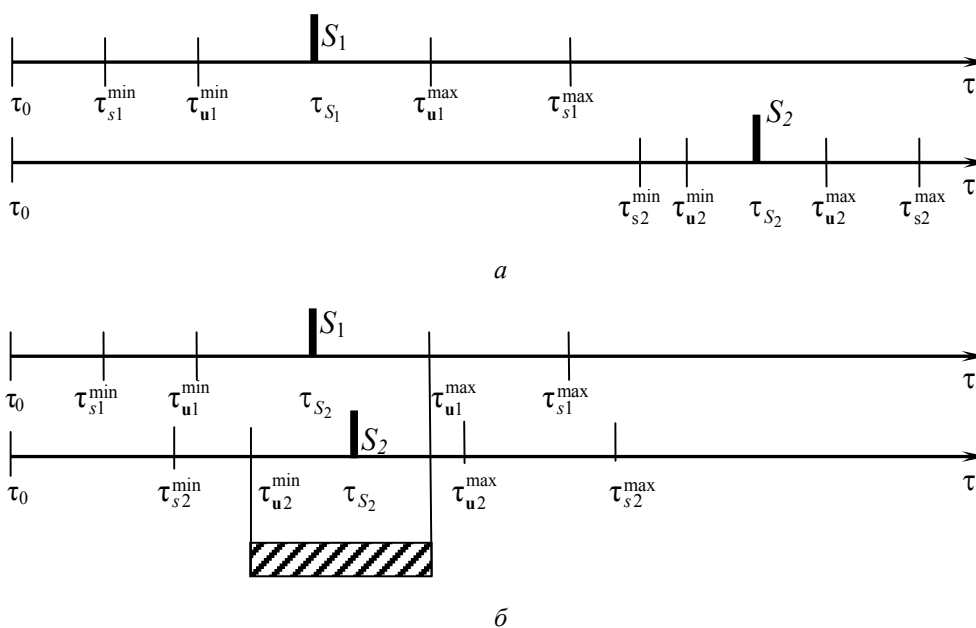


Рис. 4.9. Схема, иллюстрирующая возможность достижения положительного результата при управлении состояниями (заштрихованный интервал времени)

Пусть также управление u_i может изменять время достижения состояния в интервале $\tau_{ui}^{\min} - \tau_{ui}^{\max}$ ($\tau_{ui}^{\min} - \tau_{ui}^{\max} \in \tau_{si}^{\min} - \tau_{si}^{\max}$).

Если в двух объектах существуют некоторые управления u_1 и u_2 , способные влиять на время достижения состояний S_1 и S_2 , то возможны следующие варианты.

1. Интервалы $\tau_{s1}^{\min} - \tau_{s1}^{\max}$ и $\tau_{s2}^{\min} - \tau_{s2}^{\max}$ не совпадают. В этом случае синхронизация состояний невозможна (рис. 4.9, а).

2. Интервалы $\tau_{s1}^{\min} - \tau_{s1}^{\max}$ и $\tau_{s2}^{\min} - \tau_{s2}^{\max}$ совпадают частично, а $\tau_{u1}^{\min} - \tau_{u1}^{\max}$ и $\tau_{u2}^{\min} - \tau_{u2}^{\max}$ не совпадают. В этом случае синхронизация состояний возможна, но за счет другого управления.

3. Интервалы $\tau_{u1}^{\min} - \tau_{u1}^{\max}$ и $\tau_{u2}^{\min} - \tau_{u2}^{\max}$ совпадают полностью или частично на интервале $\tau_{u2}^{\min} - \tau_{u1}^{\max}$ (заштрихованная область на рис. 4.9, б). Управлениями u_1 и u_2 можно обеспечить синхронизацию S_1 и S_2 . В этом случае задача синхронизации имеет на интервале $\tau_{u2}^{\min} - \tau_{u1}^{\max}$ бесконечное множество решений. В рамках этого интервала возможны постановка и решение дополнительной оптимизационной задачи, которая выбирает «лучшие» значения $\tau_{u2}^{\min} \leq \tau_{s1} \approx \tau_{s2} \leq \tau_{u2}^{\max}$.

Среди множества параметров вектора переменных состояния x выделим подмножество y параметров, которые непосредственно наблюдаются.

Пусть выход оценивается двумя переменными: y_1 – температура отливки в форме T_1 , которая изменяется по кривой 1, и y_2 – давление газов в порах рабочего слоя формы P (кривая 2, рис. 4.10).

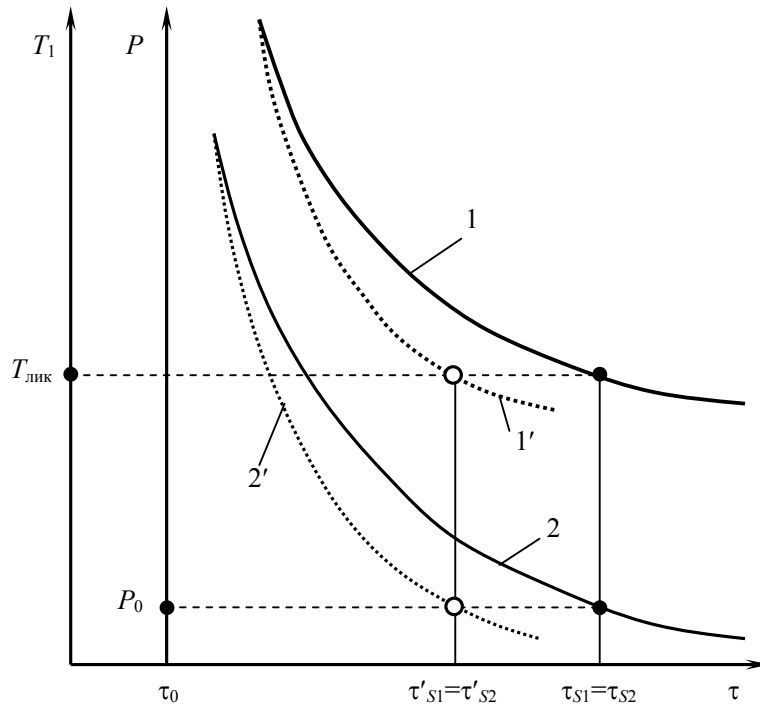


Рис. 4.10. Схема к обоснованию цели синхронизирующего управления

Пусть также состоянием S_1 в температуре отливки является температура ликвидуса $T_{лик}$, а состоянием S_2 в давлении газов в форме – некоторое безопасное для отливки значение P_0 . Пусть также система работает таким образом, что оба состояния достигаются практически одновременно: $\tau_{s1} = \tau_{s2}$. Предположим, что из-за возникших внешних возмущений график охлаждения отливки изменился (кривая 1', рис. 4.10), и теперь ожидаемое время достижения температуры ликвидуса соответствует значению τ'_{s1} . Разница $\tau_{s1} - \tau'_{s1}$ больше некоторого малого ϵ , поэтому система управления принимает меры, чтобы изменить ход кривой 2 в сторону кривой 2', так, чтобы состояния все же были достигнуты в другое, но одинаковое время $\tau'_{s1} = \tau'_{s2}$.

При осуществлении перехода к модели объекта управления в пространстве состояний было выявлено наличие муар-эффекта, который существенно влияет на качество и эффективность управления. Его суть заключается в большой зависимости координаты u места пересечения графиков двух функций (рис. 4.11) от малого смещения одного из них, если угол между этими графиками (или причастными к графикам) у точки пересечения мал. Рассмотрим схему возникновения такого эффекта. Здесь в координатах $\{u, \tau_s\}$ изображены два отрезка, причем отрезок $1'$, получен путем переноса отрезка 1 на величину $\Delta\tau_s$ вниз (рис. 4.11, а). При малом $\Delta\tau_s$ прямые расположены настолько близко друг к другу, что их можно считать совпадающими. Другая картина наблюдается, если ввести в рассмотрение еще один отрезок 2 (рис. 4.11, б), пересекающий отрезки 1 и $1'$ в точках O и O' и образующий с ними малый угол α .

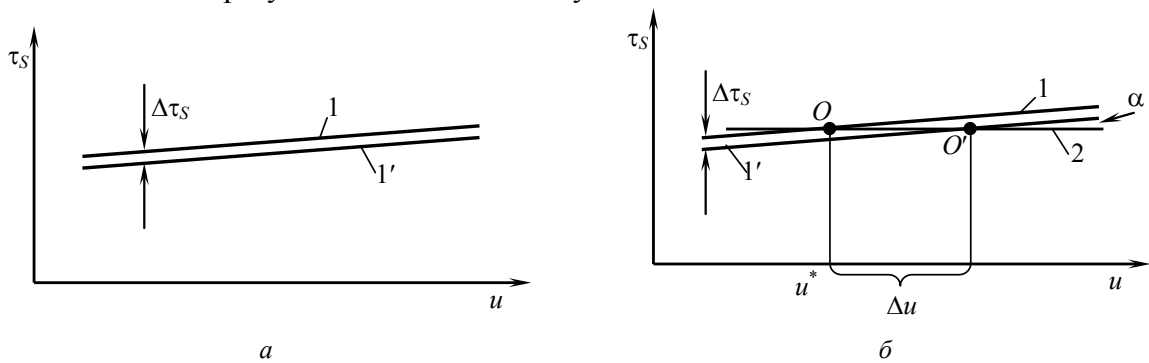


Рис. 4.11. Схема к пояснению влияния муар-эффекта на эффективность управления

Благодаря наличию отрезка 2, результат малого перемещения отрезка 1 становится гораздо заметнее: точки O и O' отстоят друг от друга на расстоянии Δu , значительно (на порядки при малом α) превышающему изменение $\Delta\tau_s$.

Пусть линии 1 и 2 – графики зависимости времени достижения некоторых состояний τ_{s1} и τ_{s2} от u , а величина u^* – управление, что синхронизирует состояния в подсистемах 1 и 2 некоторого объекта. Пусть также на объект действует малое стохастическое возмущение, что переводит график 1 в положение $1'$. При малом α это возмущение отвергает объект с точки зрения управления далеко от точки синхронизации, существенно изменяя ситуацию в нем.

Описанное подтверждает следующее положение: в тех случаях, когда результат процесса определяется не абсолютными значениями его параметров, а самим фактом совпадения во времени (синхронизации) состояний его подсистем, подобное малое возмущение, благодаря муар-эффекту, может существенно и непредсказуемо изменить конечный результат управления, а следовательно и ожидаемое качество отливки.

Теперь, чтобы восстановить синхронизацию, необходимо значительно изменить первоначальное синхронизирующее управление u^* на относительно большую величину Δu (рис. 4.11), что в реальных объектах не всегда бывает возможным технологически.

Подтверждением влияния муар-эффекта является также анализ времени достижения состояний S_1 – начало кристаллизации и S_2 – снижение давления газов в порах разовой формы до 215 Па (это значение получено в результате эксперимента) при литье в песчано-смоляные формы при различных управлениях: температуре заливки T_3 (рис. 4.12, б) и толщине стержня δ (рис. 4.12, а).

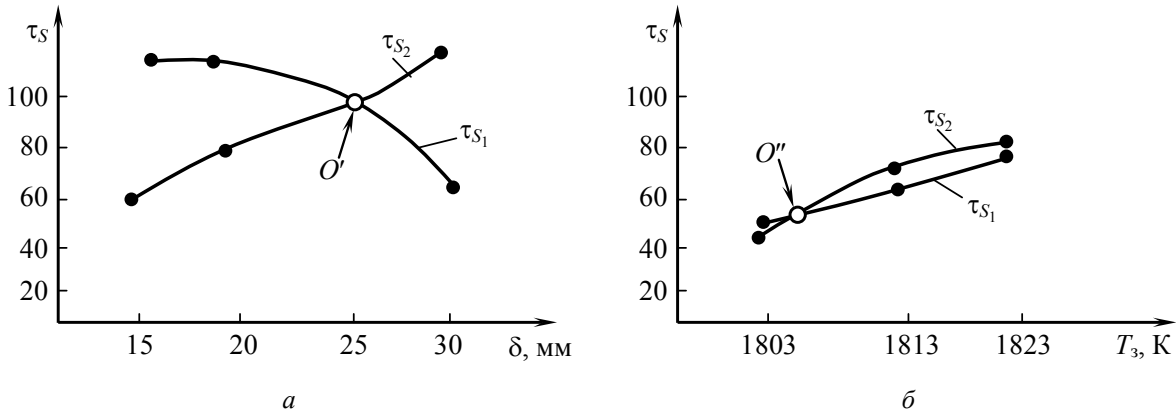


Рис. 4.12. Графики $\tau_s(u)$, иллюстрирующие склонность различных управлений системой «отливка – форма» (a – толщиной стержня, b – температурой заливки) к муар-эффекту

Из рисунка 4.12 видно, что выбор в качестве управления состояниями температуры заливки является недостаточно удачным, поскольку в этом случае стабильности влияния управляющих воздействий на объект существенно мешает муар-эффект. Этот вывод подтверждает также и серия экспериментов с отливками из стали 35Л, которые получали в оболочковых песчаных формах на смоляном связующем. В поверхностном слое отливок, полученных с варьированием толщины стержня вблизи точки O' , выявлено 12 % отливок с пригаром и 88 % отливок без поверхностных дефектов. Зато в поверхностном слое 46 % отливок, которые получали в условиях варьирования температуры заливки вблизи точки O'' , выявлено пригар, 32 % – газовые раковины, 22 % отливок были без поверхностных дефектов. В одном случае в поверхностном слое присутствовали сразу три до некоторой степени концентрические зоны: в центре – пригар, далее – кольцевидный участок чистой поверхности и, наконец, – газовые раковины (рис. 4.13).

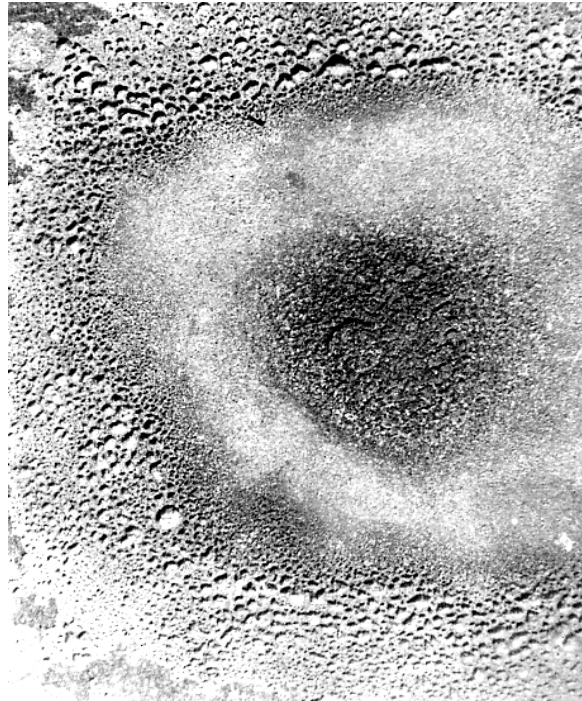


Рис. 4.13. Поверхность отливки из стали 35Л

Попробуем рассмотреть это явление со стороны влияния синхронизации состояний на образование дефектов. Сочетая участки формы, в которых в момент τ завершается дегазация, получим поверхность $x_d(r, \tau)$ – фронт дегазации, что движется внутри формы:

$$T_d = T_3 - \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{\frac{a\left(\tau - r^2 \frac{\pi h}{v_3 F}\right)}{x_d^2}}} (T_{\text{отл}} - T_0), \quad (4.7)$$

где r – цилиндрическая координата;
 T_3 – температура заливки, К;

- T_0 – начальная температура, К;
- $T_{отл}$ – температура отливки, К;
- a – температуропроводность материала формы, $m^2 \cdot c$;
- h – металлостатический напор, м;
- v_3 – скорость движения металла через литниковую систему, м/с;
- F – площадь литниковой системы, m^2 .

Подставляя в (4.7) значения условий заливки: $T_d=650$ К; $T_3=1823$ К; $T_0=300$ К; $a=6,24 \cdot 10^{-7} m^2 \cdot c$; $v_3=0,1$ м/с, $h=0,02$ м; $S=4 \cdot 10^{-4} m^2$; $x_d=0,005$ м, получим формулу для расчета времени наступления состояния S_2 :

$$\tau_{S_2} = 55 \cdot 10^4 x_d^2 + 523r^2, c. \tag{4.8}$$

Графики функции $\tau_{S_2}(r)$ при разных x_d (0,004 м для $\tau_{S_2'}(r)$ и 0,0045 м для $\tau_{S_2''}(r)$) приведены на рис. 4.14.

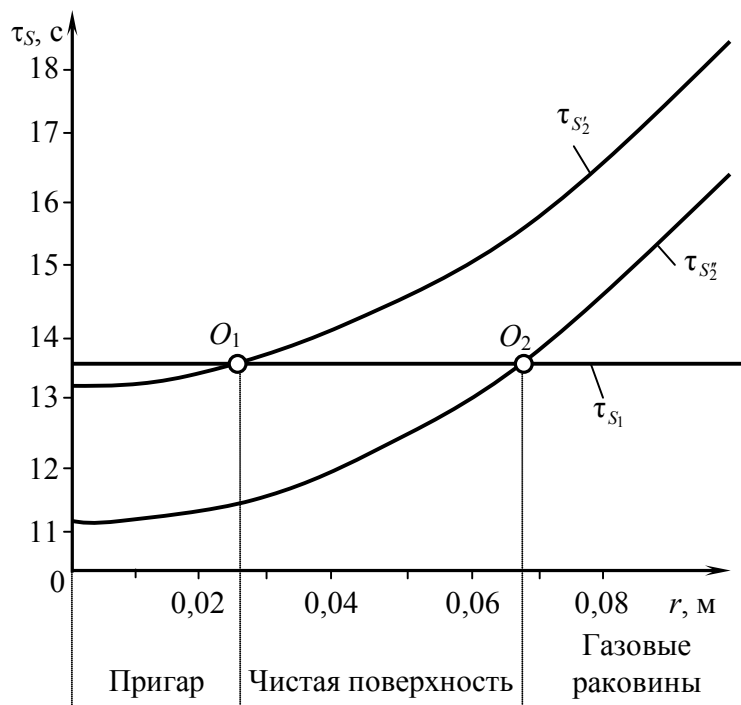


Рис. 4.14. Результаты расчетов, поясняющих состояние поверхностного слоя отливки

Здесь же приведена прямая $\tau_{S_1}(r)$ – время достижения состояния S_1 «температура металла равна температуре ликвидуса», рассчитанное по уравнению Баландина. Эта величина от расстояния до центра отливки не зависит. Точка O_1 совпадения во времени состояний S_1 и S_2' соответствует границе между пригаром и чистой поверхностью, а точка O_2 совпадения во времени состояний S_1 и S_2'' – границе между чистой поверхностью и зоной газовых раковин. В итоге, по результатам расчета в поверхностном слое отливки могут существовать все три зоны, что и подтверждает рис. 4.13. Таким образом, был подтвержден вывод о том, что обоснованная муар-эффектом повышенная чувствительность ведет к нестабильности управления процессами литья. Повышение робастности (огрубление) управления в этом случае возможно путем снижения коэффициента перед x_d в (4.8). Для этого желательно применять технологические методы, например, повышение коэффициента температуропроводности формы a .

Система управления состоянием в реальном технологическом процессе изготовления отливки в разовой литейной форме проектируется в условиях существующих огра-

ничений как на реализацию тех или иных теоретически обоснованных внутренних и внешних воздействий на отливку, так и на используемые при этом формовочные и вспомогательные материалы.

Ограничения, связанные с выбором границ жизненного цикла объекта управления. На этапе охлаждения отливки в форме количество переменных, которые могли бы быть «избранными» в качестве управления, очень ограничено. Во многих случаях множество этих переменных лишено смысла, то есть управление процессом становится невозможным. Выход был найден путем распространения управления на этапы жизненного цикла системы «отливка – форма», предшествующих охлаждению отливки - вплоть до проектирования технологического процесса литья. В этих условиях стирается грань между проектированием, изготовлением и управлением, поскольку во многих случаях суть управления состоит в перепроектировании и переизготовлении системы или ее элементов. Последнее применяется в тех случаях, когда в качестве управления выступают параметры, определение которых традиционно относят к проектированию: размеры, материал, допуски, шероховатость поверхности и т.д.

Ограничения, связанные с выбором ОУ. При определении границ жизненного цикла важную роль играет выбор ОУ в АСУ. Например, если в качестве ОУ выбрать процесс изготовления конкретной отливки в конкретной литейной форме, то такие переменные, как толщина стенки формы или состав формовочной смеси не могут быть приняты как управление по той очевидной причине, что изменение толщины уже изготовленной формы и ее состав в реальном производстве невыполнимы. Если же рассматривать ОУ как процесс последовательных циклов (не менее двух), то изменение конструкции формы может быть управлением.

Таким образом, ОУ может быть представлен в АСУ на двух уровнях: «нижнем» – текущая система «отливка – форма» и все процессы, происходящие в ней, и «верхнем» – поток литейных форм (рис. 4.15).

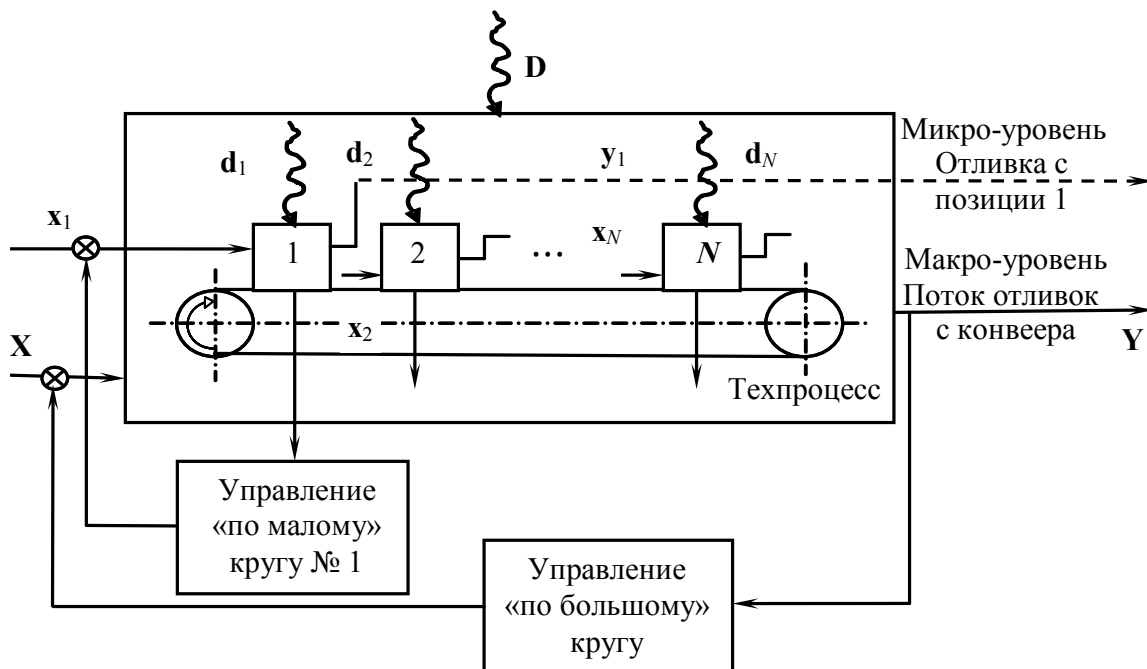


Рис. 4.15. Схема двухуровневой АСУ технологическим процессом изготовления отливки

Синхронизирующее управление требует выполнения специфической классификации дефектов поверхностного слоя отливок, которая учитывает различные аспекты их воз-

никновения и методов борьбы с ними. В частности, был предложен такой перечень классов, которые определяют, в итоге, выбор и построение соответствующей АСУ ТП литья.

1. По виду дефектов поверхностного слоя: отсутствие взаимного проникновения компонентов формы и отливки (без дефектов); проникновение металла отливки в форму (механический пригар); взаимодействие оксидов отливки с материалами формы (химический пригар); проникновение твердых компонентов в отливку (засоры); проникновение газообразных компонентов формы в отливку (газовые раковины).

2. По причинам возникновения дефектов поверхностного слоя: металлостатический напор выше суммы сил сопротивления формы; химические реакции между компонентами формы и отливки; давление газов в форме выше суммы сил сопротивления отливки; брак формы: недоуплотнение, трещины и тому подобное.

3. По этапам жизненного цикла процесса литья, в течение которого эти дефекты возникают: проектирование; смесеприготовление; изготовление формы; плавка; заливка; охлаждение отливки в форме; выбивка.

4. По подсистемам, в которых «зарождаются» предпосылки образования дефектов: термическая; массовая; химическая; термическая + массовая; термическая + химическая; массовая + химическая; термическая + массовая + химическая.

5. В зависимости от качества отливок от факта синхронизации особых состояний в подсистемах: зависят; не зависят.

6. По склонности состояний подсистем к муар-эффекту: склонны; не склонны.

7. По виду управления: перепроектирование; режимы смесеприготовления; режимы формообразования; режимы плавки; параметры заливки; параметры внешнего воздействия на систему «отливка – форма».

Предлагается универсальная модель процессов тепломассопереноса в системе «отливка – разовая литейная форма». Такой объект моделирования отличается запаздыванием, которое определяется временем, необходимым для протекания термических, химических и других процессов, а также временем, затрачиваемым на выявление и оценку результатов труда, нестационарностью и высокоинтенсивностью процессов, многослойностью системы «отливка – форма», подвижными границами. Согласно перечисленным характеристикам объекта, и с целью создания возможности использования для управления состояниями была разработана универсальная трифакторная, адаптивная компьютерная модель тепломассообмена в системе «отливка – разовая форма». Объект моделирования, как система, отличается структурой и параметрами элементов. Оба атрибута имеют непосредственный выход на технологию соответствующего способа литья, поэтому универсальная модель позволяет вносить изменения в свою структуру и параметры своих элементов, связанные с технологическими воздействиями на объект.

Моделирование технологического воздействия на объект на этапе проектирования. Фундаментальность модельного подхода на этапе проектирования следует из того, что все принятые при этом решения впоследствии, так или иначе, сказываются на структуре и параметрах моделей, создаваемых на следующих этапах. Так, при построении уравнений энергетического и материального балансов в значениях коэффициентов переноса (например, теплопроводности, температуропроводности, конвекции и т.д.) хранится информация о химическом и гранулометрическом составе смеси, принятом при проектировании технологии литья в разовые формы.

Моделирование технологического воздействия на объект на этапе изготовления. Изготовление разовых литейных форм чаще всего связано с тем или иным методом уплотнения, поэтому моделирование процесса изготовления сводится к построению модели уплотнения гетерогенных сред. Цель такого моделирования – получить связь между технологическими воздействиями на смесь (встряхивание, прессование, вибрация и т.д.) и параметрами переноса (эффективными коэффициентами теплопроводности и т.д.) материала формы. В дальнейшем эти параметры используются при работе с моде-

лями тепломассообмена в системе «отливка – форма». Таким образом прослеживается цепь «технология формообразования – свойства формы – качество отливки».

Для решения таких задач предложена двухуровневая модель уплотнения, адекватность которой подтверждена экспериментально.

Микроуровень. На микроуровне гетерогенная среда рассматривается в виде взаимодействующих кластеров гомогенной основы и капилляров, параметры переноса которых составляются по правилам объединения проводимостей параллельных и последовательных элементов. Исходное состояние модели – 4-мерная сетка из элементов с параметром проводимости (например, электрическим сопротивлением), что соответствует свойствам материала основы. Далее осуществляется моделирование уплотнения.

Макроуровень. Исходное состояние макромоделей – также 4-мерная сетка из элементов с параметром проводимости, соответствующим рассчитанным на микроуровне эффективным свойствам гетерогенного материала. Каждая итерация соответствует изменению размера области моделирования на один шаг решетки. Далее, на основании данных об эффективной проводимости для каждого текущего значения плотности, из полученных на микромоделей, исчисляется проводимость объекта в целом.

Моделирование технологического воздействия на объект на этапе заливки. В разработанной модели учет нелинейности параметров переноса осуществлялся путем перехода к автоматическому времени с перечислением этих параметров после каждой временной итерации и внесением соответствующего изменения в модель.

Положение зеркала металла в форме вдоль вертикальной оси x в конце каждой временной итерации рассчитывали по формуле:

$$x_i = x_{i-1} + \frac{l}{\rho} \int_{i-1}^i \int_{\tau-1}^{\tau} \frac{m(\tau)}{F(x)} dx d\tau, \quad (4.9)$$

где x_i, x_{i-1} – координаты зеркала на предыдущей и текущей итерациях, соответственно;

ρ – плотность металла;

τ_{i-1}, τ_i – временные границы итерации;

$m(\tau)$ – массовая скорость поступления металла в форму;

$F(x)$ – площадь горизонтального сечения системы «отливка – форма» на уровне x_i .

Граничные условия определяли, исходя из пяти вариантов контактной теплопередачи на границе «металл – форма» (рис. 4.16).

При заполнении формы коэффициент излучения, углы между поверхностями теплообмена, расстояние между их центрами, а, следовательно и угловой коэффициент непрерывно изменяются во времени, из-за чего выражение для теплообмена излучением приобретает вид:

$$q(\tau) = C_1(\tau) \left[\left(\frac{T_1(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(\tau)}{100} \right)^4 \right] \times \int_{F_1} F_1(\tau) d\tau \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1(\tau) \cos \varphi_2(\tau)}{\pi r^2} F_2(\tau) d\tau, \quad (4.10)$$

где $q(\tau)$ – тепловой поток, Дж/(м²·с);

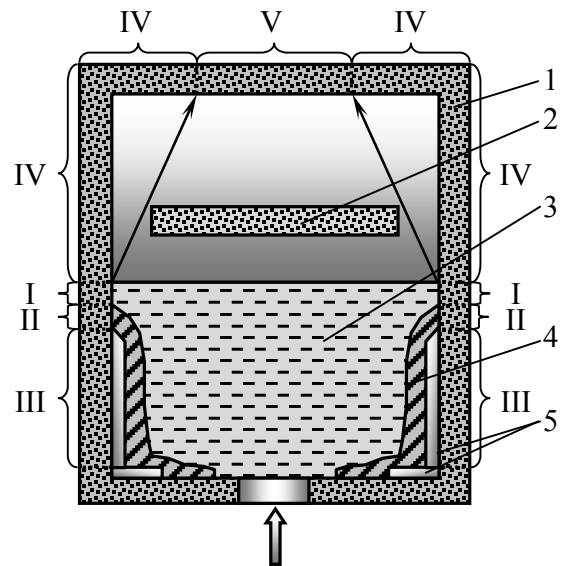


Рис. 4.16. Варианты условий нагрева формы в процессе заливки: 1 – форма; 2 – стержень; 3 – жидкий металл; 4 – затвердевшая корка; 5 – зазор; I – теплоотдача от жидкого металла; II – теплоотдача от твердого металла; III – теплоотдача от твердого металла сквозь зазор; IV – теплопередача излучением от зеркала металла; V – теплопередача к участку формы «в тени» стержня

- $C_1(\tau)$ – степень черноты поверхности излучения;
- $C_2(\tau)$ – степень черноты поверхности, на которую падает излучение;
- $F_1(\tau)$ – площадь поверхности излучения, m^2 ;
- $F_2(\tau)$ – площадь поверхности, на которую падает излучение, m^2 ;
- $\varphi_1(\tau)$ – угол наклона луча к поверхности, рад;
- $\varphi_2(\tau)$ – угол наклона луча к поверхности, рад.

Решение уравнения (4.10) относительно q позволяет решать задачи управления нагревом формы и охлаждения отливки, а относительно T_2 – управления температурой поверхности формы.

Зеркало жидкого металла площадью F_1 поднимается со скоростью v , отдавая при этом часть лучистой энергии внутренней поверхности формы площадью F_2 . За период времени $\tau \dots \tau_0$ от начала заполнения формы зеркало проходит некоторый путь $z \dots z_0$.

Полагая $T_1 = \text{const}$; $F_1 = \text{const}$; $F_2 = \text{const}$, найдем для общего количества тепла Q , полученного площадью F_2 формы за счет излучения от отливки:

$$Q = F_1 F_2 \int_{\tau_0}^{\tau_1} C_1(\tau) \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2(\tau)}{100} \right)^4 \right] \frac{x_0(z_0 - v\tau)}{\pi[x_0^2(z_0 - v\tau)^2]^2} d\tau. \quad (4.11)$$

Величина Q , в свою очередь, используется в известных соотношениях для нагрева стенки формы. Очевидно, что чем больше прогреется форма до контакта с металлом, тем медленнее будет остывать соответствующая часть отливки.

Уравнение (4.11), таким образом, позволяет рассчитывать скорость заливки для обеспечения необходимой скорости охлаждения отливки и тем самым управлять качеством последней.

Моделирование технологического воздействия на объект на этапе охлаждения отливки в форме. Построение модели рассмотрим на примере массовой подсистемы охлаждения отливки в песчано-смоляной оболочковой форме (рис. 4.17).

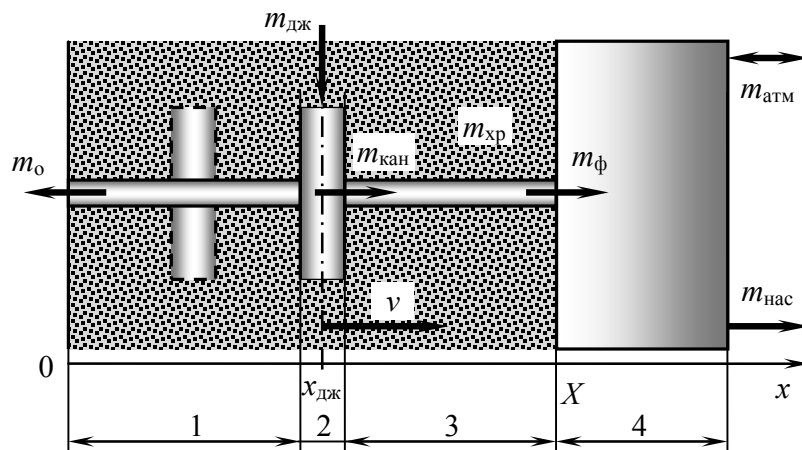


Рис. 4.17. Технологическая схема массообменных процессов в оболочковой форме

В контейнер (участок 4) воздух может поступать из окружающей среды, поскольку он не является герметичным, и направленно удаляться с помощью вакуумного насоса. Направление обмена газами контейнера со средой может изменяться на противоположное, если давление в нем превышает атмосферное, при этом, естественно, меняется и состав газа. В контейнер поступают также газы, выделяющиеся в литейной форме (участки 1, 2 и 3). В общей модели переноса через разовую литейную форму учитываются шесть видов газов: O_2 , N_2 , H_2O (пар), CO , CO_2 и H_2 . Схема параметрической дис-

кретно-непрерывной модели массообменных процессов в гетерогенной композитной среде с внутренними подвижными источниками представлена на рис. 4.18.

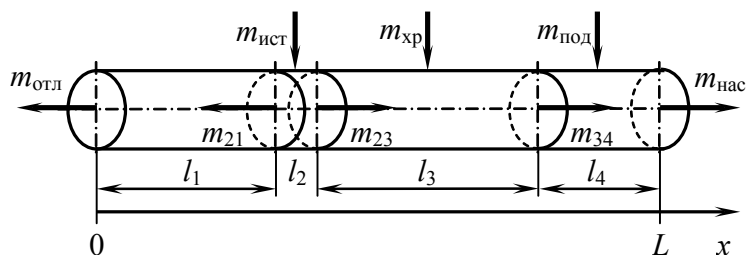


Рис. 4.18. Схема параметрической модели массообменных процессов в гетерогенной композитной среде с внутренними подвижными источниками: $m_{отл}$ – расход газа на пузыри, прорывающиеся в жидкий металл; $m_{ист}$ – газовая интенсивность источника; $m_{хр}$ – расход газа на химическую реакцию с другими компонентами; $m_{под}$ – подсос газа в контейнер из окружающей атмосферы; $m_{нас}$ – расход газа за счет откачки насоса; m_{21} – расход газа на левой (по рисунку) границе участка действия источника; m_{23} – расход газа на правой (по рисунку) границе участка действия источника; m_{34} – расход газа на границе между формой и полостью контейнера

Модель отражает массовый баланс одного произвольно выбранного компонента газовой смеси. Модель также предполагается одномерной, то есть такой, в которой векторы переменных состояния и градиенты свойств переноса расположены вдоль оси x . На схеме представлена «трубка тока» длиной L , направление оси которой совпадает с направлением оси x . Вдоль «трубки тока» выделены следующие участки: l_1 – участок формы между отливкой и источником газообразования, l_2 – участок действия источника газообразования, l_3 – участок формы между источником газообразования и контейнером и l_4 – участок контейнера. Принято также, что в пределах участков переменные состояния зависят только от времени.

Для построения динамической модели массообменных процессов в гетерогенной композитной литейной форме с внутренними подвижными источниками использовали уравнения массового баланса. Компьютерная реализация систем, приведенных выше, в зависимости от задач, решаемых на модели, выполнялась аналитически – с помощью стандартных пакетов для решения систем дифференциальных уравнений; на аналоговом компьютере (электрической модели) и с помощью схемотехнической САПР. Практическое использование симметричных свойств объектов моделирования основывалось на применении при построении и анализе моделей симметричных объектов и процессов математического аппарата теории групп.

Адекватность всех моделей подтверждена тем, что расхождение значений параметров процесса: температуры металла и давления в порах формы, полученных экспериментально и расчетами на модели не превышала 5 %.

Описывается автоматизированная система управления состояниями в разовой литейной форме (рис. 4.19).

Различия в подходах к управлению состояниями состоят в том, что выход объекта управления – $y(\tau)$ в классической системе управления, как правило, измеряется, а в управлении состояниями прогнозируется: величины $\tau_{s1}(\mathbf{u})$ и $\tau_{s2}(\mathbf{u})$ не могут быть измерены до достижения состояний S_1 и S_2 , соответственно, поэтому в системе управления *обязательно* должен быть прогнозатор; ОУ разделен, как минимум, на две подсистемы; в АСУ состояниями отсутствует задатчик параметров выхода $y_{зад}(\tau)$, а сравнение ведется не по фактическим и заданным выходам, а по времени достижения состояний в подсистемах.

Поскольку качество поверхностного слоя отливок не наблюдается во время их охлаждения в форме, к технологии литья в разовые формы применяли метод декомпо-

зиции, что позволило выявить вектор «внутренних» параметров процесса V : температуру смеси отсасываемых газов и парциальное давление CO в этой смеси. Важной особенностью этих параметров является то, что они доступны измерению в течение всего технологического процесса литья в разовую форму.

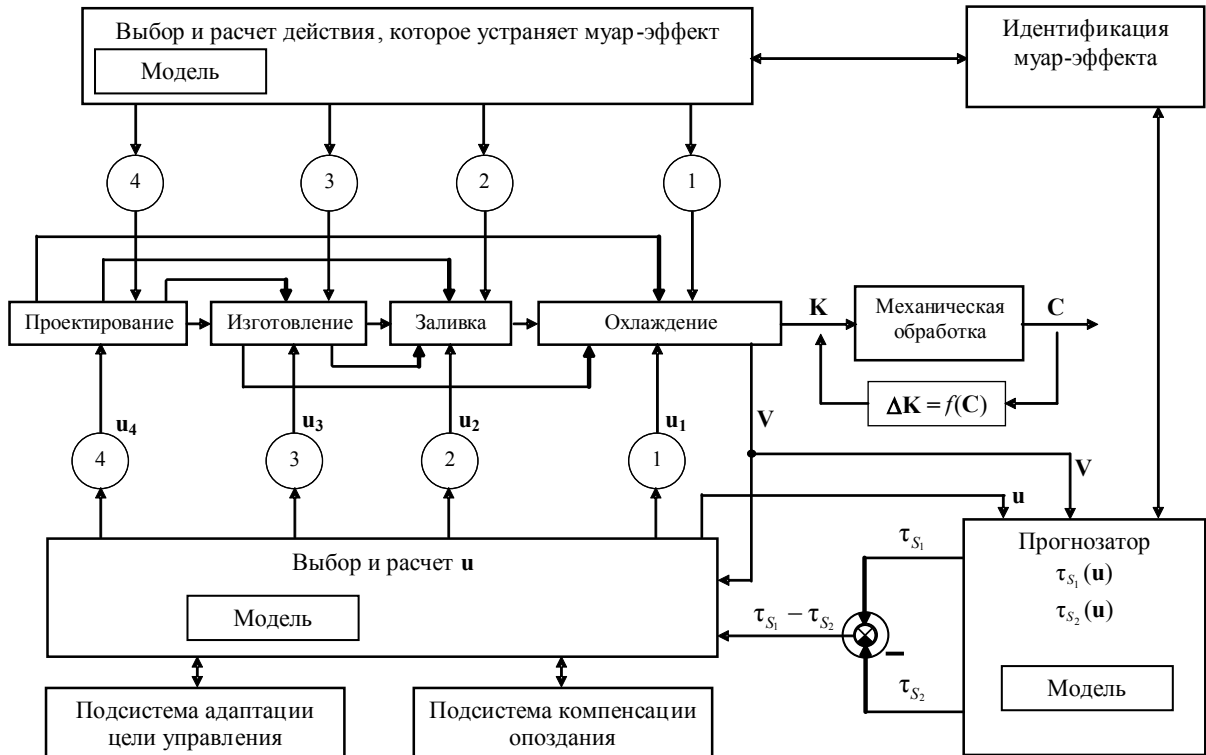


Рис. 4.19. Схема управления состояниями в процессе изготовления отливок в разовых формах

На рис. 4.19 обозначены четыре контура управления. Первый из них реализует управление параметрами вектора V с помощью параметров вектора u . В зависимости от возможностей управления, система сначала «пробует» управлять с помощью влияния на текущую отливку в форме (вектор u_1 , приоритет – 1). Если это не удастся, система переключается на вектор u_2 (приоритет – 2) и т.д. Второй контур с помощью имеющегося в нем прогнозатора времени достижения состояний осуществляет настройки блока управления первого контура таким образом, чтобы вектор качества K оказывался в конце каждого цикла процесса в пределах области качества. Третий контур управления идентифицирует возникновение муар-эффекта и использует влияние на объект (по приоритетам, как в первом контуре) для его устранения. И, наконец, четвертый контур управления – осуществляет коррекцию параллелограмма качества таким образом, чтобы соответствующая ему отливка проявляла в дальнейшем эксплуатационные свойства, которые гарантируют в конкретных условиях эксплуатации заданные параметры работоспособности.

Кроме перечисленных функциональных блоков, система управления содержит также подсистемы адаптации цели управления и компенсации запаздываний во входных и выходных цепях, а также в процессах литья.

Подсистема адаптации АСУ с этапами технологического процесса. Охлаждение стальной отливки в разовой форме удобно рассматривать как составной процесс с естественной частотой дискретизации на следующие этапы: охлаждение жидкого металла в форме, кристаллизация сплава, охлаждение отливки в твердо-жидком и в твердом состояниях.

На *первом этапе* управление должно обеспечивать его максимальную продолжительность, так как при этом осуществляется дегазация рабочего слоя формы с удалением образующихся газов; это предотвращает формирование многих поверхностных дефектов отливок.

С началом *второго этапа* – после образования корки твердого металла, то есть в самый опасный с точки зрения образования поверхностных дефектов период, критическим становится не скорость охлаждения отливки, а концентрация СО на границе «отливка – форма», поскольку именно от нее теперь зависит образования дефектов. Здесь осуществляется управление состояниями по описанным выше правилам.

На *третьем этапе* полностью затвердевшая отливка практически не поддается образованию упомянутых выше дефектов поверхностного слоя, и на первый план выходит снижение суммарного времени пребывания отливки в форме с целью повышения производительности труда.

Подсистема компенсации запаздываний в объекте и субъекте управления. При синтезе замкнутых систем управления процессами литья приходится сталкиваться со значительным временным запаздыванием как в получении информации о текущих результатах процесса (производительность, качество, экология и т.д.), так и в принятии и осуществлении непосредственного управляющего воздействия на объект. Для компенсации запаздывания использовали аналитические компенсаторы, действие которых основывалось на данных эксперимента, и компенсатор-прогнозатор на искусственной нейронной сети.

Блоки расчета времени достижения состояний и технологии компенсации муар-эффекта. В прогнозаторе осуществляется идентификация (теоретическая или, чаще всего, экспериментальная) зависимостей времени достижения состояний τ_{S_1} и τ_{S_2} от управления u . Естественно, что сами состояния должны быть названы, подсистемы, в которых они происходят, определены и управление избранное. Здесь, как правило, конкретные технологии литья широкий выбор пользователю, к сожалению, не предоставляют. Далее система проверяется на наличие муар-эффекта, и, если таковой имеется, разрабатываются технологические методы его устранения.

Рассмотрим пример литья в песчано-смоляные формы. Пусть выделены две подсистемы: термическая и массовая, их состояния: S_1 – начало кристаллизации отливки; S_2 – конец дегазации рабочего слоя формы и принято, что управление будет осуществляться за счет изменения температуры заливки $T_{\text{зал}}$. Пусть для некоторой гипотетической отливки и условий формообразования зависимости времени достижения состояний $\tau_{S_1}(T_{\text{зал}})$ и $\tau_{S_2}(T_{\text{зал}})$ имеют вид, представленный на рис. 4.20.

Пусть также расчетами на модели установлено, что синхронизация состояний S_1 и S_2 (точка O_1) происходит во время $\tau_{S_{до}}$ при значении $T_{\text{зал}} = T_{\text{зал}}^*$. Если угол α_1 между касательными в точке O_1 слишком мал (присутствует муар-эффект), то увеличить его можно, если изменить зависимость $\tau_{S_1}(T_{\text{зал}})$, например, на зависимость $\tau'_{S_1}(T_{\text{зал}})$ (пунктирная линия). При этом синхронизация состояний (точка O_2) будет достигнута другим значением управления: $T_{\text{зал}}^{**}$ и в другое время: $\tau_{S_{после}}$. Изменение крутизны кривой $\tau_{S_1}(T_{\text{зал}})$ на $\tau'_{S_1}(T_{\text{зал}})$ означает, что в новых условиях (то есть после применения методов борьбы с муар-эффектом) зависимость времени достижения состояния S_1 от $T_{\text{зал}}$ должна стать более существенной: при увеличении температуры заливки темп охлаждения тоже должен повышаться. Технологически это означает, что при повышении температуры заливки необходимо обеспечить ускорение остывания металла. Реально это можно осуществить,

внося в формовочной смеси различные добавки, разлагающиеся с поглощением тепла, применяя внешние регулируемые холодильники и тому подобное.

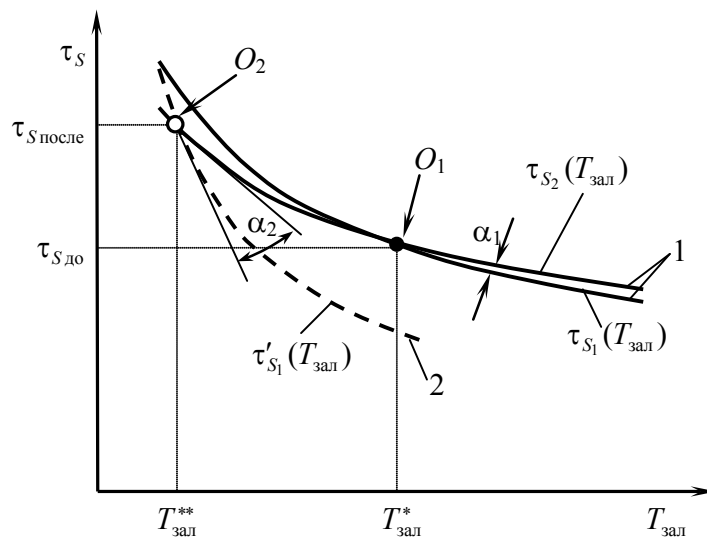


Рис. 4.20. Схема к объяснению пути устранения муар-эффекта технологическим методом: до устранения (1); после устранения(2)

Исследованы технологические методы управления состояниями в разовых литейных формах.

Литье в песчано-смоляные формы. Адекватность созданной универсальной модели и эффективность разработанной АСУ были подтверждены экспериментально. Для этого была использована технология литья в песчано-смоляные оболочковые формы с принудительной аспирацией газов из засыпки, в которой проблемы синхронизации состояний и муар-эффект проявляются наиболее ярко.

Выбор и классификация учтенных переменных процесса. Для управления состояниями учтенные переменные процесса литья в песчано-смоляные формы были классифицированы в соответствии со своей ролью в АСУ: переменные состояния; входа (параметры и управления); возмущение; выходы. Главными критериями отбора переменных в качестве управления были технологически обоснованные доступность для варьирования и измерения, а также их существенное влияние на переменные состояния.

На основании анализа экспериментальных данных (рис. 4.21) в качестве управления при литье в песчано-смоляные оболочковые формы с использованием аспирации газов из контейнера выбран такой легкодоступный для изменения и измерения параметр, как интенсивность аспирации газов q , а в качестве выхода – дефектность поверхностного слоя отливки «по пригару» D_1 и дефектность поверхностного слоя отливки «по раковинам» D_2 . Значение D_1 и D_2 определяли по разработанной методике численной оценки дефектности поверхностного слоя.

При этом существенную зависимость D_1 и D_2 от других переменных, что следует из экспериментальных данных, использовали как эффективный инструмент при компенсации муар-эффекта.

При лабораторных исследованиях и построении системы управления процессом литья, кроме перечисленных выше, использовали также промежуточные наблюдаемые переменные: температуру отходящих газов и парциальное давление углекислого газа в них. Измерение температуры газов и их химический анализ выполняли согласно разработанной методике непосредственно в трубопроводе, который соединял контейнер с вакуумным насосом.

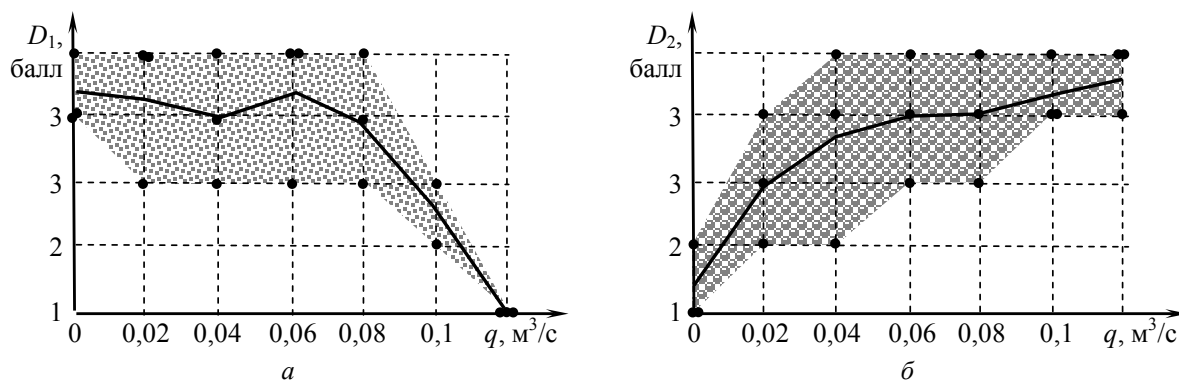


Рис. 4.21. Влияние интенсивности аспирации на качество поверхностного слоя отливки «по пригару» (а) и «по раковинам» (б)

Алгоритм исследования процесса литья в песчано-смоляные формы. Выбранный перечень переменных процесса, а также логика управления состояниями, изложенная выше, позволили предложить следующий алгоритм исследований процесса литья в песчано-смоляные формы, необходимых для организации и налаживания системы управления состояниями в системе «отливка – форма».

Шаг 1. Настроить модель. Для этого определить жизненный цикл объекта моделирования и его этапы: проектирование, изготовление формы, заливка, охлаждение отливки в форме; выделить подсистемы, которые учитываются: твердо-жидкий металл, зазор, форма, засыпка и установить значения всех параметров процесса.

Шаг 2. Ввести в модель значения базовых переменных процесса: температуру заливки, толщину формы, плотность материала готовой формы и концентрацию связующего.

Шаг 3. Выделить подсистемы: термическую и гидравлическую (массовую). Определить перечень учитываемых моделью переменных состояния подсистем: температуру отливки $T_{отл}(\tau)$ и давление в поверхностном (от отливки) слое формы $P_{\phi}(\tau)$. Рассчитать $T_{отл}(\tau)$ и $P_{\phi}(\tau)$ при пяти различных значениях управления q в диапазоне $q_{min} \dots q_{max}$.

Шаг 4. Провести плавки и измерить $T_{отл}(\tau)$ и $P_{\phi}(\tau)$ при тех же пяти значениях управления q . Сравнить данные, полученные расчетом на модели и экспериментом, и подтвердить адекватность модели.

Шаг 5. Если адекватность модели подтверждена, перейти к шагу 6, если нет, – к шагу 2.

Шаг 6. Определить особые состояния подсистем: $T_{отл} = T_{ликв}(S_1)$ и $P_{\phi} = P_{отт}(S_2)$.

Шаг 7. Осуществить преобразования от $T_{отл}(\tau)$ и $P_{\phi}(\tau)$ до $\tau_{S_1}(q)$ и $\tau_{S_2}(q)$.

Шаг 8. На пересечении $\tau_{S_1}(q)$ и $\tau_{S_2}(q)$ найти q^* .

Шаг 9. Провести эксперимент на пяти отливках при базовых параметрах процесса и q^* и оценить характеристики качества поверхностного слоя отливок.

Шаг 10. Если поверхностные слои всех отливок одинакового качества (т.е. при стабильных результатах), перейти к шагу 11, если различной (отсутствие стабильности при одинаковых условиях), – к шагу 12.

Шаг 11. Если поверхностные слои всех отливок имеют качество поверхностного слоя, которое соответствует значению $D_1 \leq 3$ и (или) $D_2 \leq 3$, то q^* найдено неверно. Перейти к шагу 6. Если $D_1 > 4$ и $D_2 > 4$, перейти к шагу 19.

Шаг 12. Начинаем искать муар-эффект. Для этого сначала нужно аппроксимировать пары точек уравнениями $\tau_{S_1}(q)$ и $\tau_{S_2}(q)$.

Шаг 13. Найти производные функции от этих уравнений $\frac{d[\tau_{S_1}(q)]}{dq}$ и $\frac{d[\tau_{S_2}(q)]}{dq}$.

Шаг 14. Рассчитать $\frac{d[\tau_{S_1}(q^*)]}{dq}$ и $\frac{d[\tau_{S_2}(q^*)]}{dq}$.

Шаг 15. Рассчитать разницу $\left| \arctg \left\{ \frac{d[\tau_{S_1}(q^*)]}{dq} \right\} - \arctg \left\{ \frac{d[\tau_{S_2}(q^*)]}{dq} \right\} \right|$ и сравнить эту

величину с заданным значением малого ε . Если она меньше ε , выдать сообщение о наличии муар-эффекта.

Шаг 16. Наметить изменения в технологии литья, с помощью которых будет принята попытка ликвидировать муар-эффект.

Шаг 17. Внести соответствующие изменения в значения базовых переменных.

Шаг 18. Повторить шаги 3 – 17.

Шаг 19. Выдать сообщение о найденном на шаге 8 значении q^* .

Результаты экспериментальных исследований практического применения предложенного алгоритма при управлении состояниями в системе «отливка – песчано-смоляная форма».

На первом этапе была построена компьютерная модель охлаждения отливки в песчано-смоляной форме.

На втором этапе в модель были введены базовые значения основных переменных процесса: огнеупорный наполнитель материала формы – песок 1K01A – 95 %; связующее: пульвербакелит – 5 %; плотность материала готовой формы – 1400 кг/м³; толщина формы – 0,02 м; температура заливки – 1823 К.

На третьем этапе с помощью модели были получены зависимости $T_{отл}(\tau)$ и $P_{\phi}(\tau)$ (рис. 4.22).

На четвертом этапе эти же соотношения получены экспериментально (точки на рис. 4.22). Как видно из рисунков, экспериментальные данные подтверждают адекватность используемой компьютерной модели.

На шестом этапе были определены особые состояния подсистем, подлежащих синхронизации. В термической подсистеме S_1 – это достижение температурой отливки температуры ликвидуса стали 35 – 1763 К. В массовой подсистеме S_2 – достижение давления в порах формы у отливки, значение $P_{отг}=215$ Па.

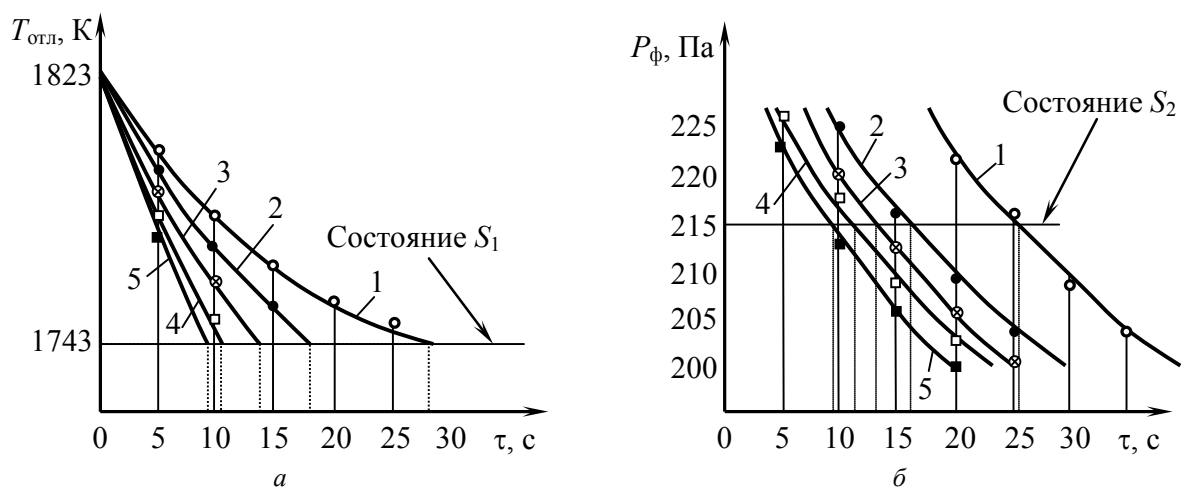


Рис. 4.22. Кинетика изменения температуры отливки (а) и давления в форме (б) при q : 0,02 (1); 0,04 (2); 0,06 (3); 0,08 (4); 0,1 м³/с (5)

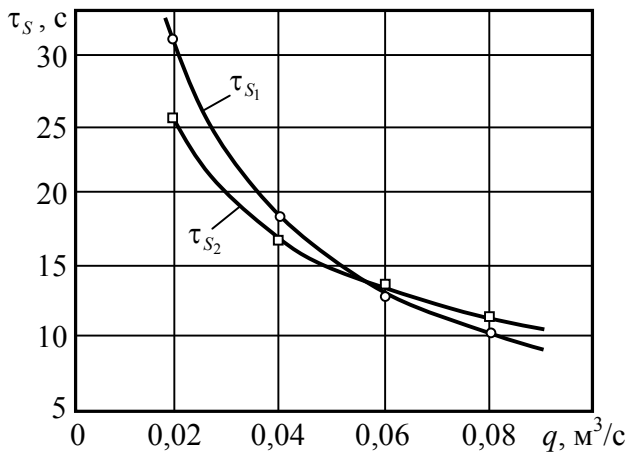


Рис. 4.23. Зависимость времени достижения особых состояний S_1 ($T_{отл}=1743$ К) и S_2 ($P_{ф}=215$ Па) от величины управления – интенсивности аспирации газов из формы q

На седьмом этапе по описанной методике было осуществлено преобразование от $T_{отл}(\tau)$ и $P_{ф}(\tau)$ к $\tau_{S_1}(q)$ и $\tau_{S_2}(q)$. Его результаты приведены на рис. 4.23. Как видно из рисунка, кривые пересекаются при $q=q^*=0,06$ м³/с, что свидетельствует о синхронизации событий S_1 и S_2 . В окрестности этой точки можно ожидать получения стальных отливок с поверхностным слоем, лишенным дефектов. Большой разброс значений показателей качества и малый угол пересечения кривых на рис. 4.23 позволяют предположить наличие муар-эффекта при управлении процессом путем синхронизации состояний.

Для доказательства этого на двенадцатом этапе пары значений $\tau_{S_1}(q)$ и $\tau_{S_2}(q)$ с этого же рисунка аппроксимировали выражениями: $\tau_{S_1} = 0,58/q + 3,5$ и $\tau_{S_2} = 0,369/q + 7,05$.

Дифференцируя на тринадцатом этапе эти выражения по q , получим углы наклона соответствующих касательных в точке q^* (четырнадцатый этап): $\alpha_1 = -89,6^\circ$; $\alpha_2 = -89,44^\circ$. На пятнадцатом этапе определим модуль разницы между этими углами: $|\alpha_1 - \alpha_2| = 0,16^\circ$. Как видим, эта величина весьма мала, что подтверждает наше предположение о наличии муар-эффекта.

Далее, в соответствии с шестнадцатым этапом, наметим пути борьбы с муар-эффектом. Из рис. 4.23 следует, что одной из причин муар-эффекта является то, что зависимость времени наступления обоих состояний от интенсивности аспирации q носит убывающий характер. Очевидно, если бы удалось добиться, чтобы одна из кривых, например, $\tau_{S_1}(q)$, возрастала при увеличении q , величину $|\alpha_1 - \alpha_2|$ можно было бы существенно увеличить и тем самым избавиться от негативного влияния муар-эффекта.

На практике это означает, что при увеличении интенсивности аспирации охлаждение отливки должно замедляться. Такое парадоксальное поведение системы «отливка – форма» возможно в том случае, если теплоаккумулирующая способность формы с увеличением интенсивности аспирации начнет уменьшаться. Этот эффект может наблюдаться в случае, когда увеличение аспирации приводит к усилению выделения тепла внутри формы, например, за счет интенсификации процессов окисления.

Механизм аномального массопереноса в стенке песчано-смоляной оболочковой формы. При деструкции смоляного связующего выделяются горючие компоненты, которые при окислении выделяют много тепла. Этот процесс лимитирует недостаток кислорода в порах формы. Поэтому, для того, чтобы увеличение аспирации приводило к усилению экзотермического эффекта внутри формы, необходимо создать парадоксальную ситуацию: аспирация газов из формы должна приводить к увеличению в ней кислорода.

Это явление дополнительно способствует повышению качества стальных отливок, получаемых в оболочковых формах, так как приводит к окислению СО за счет изменения восстановительной атмосферы вблизи отливки на окислительную, что, как извест-

но, приводит к уменьшению вероятности образования дефектов поверхностного слоя типа «апельсиновая корка».

Таким образом, в стенке литейной формы после заливки ее металлом протекают три основных газокINETических процесса: газовыделение в результате химических и физических процессов, конвективный перенос от отливки, перенос к отливке. Естественно предположить, что интенсивный подсос воздуха в контейнер повышает градиент концентрации кислорода в форме, ускоряя тем самым перенос кислорода через форму к отливке.

Использование механизма аномального массопереноса в борьбе с муар-эффектом. Основываясь на предложенном механизме, можно сделать вывод о том, что любое технологическое влияние, которое увеличивает массоперенос кислорода, должно интенсифицировать зависимость тепловыделения в форме от аспирации газов из контейнера, а, следовательно, и снизить скорость охлаждения отливки.

Наиболее эффективного воздействия такого типа можно ожидать от снижения плотности оболочковой формы одного и того же зернового состава за счет уменьшения внешнего уплотняющего воздействия на песчано-смоляную смесь во время формообразования.

Поэтому на семнадцатом этапе в значения базовых переменных ввели изменение: снизили плотность формы с 1400 до 1200 кг/м³.

После повторения этапов три – пятнадцать получили следующий результат (рис. 4.24).

Как видим, в этом случае синхронизация может быть достигнута при двух разных значениях управления q^* 0,027 и 0,056 м³/с. Однако в первом случае вероятность возникновения муар-эффекта значительно выше, и для практического использования рекомендуется второе значение q^* .

В соответствии с этим влияние интенсивности аспирации на качество поверхностного слоя отливки «по пригару» и «по раковинам» имеет значительно более стабильный вид (рис. 4.25).

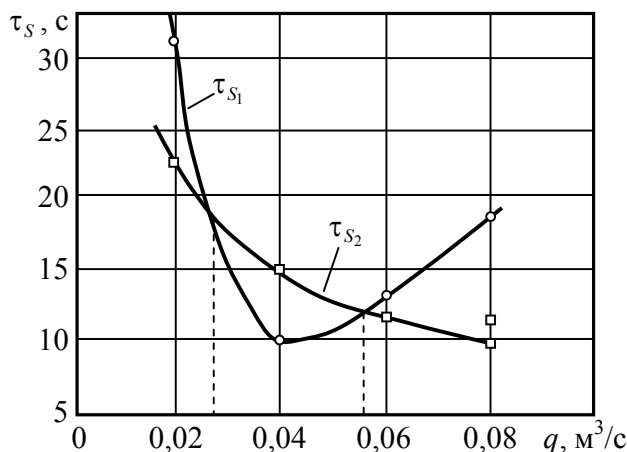


Рис. 4.24. Зависимость времени достижения особых состояний S_1 ($T_{отл}=1743$ К) и S_2 ($P_{\phi}=215$ Па) от величины управления – интенсивности аспирации газов из формы (при $\rho_{\phi}=1200$ кг/м³)

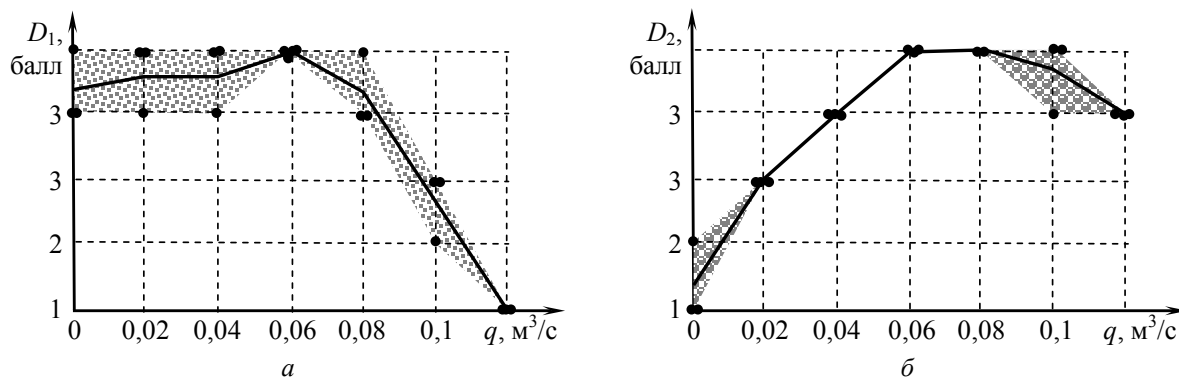


Рис.4.25. Влияние интенсивности аспирации на качество поверхностного слоя отливки «по пригару» (а) и «по раковинам» (б) при $\rho_{\phi}=1200$ кг/м³ и $q^*=0,056$ м³/с

Построение АСУ ТП. Рассчитанное значение q^* необходимо поддерживать в процессе работы. Кроме того, это значение подлежит корректировке, если меняются значения базовых или других параметров, которые влияют на процессы в системе «отливка – форма». Как указывалось выше, такие корректировки выполнялись с помощью АСУ ТП с обратной связью по промежуточным параметрам: температуре $T_{ВГ}$ и парциальном давлении СО $P_{ВГ}$ в отходящих газах.

Схема АСУ ТП двухконтурная: первый контур обеспечивает поддержку на промежуточном выходе значений $T_{ВГ}$ и $P_{ВГ}$, которые попадают в «область качества», гарантирует соответствующее качество отливок на выходе процесса, а второй – определение границ «области качества» $T_{ВГ\min}$, $T_{ВГ\max}$ и $P_{ВГ\min}$, $P_{ВГ\max}$, которые, в свою очередь, гарантируют качество отливки. Важным элементом АСУ являются прогнозаторы, которые в работе были построены на искусственных нейронных сетях.

Управление состояниями состояло в определении такого значения управления $v_H - \Delta v_H$, которое обеспечивало синхронизацию: $\tau_{s_1} - \tau_{s_2} \leq \varepsilon$.

Литье в керамические формы. Метод флотационной очистки отливок от неметаллических включений при литье в формы из Шоу-керамики является ярким примером управления состояниями, поскольку предполагает синхронизацию состояний первого рода - всплывание пузырька газа, выделяющегося из формы в полость, которая образуется между ее рабочей поверхностью и оксидной пленкой на поверхности отливки, и начала кристаллизации сплава. Преобладающим браком отливок являются поверхностные оксидные пленки, а также пленки, «застрявшие» в теле отливки при вынесении их всплывающим пузырьком газа.

Химический состав пленок содержит, в основном, оксиды железа и кремния, сульфиды и оксисульфиды. Они образуются, пока металл еще жидкий. Поэтому так важно синхронизировать состояния: металл должен быть еще жидким, чтобы пузырьки газа с неметаллическими включениями всплыли, но, с другой стороны, металл должен быстро затвердеть. Желательно, чтобы после всплывания последних пузырьков начался процесс кристаллизации. Однако результат такого управления был недостаточно эффективным, поскольку не учитывался муар-эффект, связанный с наличием третьего состояния – достижения необходимой вязкости расплава.

В результате, при недостаточной вязкости пузырек, всплывая, просто прорывал пленку, а при избыточной – не мог «сорвать» ее с поверхности металла.

Литье по выплавляемым моделям. Наиболее эффективно синхронизирующее управление при литье по выплавляемым моделям проявляется на этапе формообразования, в частности, при сушке керамических форм. Интенсивность сушки лимитируется скоростью перемещения влаги из глубинных слоев материала к поверхности. Этот процесс определяется структурой формовочного материала, энергией связи влаги с материалом и другими факторами. Переход влаги в парообразное состояние ведет к заметному увеличению объема и, как следствие, появлению в объеме формы разного рода трещин.

В последнее время широкое распространение получила СВЧ-сушка керамических оболочковых форм, которая обеспечивает достаточно равномерный их нагрев по всему объему. При таком нагреве обеспечивается высокая размерная точность форм, чаще всего недоступная другими методами. Однако процесс сушки при этом обязательно должен идти при безопасном градиенте влажности (перепад не более 7...9%), что является основным условием для предупреждения появления внутренних напряжений, которые вызывают растрескивание оболочковой формы.

Таким образом, подсистемами, состояния которых подлежат синхронизации при литье по выплавляемым моделям, является термическая и гидравлическая. Переменные состояния в первой – температура, во второй – влажность оболочки. Особыми состояниями, подлежащими синхронизации являются: S_1 – «разница между температурой внутреннего и внешнего слоев ΔT равна 10 К», S_2 – «разница между влажностью внутреннего и внешнего слоев ΔW равна 5 %». Управлением для обеих подсистем является время включения и выключения СВЧ-нагрева.

Литье в песчано-глинистые формы. Образование дефектов поверхностного слоя отливок при литье в песчано-глинистые формы зачастую также связано с несогласованностью различных процессов, протекающих в системе «отливка – форма». В частности, одной из причин образования подкорковых газовых раковин, вскрывающихся при механической обработке, является «застывание» пузырьков газа, проникающих из формы к отливке, которая начала затвердевать.

В этих условиях синхронизация состояний термической и газовой подсистем за счет внешнего управления может улучшить качество отливок. Организовать такое управление при литье в песчано-глинистые формы в реальных производственных условиях, как правило, не удастся, поэтому пришлось прибегнуть к описанному выше перепроектированию, то есть воздействовать на объект на ранних стадиях его жизненного цикла, когда создается технология формообразования.

Литье по газифицируемым моделям. Качество отливок при литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) определяется, в основном, процессами, которые протекают при заливке. В то же время, управление заливкой при ЛГМ затруднено большим разнообразием факторов, влияющих на конечный результат. К сожалению, сложность и многофакторность процесса приводит к нестабильности качества отливок.

Синхронизации в случае ЛГМ подлежат следующие состояния: заданный уровень зеркала металла в форме S_1 , заданная степень газификации модели S_2 и заданная газопроницаемость формы S_3 . Именно совпадение во времени этих состояний, а не оптимизация их параметров, гарантирует получение отливок с высоким качеством поверхности.

Обеспечить стабильность описанного выше совпадения состояний обычными технологическими методами достаточно трудно, поэтому при изготовлении отливок отмечается высокое количество брака и отсутствие видимой связи между условиями литья и качеством отливок. Это объясняется муар-эффектом.

Отсутствие адекватных задач управлений, необходимость «перманентной» синхронизации и муар-эффект привели к тому, что в последнее время предложено заменить традиционный гравитационный способ подвода металла при ЛГМ принудительным, когда металл в полость формы попадает снизу под действием поршня, движущегося со скоростью V_{II} . Эту величину и выбрали в качестве управления. Для устранения муар-эффекта в этом случае подходят любые технологические методы, в частности, повышение температуры заливки, увеличение начальной газопроницаемости формы, и тому подобное.

Экологические аспекты внедрения разработанных мероприятий. Результаты работы имеют дополнительный положительный эффект. Так, исследуя эффекты влияния аспирации газов из контейнеров с залитыми оболочковыми формами, контролировали изменение во времени концентрации удаляемых веществ. Результаты свидетельствуют, что применение системы аспирации существенно снижает уровень выделения токсичных веществ в воздух. В условиях литья с включенной системой аспирации содержание в воздухе рабочей зоны фенола и формальдегида не превышало ПДК. По сравнению с условиями литья при отключенной системе аспирации в воздухе рабочей зоны содержалось в 4,5 раза меньше оксидов азота, в 22 раза – аммиака, отсутствовали бензол, толуол, крезолы, гексан.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для постановки и решения задачи управления процессами, которые происходят в системе «отливка – форма», с целью предотвращения образования дефектов в поверхностном слое отливок установлены следующие особенности:

– результаты литья в разовые формы отличаются нестабильностью – при внешне одинаковых условиях наблюдаются неодинаковые для различных отливок результаты с точки зрения качества поверхностного слоя отливок из железоуглеродистых сплавов;

– на сегодняшний день не существует универсальной модели процессов тепломассообмена в системе «отливка – разовая литейная форма», что не позволяет построить систему управления этими процессами, которая бы учитывала специфику объекта управления для различных типов отливок.

2. Для разработки и внедрения эффективного метода управления тепломассообменом в литейной форме созданы теоретические основы синхронизирующего управления:

– введено понятие особых состояний в подсистемах общей системы «отливка – форма», которое позволяет рассмотреть новый подход к цели управления, когда на первый план выходит задача синхронизации во времени этих состояний;

– предложено преобразование полученных экспериментально математических моделей объектов литейного производства, которое заменяет модели в виде зависимости состояний (температуры, давления и т.д.) от времени на значительно более информативные с точки зрения эффективности управления модели в виде зависимости времени достижения особых состояний от параметров управления, что позволило установить причины возникновения дефектов поверхностного слоя отливок и нестабильности процесса литья в разовые формы, а также предложить технологические методы устранения таких дефектов;

– введено понятие «муар-эффекта» при синхронизации состояний, которое заключается в значительной зависимости координаты пересечения графиков двух функций состояния от малого смещения одного из них, если угол между этими графиками (или причастными к графикам) у точки пересечения слишком мал, и установлено, что такое явление приводит, например, при литье в песчано-смоляные формы железоуглеродистых сплавов к нестабильности результатов мероприятий по повышению качества поверхностного слоя отливок;

3. Для автоматизированной синхронизации состояний с целью повышения качества поверхностного слоя отливок из железоуглеродистых сплавов:

– предложена, создана и посредством сравнения результатов компьютерных и экспериментальных исследований на оригинальной установке для литья железоуглеродистых сплавов в песчано-смоляные формы подтверждена адекватность универсальной модели, которая учитывает запаздывание, нестационарность, высокоинтенсивность, многослойность объекта моделирования и подвижные границы между его отдельными элементами;

– обоснованы концепции моделирования процессов тепломассопереноса в системе «отливка – разовая литейная форма» на всех этапах жизненного цикла, который был распространен на стадии проектирования и изготовления, разработаны необходимые для компьютерной реализации алгоритмы и программы;

– разработана система компенсации запаздывания в звеньях АСУ ТП литья с помощью прогнозатора на искусственных нейронных сетях.

4. На технологическом уровне синхронизирующего управления процессами тепломассообмена в системе «отливка – разовая форма»:

– на основании анализа экспериментальных данных в качестве управления дефектностью поверхностного слоя отливок из железоуглеродистых сплавов при литье в песчано-смоляные оболочковые формы с использованием аспирации газов из контейнера

выбран такой легкодоступный для изменения и измерения параметр, как интенсивность аспирации, а для компенсации муар-эффекта – меры, с помощью которых повышение интенсивности аспирации газов из контейнера приводит к замедлению охлаждения отливки;

– предложен алгоритм исследования технологии литья железоуглеродистых сплавов в песчано-смоляные формы, который позволил на основании расчетов и экспериментов определить оптимальное (синхронизирующее) значение управления параметрами технологии: при синхронизации состояний S_1 ($T_{мет}=T_{ликв}$) и S_2 ($P_{ф}=215$ Па), величина управления – интенсивность аспирации газов из формы $q=0,06$ м³/с, выявить муар-эффект и обосновать технологические средства борьбы с ним за счет снижения плотности оболочковой формы от 1400 до 1200 кг/м³;

– разработаны технологические процессы управления качеством поверхностного слоя железоуглеродистых стальных отливок при литье в керамические и песчано-смоляные формы, литье по выплавляемым моделям: обоснован выбор подсистем и особых состояний, переменных состояний в подсистемах, определены параметры управления и разработаны методы борьбы с муар-эффектом.

5. При практическом использовании результатов работы получены следующие результаты:

– на Миргородском ВО «Миргородпромарматура», Одесском заводе «Центролит», Одесском ПО «Завод сельскохозяйственного машиностроения», Харьковском тракторном заводе, Одесском НПО «Кислородмаш», Днепропетровском тепловозоремонтном заводе при разработке технологических процессов получения отливок были реализованы результаты работы; при этом расчетный годовой экономический эффект составил около 200 тыс. руб., а экономический эффект от природоохранных мероприятий – около 800 тыс. руб. в ценах 1990 г.;

– в НПО «НИИСЛ» были проведены эксплуатационные испытания системы проектирования технологии изготовления отливок из стали 35Л в песчано-глинистых формах; установлено, что применение указанной технологии позволило снизить брак по пригару на 24,2 % от общего брака;

– в Харьковском государственном авиационном производственном предприятии внедрение автоматизированной системы управления интенсивностью теплообмена в системе «стальная отливка – оболочковая керамическая форма» позволило получить экономический эффект в сумме 147 грн. (в ценах 2003 г.) в одну тонну годного литья за счет синхронизации достижения температурой и влажностью слоев формы при прокаливании значений, гарантирующих отсутствие недопустимых механических напряжений в форме;

– в литейном цехе Килийского судоремонтного завода были проведены производственные испытания АСУ технологическим процессом изготовления железоуглеродистых отливок в песчано-глинистых формах, основанной на новых методах управления теплообменом в системе «отливка – форма», что позволило сократить брак литья по раковинам на 28,5 % по счет создания оптимальных термических условий охлаждения отливки и газового режима литейной формы.

4.3. Получение отливок с качественной поверхностью при литье черных металлов в формы на термореактивных связующих

Основными условиями получения отливок без газовых раковин и пригара при литье в оболочковые формы являются высокая газопроницаемость формы, направленный газовый поток, малая металлопроницаемость поверхностного слоя формы и затвердевание отливки в контакте с негазотворной поверхностью.

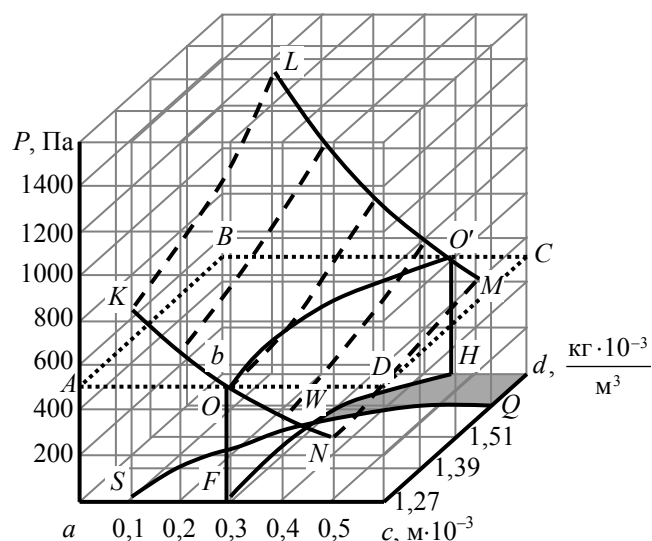


Рис. 4.26. Влияние зернистости песка и плотности формы на давление газов в порах

Вероятность образования дефектов при существующем технологическом процессе иллюстрирует рисунок 4.26.

На рисунке показано влияние зернистости песка и плотности формы на величину газового давления (поверхность $KLMN$). Концентрацию связующего для каждой фракции песка определяли экспериментально таким образом, чтобы прочность всех образцов на разрыв была равной 3,5 МПа. Одновременно с измерением давления отмечали, при каких его значениях на зеркале жидкого металла наблюдается «вскип» (плоскость $ABCD$). Пересечение поверхности $KLMN$ и плоскости $ABCD$ – линия OO' , своей проекцией FH делит плоскость $ABCD$ на две зоны: слева (по рисунку) расположена область, благоприятствующая образованию

поверхностных газовых дефектов. На том же рисунке линия SQ делит плоскость $ABCD$ на другие две зоны: правее линии SQ находится зона, благоприятствующая образованию пригара.

Таким образом, существует лишь относительно небольшая зона QWH , в которой получали отливки без указанных выше дефектов. Однако, существование этой зоны обусловлено малой величиной металлостатического напора в условиях эксперимента (0,02 м). Увеличение металлостатического напора приводит к смещению линии SQ влево, так что при литье стальных отливок в оболочковые формы зоны образования дефектов перекрывают всю плоскость $ABCD$, и получение качественных отливок в этом случае невозможно.

Для расширения «качественной» зоны QWH необходимо сдвигать линию FH влево, а линию SQ – вправо. Это может быть достигнуто снижением давления газов в порах формы и повышением плотности ее рабочего слоя.

При применении тонких (0,005 м) форм и перегретого (1975 К) металла получают стальные отливки без поверхностных газовых дефектов. Аналогичное улучшение наблюдали у отливок, полученных в облицованных тонким (0,005 м) слоем песчано-смоляной смеси формах из стали и шамота. Решающим условием улучшения качества поверхности таких отливок является дегазация рабочего слоя формы до начала кристаллизации металла.

Если толщина отливки меньше учетверенной толщины формы, кристаллизация происходит одновременно с выделением газов из глубинных слоев формы, что приводит к поверхностным газовым дефектам.

Для обеспечения кристаллизации отливок толщиной 0,02...0,03 м в контакте с не-газотворной поверхностью формы необходимо, чтобы толщина газотворной части формы не превышала 0,005...0,008 м. При толстостенных формах необходимы меры против проникновения газов из глубинных слоев формы к отливке.

В качестве таких мер предложены и разработаны противогазовые барьеры между рабочим и опорным слоями формы. Применение барьеров исключает не только механическое, но и химическое взаимодействие металла с газами.

Снижение металлопроницаемости формы возможно двумя путями – уменьшением размера зерна и уплотнением. При этом достаточно изменения только поверхностного слоя формы. В первом случае получается двухслойная форма с различной зернистостью слоев. Уплотнение плакированных песчано-смоляных смесей в период прогрева связующего до температур наибольшей текучести сопровождается изменением упаковки и сближением зерен песка за счет перетекания связующего в поры. При этом размер пор уменьшается. Такое уплотнение приводит к повышению плотности с 1270 до 1720 кг/м³ и, с точки зрения металлопроницаемости, заменяет измельчение зерна с 0,4 до 0,063.

Поэтому обычную двухслойную оболочковую форму с различной зернистостью слоев можно заменить двухслойной формой с различной плотностью слоев. Изготовление такой формы из единой смеси не требует двух различных смесей и двойного бункерования. Уплотнение рабочего слоя одновременно позволяет улучшить воспроизводимость формой рельефа модели.

Из условий формирования отливок с качественной поверхностью вытекают следующие задачи: исследование процесса изготовления отливок в тонкостенных армированных оболочковых формах, создание направленного газового потока в формах за счет применения противогазовых барьеров и дегазации рабочего слоя формы жидким металлом к моменту начала кристаллизации, а также создание из единой смеси двухслойных оболочковых форм с металлонепроницаемым рабочим слоем.

При формообразовании бункерным методом между моделью и бункером устанавливали решетку ребер, окантованную обечайкой. К концу цикла формообразования армирующая оснастка остается частично внутри песчаной части формы. Это позволяет снизить ее толщину с 0,035 до 0,008 м.

Кинограммы процесса падения смеси на вертикальные ребра показали, что значительная часть кинетической энергии падения расходуется у ребер, и слой, образующий рабочую поверхность формы остается недоуплотненным, особенно под ребрами. Установлено, что средняя плотность участков формы под ребрами d_{cp} зависит от толщины ребра t , расстояния между ребром и моделью H и насыпной плотности смеси d_{min} по уравнению:

$$d_{cp} = K_p d_{min} \left(1 - 0,122 \frac{t}{H} \right). \quad (4.12)$$

Коэффициент K_p определили экспериментально. Для этого плотность измеряли емкостным методом. Обработка полученных данных позволила предложить формулу для вычисления плотности исследуемого фрагмента оболочковой формы:

$$d_{cp} = 93 \cdot 10^{12} \cdot C \cdot H \cdot S^{-1} - 774, \quad (4.13)$$

где C – измеренная емкость конденсатора, в котором фрагмент формы является диэлектриком;

S – площадь обкладок конденсатора.

Погрешность определения плотности емкостным методом не превышает 2-3%. Установлено, что величина K_p зависит от H ($0,002 \leq H \leq 0,01$; $0,01 \leq t \leq 0,02$):

$$K_p = 1,19 + 5,575 \cdot 10^{-6} \cdot H^{-2}. \quad (4.14)$$

Окончательно:

$$d_{cp} = 1270 \cdot (1,19 + 5,575 \cdot 10^{-6} \cdot H^{-2}) \left(1 - 0,122 \frac{t}{H} \right). \quad (4.15)$$

Средняя плотность участков готовой армированной оболочковой формы под ребрами может быть определена также непосредственным измерением электрической емкости между нижними гранями ребер и моделью с пересчетом по номограмме (рис. 4.27). Для этого на осях H и C номограммы откладывают соответственно расстояние между ребрами и моделью и измеренное значение емкости конденсатора, а на оси S –

суммарную площадь нижних граней ребер. Затем точку пересечения линии HC с промежуточной осью P соединяют с отложенным значением S и продолжают линию PS до пересечения с осью d .

Емкостный метод измерения плотности целесообразно применять тогда, когда расчет по формуле (4.15) затруднен, например, при разных толщинах ребер в пределах одной армирующей оснастки.

На рис. 4.28 показана зависимость плотности участков формы под ребрами от расстояния между ребрами и моделью для различных значений толщины ребра. Экспериментальные данные совпадают с результатами, полученными по формуле (4.15).

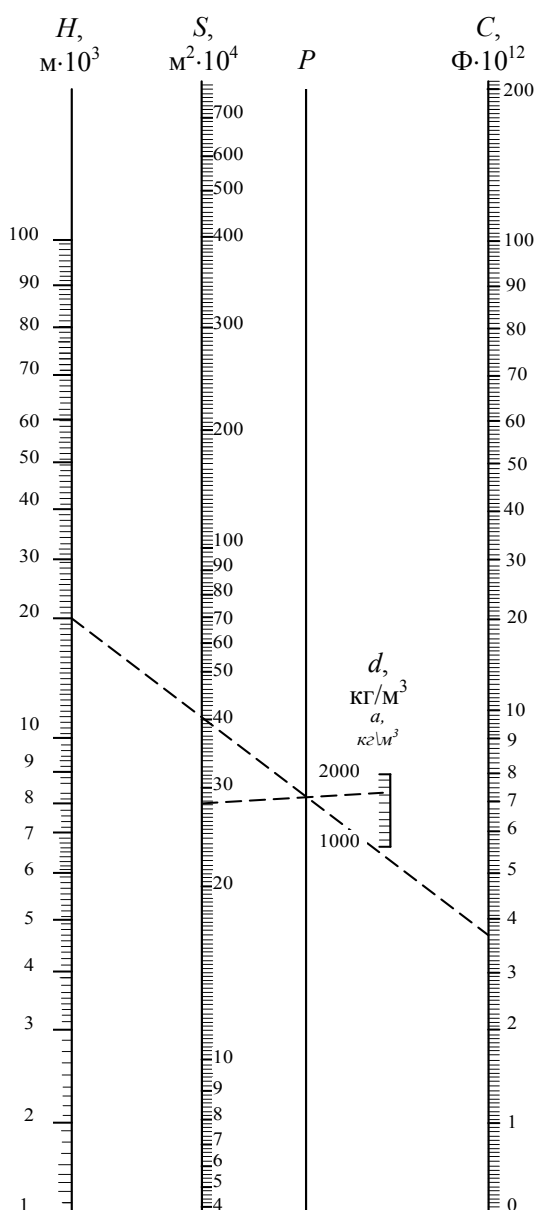


Рис.4.27. Номограмма для расчета плотности оболочковых форм

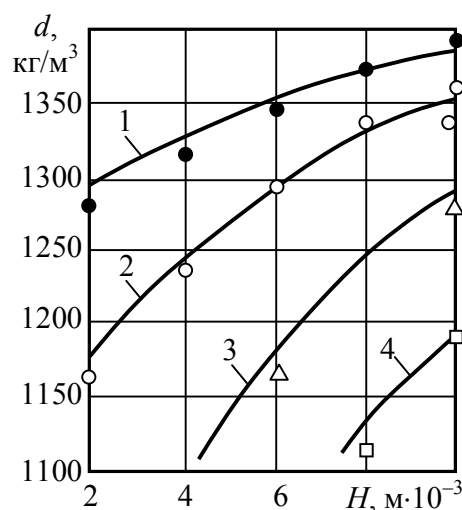


Рис. 4.28. Влияние расстояния между ребрами и моделью на плотность участков формы под ребром при толщине ребра H : 0,01 (1); 0,012 (2); 0,015 (3); 0,02 м (4)

Стремление уменьшить толщину песчаной части формы до 0,006...0,008 м приводит к уменьшению величины H до 0,003...0,004, что при толщине ребра более 0,01 м и влечет незаполнение смесью участков под такими ребрами, особенно в местах их пересечения, и брак формы. Эта задача решается применением дополнительного внешнего уплотняющего воздействия.

При этом эффективным способом такого воздействия является вибрация. Исследования средней плотности участков форм в тени ребер при различных методах уплотнения показали, что при вибрации (амплитуда 0,001 м, частота 50 Гц) и толщине ребра 0,01 м достигаются плотности до 1684 кг/м³, близкие плотностям при уплотнении без ребер.

Установлено, что при расстоянии от ребра до модели 0,004 м толщина ребра не должна быть больше 0,01 м. Меньшие толщины нетехнологичны при изготовлении литой оснастки.

Оптимальным (с точки зрения прочности формы и расхода смеси) является расстояние между ребрами в пределах 0,12...0,15 м.

Для предохранения от проникновения к отливке газов из глубинного слоя формы создавали противогазовый барьер.

На рис. 4.29 показано давление газов в рабочем слое оболочковой формы. Кривая 1 рисунка соответствует давлению в оболочковой форме без барьера, кривая 2 – с барьером из кварцевого стекла толщиной 0,003 м. Обе кривые имеют обычно наблюдаемые два максимума; в дальнейшем ход кривых отличается качественно: если при отсутствии барьера давление, близкое по величине ко второму максимуму, сохраняется длительное время, то давление перед барьером быстро падает практически до нуля, что свидетельствует о полной дегазации рабочего слоя формы. Качество поверхности стальных и чугунных отливок, полученных в таких формах, значительно выше, газовые дефекты отсутствуют.

Газы, выделяющиеся из рабочего слоя формы, могут проникать в отливку. Установлено, что при контакте жидкого металла со смесями на органических (безводных) связующих поглощение газов металлом не происходит.

Действие барьера эффективно, если время дегазации рабочего слоя не превышает времени снятия перегрева металла отливки. Максимально допустимую толщину рабочего слоя перед барьером, обеспечивающую прогрев этого слоя до температуры не менее 953 К за время снятия перегрева, определяли на основе теплофизических методов, описывающих охлаждение отливки в оболочковой форме и прогрев формы, путем расчетов, по результатам которых построена номограмма (рис. 4.30), позволяющая определять максимальную толщину рабочего слоя формы, дегазируемого теплотой отливки толщиной $2X_1$, при температурах заливки 1523...1673 К для чугуна и 1823...1973 К для стали. Номограмма может служить также для расчета времени дегазации рабочего слоя и снятия перегрева.

В левой части номограммы на горизонтальной оси откладывают толщину отливки (точка A). Затем по перпендикуляру к горизонтальной оси из точки A движутся до пересечения с кривой, соответствующей температуре заливки (точка B). Горизонтальной линией, проведенной через точку B , соединяют кривые, соответствующие одинаковой температуре заливки, в левой и правой частях номограммы (точка C). Перпендикуляр, опущенный из точки C , дает искомое значение толщины рабочего слоя формы (точка D).

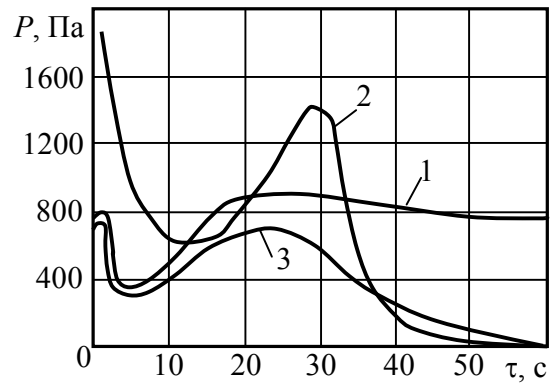


Рис. 4.29. Давление газов в рабочем слое формы: 1 – обычная форма; 2 – форма со сплошным барьером; 3 – с порошковым барьером

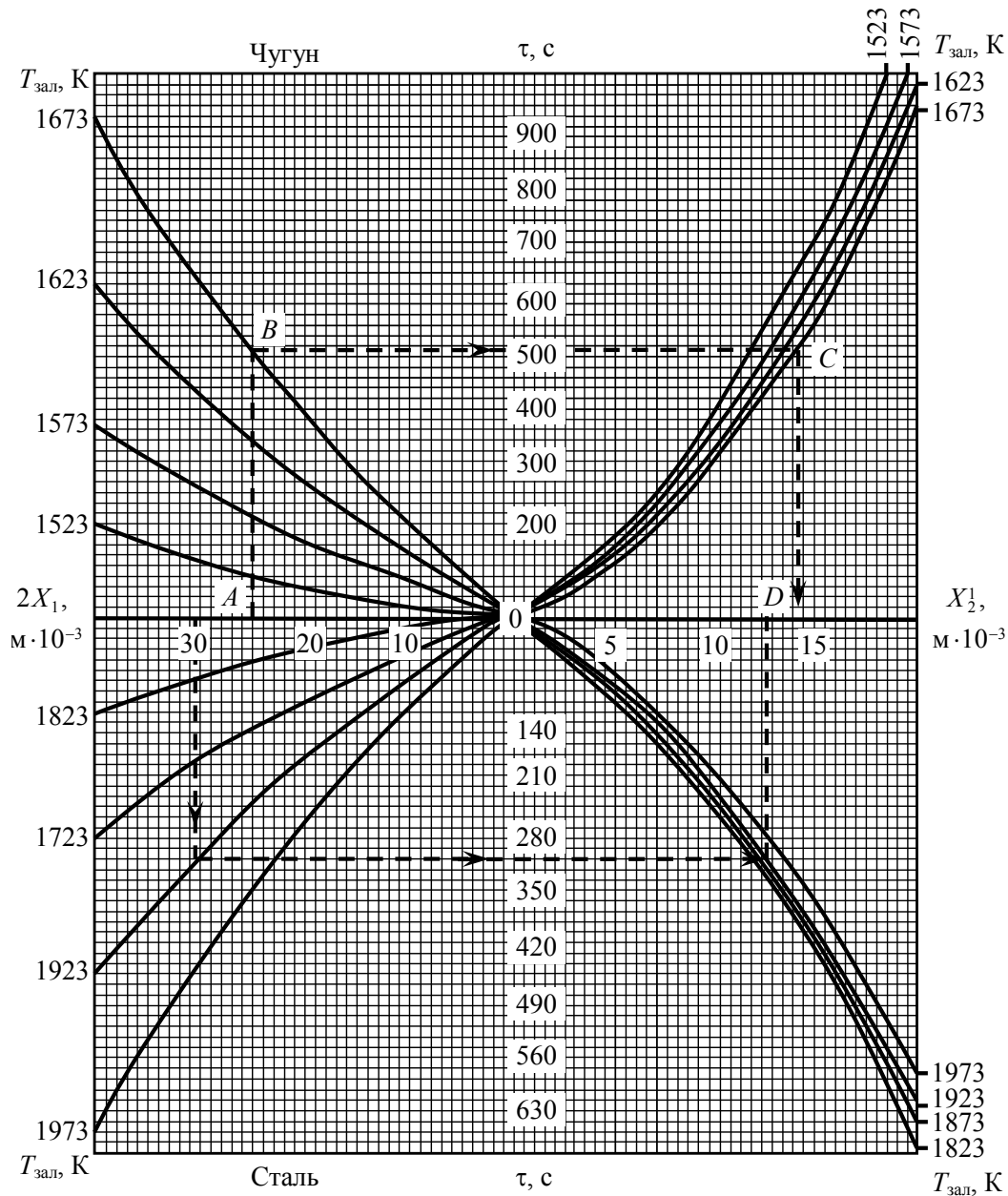


Рис. 4.30. Номограмма для расчета толщины рабочего слоя формы

Для тонкостенных отливок полезно применять такой барьер, который пропускал бы газы только в одну сторону – от отливки. Это возможно при заполнении продуктами деструкции пористого барьера и при изготовлении его из легкоплавких зернистых материалов. Для барьеров с переменной проницаемостью условием эффективности их действия является превышение времени снятия перегрева над временем дегазации рабочего слоя и временем закупорки барьера.

При разработке пористого барьера исследовали изменение газопроницаемости различных порошков при контакте их с оболочковой формой, залитой жидким металлом. Существенно понижение газопроницаемости порошка железа и железной металлокерамики. Применение барьеров из железных порошков позволяет улучшить качество поверхности отливок. Давление газов в форме вблизи отливки для этого случая приведено на рис. 4.29 (кривая 3).

Для использования порошков из ферромагнитных материалов без связующего разработана технология, в которой барьер толщиной 0,003 м удерживается у модели с помощью магнитного поля. В каждом отдельном случае конструкция модельной оснастки обеспечивала напряженность и конфигурацию магнитного поля вблизи поверхности модели, соответствующие типу применяемого барьера (сплошной или порошкообразной) и месту локализации дефектов. Для удержания на модели барьеров из порошков необходимо диспергировать поле вдоль поверхности модели. Такие модели изготавливали из чередующихся тонких (0,0005...0,002 м) слоев магнитных и немагнитных материалов, например стали и меди, а также из ферритов и магнетодиэлектриков.

При разработке барьеров из легкоплавких материалов изучали качество поверхности отливок, получаемых в оболочковых формах с барьером из алюмосиликатных щелочных стекол. Пригодность материала для барьера определялась в зависимости от его взаимодействия со связующим и от способности остекловываться под действием тепла отливки.

Среди исследуемых материалов хорошие результаты получены при применении молотого оконного стекла и фритты эмали № 601 (содержащей: 45,3 % SiO₂, 23,85 % Na₂O, 5 % Al₂O₃ и наполнители). Барьер из оконного стекла толщиной 0,002 м применим для углеродистых сталей и чугунов, заливаемых с большим перегревом, а также для толстостенных отливок. Область применения легкоплавкой эмали № 601 шире (рис. 4.31).

Смеси на терморезистивных связующих изменяют свое агрегатное состояние в процессе формообразования по высоте столба смеси и во времени. Степень уплотнения таких смесей в холодном состоянии равна 1,1...1,15. При одновременном воздействии нагрева и уплотнения происходит перетекание связующего в поры и сближение зерен смеси.

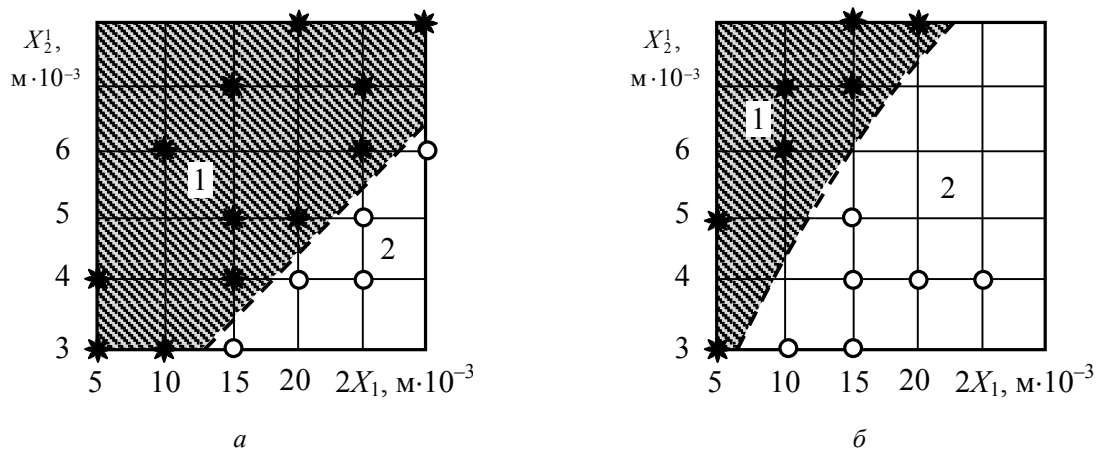


Рис. 4.31. Влияние толщины отливки и толщины рабочего слоя форм с барьером из стекла (а) и из эмали № 601 (б) на наличие дефектов на поверхности стальной отливки: 1 – с дефектами; 2 – без дефектов

Этот процесс сопровождается повышением плотности, так что суммарная степень уплотнения достигает значения:

$$\eta = \eta_x \left(1 + \frac{\rho_z}{\rho_c} \cdot \frac{\xi}{100 - \xi} \right), \quad (4.16)$$

где η – суммарная степень уплотнения;

η_x – степень уплотнения в холодном состоянии;

ρ_z, ρ_c – плотности зерен и связующего, соответственно;

ξ – концентрация связующего в смеси.

Величина остаточной пористости после уплотнения равна:

$$\Pi(\%) = 100 \left[1 - Y \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_c} \cdot \frac{\xi}{100 - \xi} \right) \right], \quad (4.17)$$

где Y – плотность упаковки в исходном состоянии.

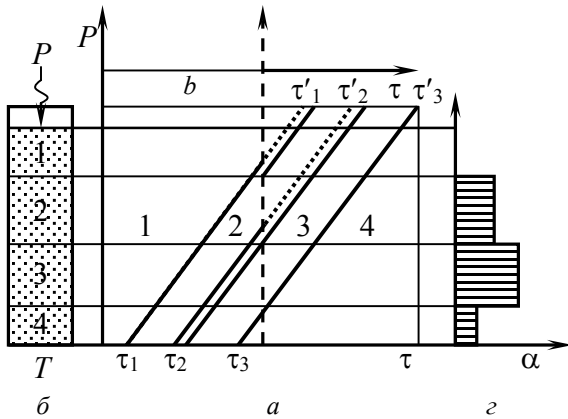


Рис. 4.32. Схема процесса формообразования при воздействии нагрева и уплотнения.

смесь у модели переходит в состояние, соответствующее зоне 2. По мере прогрева столба смеси разница между зонами 1 и 2 смещается от модели и ко времени τ'_1 достигает верхней границы столба. Аналогично перемещаются от модели границы между остальными зонами.

В период времени $\tau_3 - \tau'_1$ в столбе существуют все четыре зоны (рис. 4.32, б). Если в этот период приложить давление уплотнения к столбу смеси над горячей моделью на сравнительно короткое время (рис. 4.32, в) то эпюра средних плотностей по сечению столба будет иметь вид, изображенный на рис. 4.32, г.

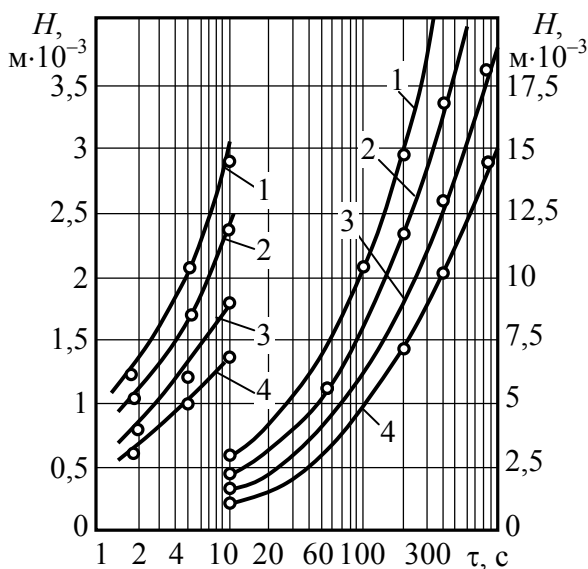


Рис. 4.33. Положение границ между зонами при температуре модели, К: 1 – 573 (зоны 2 и 3); 2 – 573 (зоны 3 и 4); 3 – 473 (зоны 2 и 3); 4 – 473 (зоны 3 и 4)

В столбе смеси над горячей моделью можно выделить четыре зоны. Положение границ между зонами во времени определяется скоростью прогрева столба смеси:

1-я зона – смесь полностью сохранила сыпучесть;

2-я зона – смесь удерживается на модели при повороте, но размягчение связующего еще недостаточно;

3-я зона – связующее находится в максимально текучем состоянии;

4-я зона – связующее затвердело, уплотнение без разрушения невозможно.

В начальный момент времени смесь находится в состоянии, соответствующем зоне 1. К моменту времени τ_1 , (рис. 4.32, а)

достигает верхней границы столба. Аналогично перемещаются от модели границы между остальными зонами. Если в этот период приложить давление уплотнения к столбу смеси над горячей моделью на сравнительно короткое время (рис. 4.32, в) то эпюра средних плотностей по сечению столба будет иметь вид, изображенный на рис. 4.32, г. Наибольшая степень уплотнения достигается в зоне 3. Если уплотнение начинать, когда 4-я зона еще не образовалась, а заканчивать, когда граница между зонами 2 и 3 достигла требуемой толщины рабочего слоя формы, можно получить из единой смеси двухслойную форму с плотным рабочим слоем.

Положение границ между зонами рассчитывали с помощью известного решения для прогрева полуограниченного тела при условиях первого рода на границе модель-смесь. На рис. 4.33 приведены результаты расчета и экспериментальные данные, подтверждающие правильность расчета, полученные путем рентгеновского просвечивания образцов, в которые предварительно вводили рентгеноконтрастное вещество $BaSO_4$. Используя рис. 4.33, как

номограмму, можно определить время начала (граница между зонами 3 и 4) и время окончания уплотнения (граница между зонами 2 и 3) для получения заданной толщины рабочего слоя формы в зависимости от температуры модели.

Максимальное время начала уплотнения после контакта смеси с моделью для плоских горизонтальных моделей составляет 2 с, для плоских вертикальных и рельефных моделей – 0,5 с.

При использовании магнитного поля для удержания барьера на модели силовое воздействие на барьер, направленное нормально по отношению к поверхности модели, обеспечивает дополнительное уплотнение рабочего слоя формы. Как показали исследования на разработанной установке, степень уплотнения силовым действием барьера, как сплошного, так и порошкового, достаточно велика и не уступает степени уплотнения резиновой диафрагмой.

4.4. Устранение газоусадочной пористости в отливках из широкоинтервальных сплавов

Широкоинтервальные алюминиево-магниевого сплавы склонны к образованию рассеянной усадочной пористости. Наличие растворенного в металле водорода, активно поглощаемого этими сплавами, приводит при затвердевании к образованию в металле отливок газоусадочной пористости. При этом газ, молизуясь в междендритных пустотах, создает противодействие, препятствующее питанию кристаллизующейся отливки.

Для устранения газоусадочной пористости алюминиево-магниевого сплавов необходимо решение комплекса задач: устранение наводороживания расплава при заливке его в литейную форму; применение повышенного давления для устранения выделения водорода из жидкого металла и для интенсификации питания отливок; использование ускоренного охлаждения, способствующего переводу объемного затвердевания сплавов в последовательное.

Для создания повышенного воздушного давления в прибыли применялось два метода подачи сжатого воздуха:

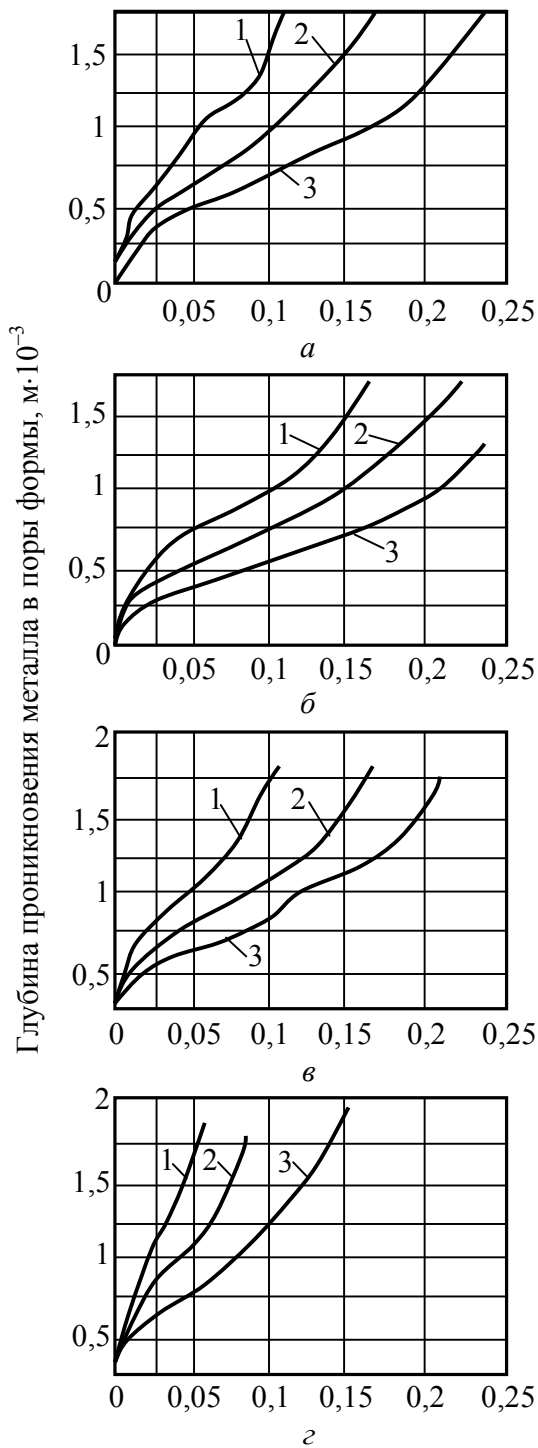
- от цеховой магистрали;

- от специальных баллонов со сжатым воздухом, устанавливаемых перед заливкой на литейную форму.

Прибыли с повышенным воздушным давлением применялись оптимальной формы – полушар, совмещенный с цилиндром, с общей высотой прибыли равной диаметру ($H=D$). Объем прибыли составлял 15 % от объема отливки. Поверхность формы, формирующая прибыль, облицовывалась керамическим покрытием. Конструкция прибыли обеспечивала отсутствие утечки воздуха. Регулировку подачи воздуха в прибыль производили с помощью газового редуктора. Давление, создаваемое в полости прибыли от 0,1 до 0,6 МПа, контролировали манометром.

После окончания заливки литники замораживались и в прибыли создавалось повышенное воздушное давление с целью обеспечения кристаллизации металла в форме под давлением. При этом преследовалась цель – не допустить выделения из металла в виде пузырьков растворенного водорода и интенсифицировать подачу жидкого металла из прибыли в междендритные пустоты.

Решение этой задачи необходимо было осуществлять без деформации литейной формы под действием давления и без ухудшения качества поверхности отливок вследствие возможного проникновения металла в поры песчаной формы.



Давление воздуха в прибыли, МПа

Рис.4.34. Влияние величины давления в прибыли на глубину проникновения расплава в поры формы с применением в качестве связующего (5 %) глины (а), жидкого стекла (б), бентонита (в) и ПК-104 (г):
1, 2, 3 – фракции песка 063, 0315, 02, соответственно

Установлено, что при создании в прибыли давления 0,6 МПа, рассев размеров отливок укладывается в поле допуска 14 квалитета, что удовлетворяет техническим условиям на изготовление отливки. Давление свыше 0,6 МПа приводит к искажению геометрии отливки вследствие деформации литейной формы.

Влияние давления на проникновение металла в поры форм, изготовленных из песков с различной зернистостью и при различных связующих, представлено на рис. 4.34. При неокрашенных формах проникновение расплава уже при давлении 0,1...0,2 МПа происходит на недопустимую величину. Окрашивание формы предохраняет от проникновения при всех испытываемых давлениях и песчано-жидкостекольные формы могут быть использованы при применении прибылей под повышенным воздушным давлением без ухудшения поверхности и геометрии отливок.

Влияние воздушного давления в прибыли на интенсификацию питания проверяли на узкоинтервальном силуминовом сплаве АЛ4 ($\Delta T_{кр}=30^{\circ}C$) и на широкоинтервальном алюминиево-магниево-магниево-сплаве АЛ23-1 ($\Delta T_{кр}=120...440^{\circ}C$). Оценку эффективности давления проводили сравнением пористости по шкале ВИАМ, а также по механическим испытаниям литого металла.

В результате проведенных исследований было установлено, что с увеличением давления от 0,1 до 0,6 МПа пористость в сплаве АЛ4 уменьшается и полностью исчезает при давлении 0,6 МПа. Пористость в сплаве АЛ23-1 снижается с 5-го до 3-го класса. При этом, если за счет устранения пористости предел прочности σ_B при разрыве для сплава АЛ4 увеличивается в среднем на 30 %, а относительное удлинение δ – на 40...45 %, то для сплава АЛ23-1 σ_B увеличивается в среднем на 7...8 %, а δ – на 12...15 %. Влияние величины давления в прибыли на изменение механических свойств исследуемых сплавов представлено на рис. 4.35. Из приведенных данных следует, что в песчаных окрашенных формах при применении воздушного давления в прибыли возможно получение беспористого литья из узкоинтервальных силуминовых сплавов.

Учитывая проведенные ранее исследования по водородопоглощению черных металлов при протекании по каналам литейной формы, были проведены исследования по изучению поглощения водорода сплавами АЛ23-1 и АЛ4 при протекании их по неокрашенному каналу песчаной жидкостекольной смеси и керамизированному каналу, прокаленному факелом газовой горелки до температуры 973...1023 К. При этом было установлено, что при протекании сплавов АЛ23-1 и АЛ4 по песчано-жидкостекольному каналу, относительный коэффициент водородопоглощения сплава АЛ23-1 в три раза превышает относительный коэффициент водородопоглощения сплава АЛ4. При протекании этих же сплавов по керамизированным термообработанным каналам прирост водорода не фиксируется.

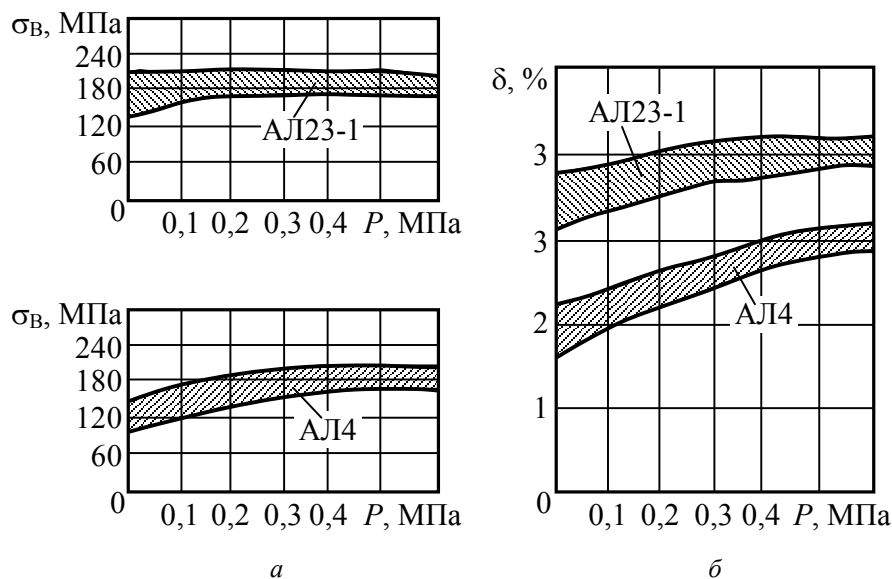


Рис.4.35. Влияние величины воздушного давления в прибыли на изменение предела прочности (а) и относительного удлинения (б) алюминиевых сплавов

При заливке сплавов АЛ23-1 и АЛ4 в керамизированные термообработанные песчано-жидкостекольные формы с использованием прибылей, действующих под повышенным воздушным давлением, пористость в сплаве АЛ4 исчезает при давлении 0,4...0,5 МПа, а в сплаве АЛ23-1 при давлении 0,6 МПа уменьшается до 1-го и 2-го класса по шкале ВИАМ. Это подтверждает известную гипотезу о выделении водорода из силуминов в течение всего периода затвердевания и не скапливания его в молизованном виде в усадочных порах, что резко облегчает питание. В то же время в алюминиево-магниевого сплавах выделение газов из жидкости задерживается и происходит после образования усадочных пустот. Молизованный водород скапливается, создавая трудности для питания кристаллизующейся отливки.

Для интенсификации питания требуются высокие давления, использование которых невозможно при применении песчаных форм. Необходимо идти по пути интенсификации процесса захлаживания расплава для того, чтобы, изменяя градиент температур по сечению отливки, содействовать переводу объемного затвердевания в последовательное.

Для создания последовательного затвердевания необходимо обеспечить градиент температур по сечению отливки выше интервала затвердевания сплава. Определяющим условием для получения в песчаной форме больших градиентов температур является наличие интенсивно действующих холодильников. Сравнительные исследования охлаждающего действия металлических медных, стальных холодильников и не прямых хо-

лодильников, создаваемых закладыванием на различных расстояниях от поверхности формы трубок, охлаждаемых проточной водой, показали более интенсивное действие последних. При этом градиент температур по сечению отливок достигал 75...120 °С, что в значительной степени зависело от толщины керамики между поверхностью холодильника и поверхностью формы. Однако, такой метод установки холодильников нетехнологичен, наблюдается разрушение керамики, что приводит к появлению засоров в отливке.

При поиске методов изготовления холодильников с полостями для циркуляции охлаждающих агентов были сформулированы требования, предъявляемые к таким холодильникам: прочность, герметичность, высокая теплопроводность, наличие тонких полостей, при движении жидкостей по которым возможен интенсивный отвод тепла, технологичность изготовления.

При апробации технологии изготовления таких холодильников из медных листов, соединяемых сваркой, а также получения холодильников методом гальванопластики при осаждении меди на разовую модель из органических материалов с токопроводным слоем, была установлена нетехнологичность этих методов, а полученные холодильники не удовлетворяли предъявляемым требованиям. Поэтому был разработан новый метод изготовления холодильников. Базовыми теоритическими и технологическими положениями для предложенной технологии служили: капиллярное впитывание расплавов на базе меди в металлокерамику на базе железа; значительное различие температур плавления меди и железа; условия пластифицирования медных и железных порошков; возможность изготовления из пластифицированных масс листов пластической деформацией; возможность получения фасонных фигур из этих листов при их нагреве в контакте с моделью. При этом технология изготовления холодильников сводилась к следующему: приготовление пластифицированных масс из порошков ПЖ4М и меди расплавами парафина с добавками стеарина и полиэтилена; изготовление из этих масс листов толщиной 1...5 мм; нагрев листов на модели при температурах 323...328 К для получения фасонной фигуры; совмещение листов из разных материалов; обжиг в засыпке из оксида алюминия при температуре 1323...1373 К.

В начальных стадиях обжига из пластифицированных масс происходит удаление органической составляющей. В дальнейшем, при температурах 1323...1373 К начинается спекание порошка ПЖ4М с формированием твердой металлокерамики. При этих же температурах материал листа – медь, расплавляется и впитывается в пористую металлокерамику из железного порошка. Управление свойствами холодильника, в соответствии с предъявляемыми требованиями, возможно дополнительной пропиткой каркаса из железного порошка медью. Параметры пропитки холодильников определяются исходя из разработанной номограммы. Структура металлокерамического холодильника представляет собой спеченный железный порошок, поры которого заполнены медью (20...50 %). Прочность при разрыве такого композитного материала (40 % меди) составляет 150...200 МПа. Коэффициент теплопроводности 170,96...179,1 Вт/(м·К). Коэффициент затвердевания алюминиевых сплавов при использовании таких холодильников по сравнению с обычными металлическими увеличивается более чем в четыре раза и составляет 1,6...2,0 см/с^{0,5}.

Применяя такие холодильники, возможно создавать направленное затвердевание к прибыли при пропускании через них охлаждающие среды с различной интенсивностью и температурой. Подбором охлаждающих сред можно управлять процессом затвердевания отливок в широком диапазоне. Так, при расходе воды или воздуха 0,05; 0,1; 0,15 л/с с температурой 291 К, при толщине стенки отливки 0,03 м, градиент температур по сечению изменяется в широких пределах: 9,6; 64; 134 °С. Однако, при использовании таких холодильников при литье сплава АЛ23-1 совместно с прибылями, работающими

под металлостатическим давлением, газоусадочная пористость в отливках не исчезает, хотя и уменьшается до 1-го и 2-го класса по шкале ВИАМ. Очевидно, необходимо дальнейшее совершенствование металлокерамических холодильников для увеличения интенсивности их действия. Такое совершенствование может происходить по пути увеличения количества меди при пропитке пористой металлокерамики из железного порошка; применения гальванопластических покрытий внутренней и внешней поверхности холодильника, что увеличивает на 10...15 % коэффициент теплопроводности металлокерамики; широкого использования тонких полостей и различных охлаждающих сред. В то же время уже предложенные холодильники при применении их совместно с прирубьями, действующими под давлением до 0,6 МПа, обеспечивают отсутствие газоусадочной пористости в отливках из алюминиево-магниевого сплава толщиной 0,015...0,1 м. При этом улучшаются свойства отливок, по сравнению с отливками, получаемыми в песчаные некерамизированные формы без воздействия давления и охлаждения. Прочность сплава АЛ23-1 при разрыве увеличивается на 20 %, относительное удлинение – на 32 % (усредненные значения по 30 испытаниям).

Для изготовления литейных форм широко используются химически твердеющие смеси на органических связующих. Однако, при литье алюминиево-магниевого сплава в такие формы в отливках наблюдается подкорковая ситовидная пористость. Появление такого дефекта связано с поглощением металлом водорода при протекании расплава по форме в момент деструкции связующего.

Установлено, что количество водорода в образцах заметно изменяется в зависимости от состава формовочной смеси. Если принять содержание водорода в расплаве АЛ23-1, находящегося в тигле печи за единицу, то содержание водорода в отливках, залитых в формы на основе связующего КФ-90, увеличивается в среднем в три раза.

Применение керамизированных форм осложнено тем, что керамическая облицовка требует высокотемпературной обработки поверхности, что приводит к выгоранию органического связующего и разрушению формы. Кроме того, газы, образующиеся при термодеструкции связующего, могут проникать в керамический слой формы. С целью исключения этих отрицательных явлений были разработаны и применены стеклообразные барьеры.

Для предохранения от проникновения газов в керамический слой барьер создавался на границе керамическая облицовка-песчаная форма. Материалом для барьера служат суспензии на основе гидролизованного этилсиликата 32(40). В качестве наполнителя используются фритты эмали № 601 фракции 0063 с добавкой 20 % борной кислоты. Температура плавления такой смеси 673...723 К. Слой толщиной 0,001 м наносится на опорную часть формы опрыскиванием. Во время термообработки керамики материал барьера расплавляется и в дальнейшем надежно предохраняет расплав от проникновения газов из песчаной основы формы.

Температура деструкции органических связующих в данном случае должна быть не ниже температуры плавления барьера. При применении связующих с температурой деструкции ниже температуры плавления барьера, последний располагается внутри слоя керамической облицовки. Толщина керамики в таком случае применяется такой, чтобы при термообработке ее поверхностный слой имел температуру 973...1023 К (для его полной дегазации); слой расположения барьера – температуру 673...723 К (температуру плавления эмали); слой, находящийся в контакте с формой – температуру, не более температуры деструкции связующего. Создание такого барьера требует двукратной керамизации, однако надежно предохраняет от проникновения газов в керамическую облицовку и поглощение расплавом водорода.

Необходимая толщина керамического слоя определяется расчетными методами. При применении газонепроницаемых барьеров водородопоглощение сплавом АЛ23-1 при литье в формы на основе связующего КФ-90 практически не происходит, что было зафиксировано отсутствием в реальных отливках подкорковой ситовидной пористости.

Разработанный технологический процесс, предусматривающий литье алюминиево-магниевого сплава в керамизированные формы при комплексном воздействии на металл повышенного давления и интенсивного охлаждения, позволяет устранить газоусадочную пористость, снизить брак до 5...10 %, повысить механические характеристики металла в среднем на 20 % и улучшить качество поверхности отливок ($R_z=28...30$ мкм).

4.5. Кристаллизация отливок с использованием внешних факторов

Комплексное воздействие давления и охлаждения на отливку, залитую в керамизированную форму приводит к повышению плотности и механических свойств за счет устранения усадочных и газовых раковин, экзогенных включений. При заливке металла в форму из огеливаемой суспензии создаются условия, когда формирование отливок происходит в контакте с негзотворной поверхностью, что исключает образование газовых пороков, и с неметаллопроницаемой поверхностью, что позволяет создать повышенное давление при затвердевании отливок и увеличить эффективность их питания. Фасонные оболочковые холодильники, получаемые спеканием из железных порошков с последующим пропитыванием в изотермических условиях расплавами бронз, создают направленное эффективное охлаждение проточными жидкостями. Таким образом, совместные давление и охлаждение устраняют усадочные раковины при экономичном расходовании металла на прибыли.

При воздействии давления на кристаллизующийся расплав изменяются многие физические характеристики: температура плавления, теплопроводность, диффузия, вязкость и др. Резко уменьшается время затвердевания расплава, находящегося под давлением. Давление устраняет термическое сопротивление теплопередаче от поверхности отливки к форме путем уменьшения образующегося зазора, причиной образования которого является сокращение размеров отливок вследствие усадки и тепловое расширение формы. Отделению твердой корочки от стенок формы некоторое время препятствует гидростатическое давление металла. Этот эффект резко усиливается силовым воздействием на жидкий металл. Таким образом, время образования зазора между отливкой и формой является функцией приложенного давления.

В условиях давления на жидкий расплав вязкость изменяется в более значительной степени и описывается формулой Баруса:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\frac{PV_0}{RT}}, \quad (4.18)$$

где η_0 – вязкость расплава при атмосферном давлении;

V_0 – первоначальный объем расплава при атмосферном давлении;

P – величина верхнего давления;

R – универсальная газовая постоянная.

Изменение кинетики затвердевания и условий питания формирующейся отливки под влиянием избыточного давления приводит к благоприятным изменениям ее структуры, увеличению плотности и повышению физико-механических свойств. Если сплав кристаллизуется в широком температурном интервале (например, Cu-Ni), то возникающие во всем объеме частицы твердой фазы резко увеличивают вязкость расплава, что

приводит к снижению коэффициента диффузии. В результате возрастания скорости кристаллизации расплава под давлением жидкой фазы и снижения скорости диффузионных процессов достигается уменьшение физической и химической неоднородности, высокая чистота границ зерен и мелкозернистая структура отливок. Повышается также воспроизводимость поверхности формы расплавом.

Процесс затвердевания отливок с приложением внешнего воздействия изучали на образцах диаметром 50 мм и высотой 110 мм, заливаемых в металлический кокиль, предварительно подвергнутый керамизации холодногеливаемой суспензией. Давление создавалось гидропрессом Д2430Б. При проведении экспериментов использовали сплав ЛС59-1Л. Фиксировались температура, давление прессования и перемещение пуансона в координатах «измеряемый параметр – время». Давление изменялось в интервале 0,3...0,5 МПа.

Результаты экспериментов показывают, что давление ускоряет затвердевание расплава, увеличивая перепад температур по сечению отливок за счет интенсивного охлаждения поверхностных слоев. При литье в обычных условиях коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «отливка – форма» и интенсивность охлаждения, характеризуемая критерием Био, снижаются из-за образования зазора между отливкой и формой. При литье с кристаллизацией под давлением до приложения давления это явление также имеет место, но после приложения давления уменьшается и нередко устраняется.

Механические и физические свойства стали 20Х13Л при совместном влиянии давления и охлаждения на расплав в сравнении с обычной заливкой в песчаные формы повышались: предел прочности на 6,6 %; твердость на 42,3 %; плотность на 1,85 %.

Разработанная технология использована при изготовлении вставок пресс-форм литья под давлением.

4.6. Экзогенные включения в отливках

Экзогенные включения, как правило, приводят к неисправимому браку отливок за счет образования песчаных раковин. Одной из причин возникновения этого вида брака является нарушение сплошности поверхностного слоя формы. При отделении моделей наблюдается прилипание формовочной смеси и разрушение поверхности формы за счет адгезии, обусловленной межмолекулярным взаимодействием. Кроме того, высокая степень уплотнения формовочных смесей, свойственная динамическим методам формообразования, приводит к трещинам поверхностного слоя формы за счет упругих свойств смеси. Разупрочненная поверхность формы размывается жидким металлом с образованием экзогенных включений. Для изучения этих явлений предложена методика, моделирующая отделение моделей при нормальном и тангенциальном направлениях внешнего воздействия. Исследовались формовочные смеси с различными связующими: глиной, бентонитом, жидким стеклом, органическими связующими. В качестве материалов моделей применяли древесину (сосна, бук), чугун, сталь, алюминиевый сплав, бронзу, эпоксидные композиции (эпоксидно-диановая смола ЭД-6, ЭД-7). Для изменения адгезионных сил использовали модельные лаки, припылы, жидкие разделительные составы. Получены и проанализированы количественные зависимости прилипаемости от технологических факторов: влажности, степени уплотнения, температуры формовочных смесей, температуры моделей, шероховатости поверхности моделей. Степень загрязнения отливок оценивалась на темплетях из сплава АЛ2.

Затрудненное отделение моделей при высокой степени уплотнения объясняется преимущественно резко возрастающей зажимающей силой, зависящей от конфигурации моделей. Для изучения этого явления использовали модели различной геометриче-

ской формы: квадраты, конусы, кольцевые модели с карманами разной глубины и др. Причиной частичного разрушения формы является, в основном, отрыв части сырого болвана при извлечении модели (факторы регулировки формовочного оборудования не учитывались). Определены допустимые соотношения высоты болвана к его диаметру для различных степеней уплотнения, при которых местные разрушения формы сведены к минимуму. Предложены оптимальные величины формовочных уклонов для моделей различной конфигурации.

Кардинальным методом снижения количества экзогенных включений является применение двухслойных литейных форм – керамизированных форм, основой которых является жидкостекольная смесь, облицованная холодноогеливаемой керамикой на основе этилсиликата. Такая комбинация, несмотря на существенное усложнение технологии, позволяет получить высокое качество литых поверхностей, воспроизвести тонкий рельеф модели, повысить размерную точность отливок, существенно снизить брак отливок по песчаным раковинам.

4.7. Применение керамических перегородок с обогревом для легкоотделяемых прибылей

Совершенствование процесса получения легкоотделяемых прибылей возможно с применением перегородок из керамики твердофазного спекания, которая дает значительные преимущества перед традиционными материалами. Керамика не газотворна, поэтому отпадает вопрос о вентиляции перегородки и формы в месте ее простановки.

Прочность керамики в 5...10 раз превышает прочность песчано-глинистых смесей, применяемых в настоящее время, что позволяет снизить толщину керамических перегородок, увеличить их диаметр.

Применение керамики из различных огнеупорных материалов (шамота циркона, кварца) дает возможность регулировать теплофизические свойства перегородок в значительных пределах.

Керамические перегородки для исследований изготавливали по ГПСМО-процессу со следующими операциями:

- в пресс-форме отливается соляная легкорастворимая вставка на основе мочевины (температура заливки соли 140 °С);
- извлечение вставки из пресс-формы через 3...4 мин после заливки;
- сборка пресс-формы для изготовления керамической перегородки с мочевиной вставкой;
- запрессовка в собранную пресс-форму термопластичной суспензии (состав: 82 % огнеупорного порошка, 2 % стеарина и 16 % парафина).
- раскрытие пресс-формы после непродолжительного остывания (30...40 с);
- полученную керамическую перегородку (сырец) с мочевиной вставкой помещают под проточную воду (полное удаление вставки происходит в течение 15...20 мин.)

Таким образом, мочевиная вставка является элементом, формирующим внутреннюю полость перегородки. Упрочнение перегородки (сырца) достигается при тепловой обработке – обжиге до 950...1100 °С в засыпке адсорбента.

Принятая конструкция керамических перегородок обусловлена необходимостью удаления керамики из кольцевой щели между отливкой и прибылью диаметром 800...1000 мм при замене отбивки автогенным резом. Кроме того, кольцевой зазор в керамической перегородке можно использовать в качестве полости для экзотермической смеси для улучшения условий питания отливки.

Исследование качества питания проводили на технологических пробах диаметром 120 мм, высотой 150 мм. Пробы заформовывались в песчано-глинистую смесь, подвод

металла осуществлялся способом «литник на перегородку». Пробы заливались сталью 25Л1 ГОСТ 977-85 при температуре 1560...1580 °С.

Были залиты технологические пробы с фигурными и плоскими (толщиной 5 мм) керамическими перегородками. Во всех случаях диаметр отверстия перегородок составлял 30 мм.

Для сравнения качества питания заливались технологические пробы с песчано-глинистыми перегородками, применяемыми на одесском литейном заводе «Центролит». Диаметр отверстия этих перегородок равен 40 мм.

Расположение усадочных раковин и их характер выявлялись с помощью гамма-дефектоскопа ГУП-05-1 с источником излучения ^{60}Co мощностью источника 240 мкюри.

Оценка качества питания технологических проб производилась по выходу годного и коэффициенту запаса:

$$K = \frac{h}{H_{\text{пр}}}, \quad (4.19)$$

где h – расстояние от низа прибыли до усадочной раковины, мм;

$H_{\text{пр}}$ – высота прибыли, мм.

Результаты исследований показали, что коэффициент запаса у проб с керамическими перегородками выше (0,75 и 0,82), чем у проб с песчано-глинистыми перегородками (0,2). Это позволяет снизить массу прибыли и увеличить выход годного без ущерба для качества отливки.

При использовании керамических перегородок взамен песчано-глинистых имеет место более эффективное действие прибыли, так как в этом случае обеспечивается благоприятное условие направленного затвердевания отливки. Коэффициент тепловой аккумуляции керамической перегородки на цирконовой основе в 2...2,5 раза превышает коэффициент тепловой аккумуляции песчано-глинистой смеси b_2 . Следовательно, керамическая перегородка быстрее достигает температуру контакта, рассматриваемую из условия:

$$T_{\text{к}} = \frac{T_{\text{М}}b_{\text{М}} + T_{\text{пр}}b_{\text{пер}}}{b_{\text{пер}} + b_{\text{М}}}, \quad (4.20)$$

где $T_{\text{М}}$ – температура заливаемого металла;

$b_{\text{М}}$ – коэффициент тепловой аккумуляции металла;

$T_{\text{пер}}$ – температура перегородки;

$b_{\text{пер}}$ – коэффициент тепловой аккумуляции перегородки;

$T_{\text{к}}$ – температура контакта.

С этой точки зрения целесообразно применять дополнительный разогрев керамической перегородки экзотермической смесью, которая помещается в кольцевой щели фигурной перегородки (рис. 4.36 и 4.37). Разогрев перегородки в значительной мере способствует увеличению времени, когда металл в прибыли сохраняет достаточно высокую температуру и осуществляет питание отливки. Для определения температуры загорания экзотермической смеси было снято температурное поле перегородки. Оказалось, что максимальная температура в полости может достигать значения 1200 °С между 4 и 5 минутой после заливки. Следовательно, стабильное возгорание экзотермической смеси необходимо получить при температуре 1100...1200 °С. Это достигалось введением в смесь инициатора горения – азотнокислого калия. Оптимальное количество инициатора по данным исследований составляет 10 %. Состав смеси, %: алюминиевая стружка – 22, кузнечная окалина – 45, ферросилиций – 19, опилки – 4, азотнокис-

лый калий – 10, жидкое стекло – 2...3 сверх 100 %. Температура возгорания такой смеси около 1100 °С, длительность горения 120...150 с.



Рис. 4.36. Перегородка с экзотермической смесью и прибыль, полученная с использованием этой перегородки (нет ссылки)

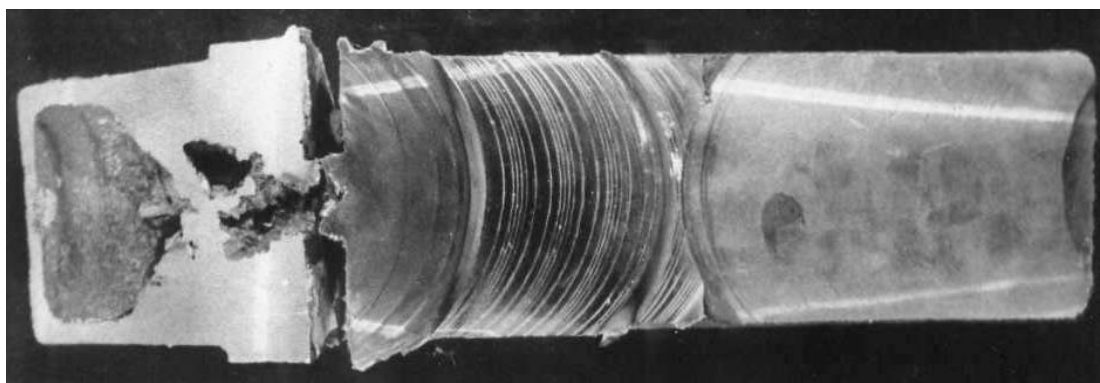


Рис. 4.37. Темплет стали 25Л1, полученный с использованием керамической перегородки с экзотермической смесью

Экзотермическая смесь дает увеличение температуры жидкого металла в прибыли на 100...120 °С и улучшает качество питания отливок.

Таким образом, применение керамических перегородок обеспечивает повышение выхода годного на 15...20 %, создает концентрированную усадочную раковину в прибыли и облегчает отделение прибыли от отливки.

4.8. Повышение качества проектирования специальных способов литья

С развитием производства, созданием новых и модернизацией существующих способов литья, освоением новых изделий, материалов, применением в процессе проектирования средств вычислительной техники вопросы методологии проектирования приобретают особое значение, так как позволяют, с одной стороны, снизить затраты на

проект, и с другой, – повысить качество проектируемых объектов за счет более глубокой оптимизации, просмотра большего количества вариантов, более эффективного привлечения экспертов и т.п.

Потребность в проектировании в литейном производстве возникает не только при создании новых, ранее не существовавших объектов, но и при реконструкции, адаптации, ремонте. Круг проектируемых объектов чрезвычайно широк – все применяемые в литейном производстве материалы, технологии, оборудование, литейные цехи, заводы. При этом возникает множество задач, как решаемых проектированием – производительность, качество, доступность материалов, надежность, вопросы экономики, экологии, охраны труда и т.п., так и задач, создаваемых проектированием – методология, средства, новизна, унификация, оптимальность, взаимодействие исполнителей и т.д. Применение новой методологии является актуальным для проектирования объектов специальных способов литья – постоянно развивающейся и наиболее наукоемкой отрасли литейного производства.

В процессе создания новых либо реконструкции существующих объектов литейного производства (ОЛП) проектировщик после получения технического задания приступает непосредственно к синтезу техно-рабочей модели ОЛП. При разработке веществ это могут быть описания составов, разработке техпроцессов – карты переделов, проектировании оборудования, цехов – техническое предложение в виде чертежей и т.п. При этом, в большинстве случаев, полностью игнорируется существующий в смежных областях техники (радиоэлектронике, например) схемотехнический этап проектирования. По существу, практика схемотехнического проектирования в литейном производстве отсутствует, за исключением электросхем литейного оборудования.

Результатом схемотехнического проектирования является принципиальная схема (ПС), представляющая собой графическую модель проектируемого объекта, включающую в виде условных обозначений полный перечень его элементов и межэлементных соединений. С топологической точки зрения ПС аналогична графу, вершины которого инцидентны элементам ПС, а ребра – линиям связи между ними.

Однако информативность ПС не ограничивается топологией. Важнейшим атрибутом полной принципиальной схемы являются математические модели ее элементов, позволяющие выполнить анализ необходимых проектировщику аспектов деятельности моделируемого объекта на требуемом уровне детализации.

ПС ОЛП, таким образом, представляют собой новый для литейного производства тип моделей реальных объектов. В работе основывались на следующих свойствах ПС, подтвержденных практическими результатами:

- создание и анализ ПС проводят на начальной стадии проектирования ОЛП;
- ПС отличаются наглядностью и простотой, что повышает роль семантического контроля за ходом проектирования;
- ПС легко преобразуются в математические модели (ММ) объектов, что позволяет применять ЭВМ не только для анализа, но и для формирования ПС;
- ПС позволяют повысить количество внешних и внутренних учитываемых свойств и параметров ОЛП;
- ПС позволяют легко моделировать особые свойства и конкретные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации будущего объекта.

Важным преимуществом ПС в литейном производстве является то, что при проектировании один и тот же объект может быть рассмотрен с существенно разных сторон. Поэтому жесткая классификация ОЛП не представляется возможной, и для каждой конкретной цели проектирования объект подвергали двухуровневой стратификации в соответствии с табл. 4.1.

Таблица 4.1

Стратификация объектов литейного производства

Уровень 1 Уровень 2	Вещество	Способ	Устройство	
			оборудование	цех
Микро	Свойства исходных веществ	Взаимодействие физико-химических процессов	Взаимодействие физических процессов	–
Макро	Смеси, сплавы	Техпроцессы	Узлы машин	Функциональные участки
Мета	–	Способы литья	Литейные машины	Литейные цехи, заводы

Выбором необходимой страты на каждом уровне определяли соответствующий набор элементов ПС, форму ММ элементов, перечень параметров ММ и источники их получения.

Элемент объекта проектирования – составная часть, которая выполняет определенную функцию в объекте и не может быть разделена на части, имеющие самостоятельное значение на данном этапе проектирования. Элемент ПС – составная часть схемы, соответствующая элементу моделируемого объекта и выполняющая определенную функцию в процессе проектирования. Различали компонентные и топологические элементы, при этом предполагали все преобразования фазовых параметров происходящими только на компонентных элементах, топологические же служили для передачи (распределения) параметров.

Элементам объектов предпосылали следующие атрибуты: название, тип, код (для автоматизированного хранения), технические характеристики (параметры, их возможные значения или границы изменений, зависимость от внешней среды и условий эксплуатации, габариты, масса и т.п.). В зависимости от источника получения данных об элементах ОЛП, параметры последних разделяли на три группы:

- параметры, источниками которых служат краевые условия физической модели задачи;
- параметры, связанные с физико-химическими свойствами элементов на микроуровне либо техническими характеристиками на макроуровне;
- параметры, источниками данных о которых служил эксперимент.

Соответствующие элементы принципиальных схем являлись носителями дополнительных атрибутов: условных графических изображений и ММ (одной или нескольких). Элементам схем присваивали два машинных кода: собственный постоянный и код элемента объекта, который в данный момент моделируется.

Поскольку ПС – структурированные модели, то и моделирующие их ММ тоже носили структурный характер.

Для проектирования объектов на микроуровне с рассредоточенными параметрами применяли уравнения в частных производных.

На макроуровне объект представляли в виде структуры с сосредоточенными параметрами и его ММ имели вид ОДУ. Если структуры объекта и ПС совпадали, то ММ элементов ПС соответствовала ММ элементов объекта. Законы функционирования последних задавали компонентными уравнениями, связывавшими разнородные фазовые переменные. Связь между однородными фазовыми переменными, относящимися к разным элементам схемы, задавали топологическими уравнениями. На макроуровне ММ элементов носят функциональный характер. При практической реализации таких ММ учитывали реальные характеристики объектов.

На метауровне сосредоточенные элементы были представлены в субъекте в таком количестве, что их расчет даже на основе численного решения ОДУ становился слишком длительным, поэтому их разбивали на группы, содержащие набор элементарных

структур, при этом для каждой группы находили приближенную переходную характеристику, рассматривая их как самостоятельные элементы, предназначенные для макроуровня проектирования.

Структура процесса схмотехнического проектирования ОЛП приведена на рис. 4.38. На объектном уровне, исходя из особенностей ОЛП и технического задания, формулировали цель и задачи проектирования, проводили предварительный анализ существующей информации об исходном объекте. Затем выполняли стратификацию и строили исходную модель, вводя условные допущения и ограничивая количество учитываемых параметров.

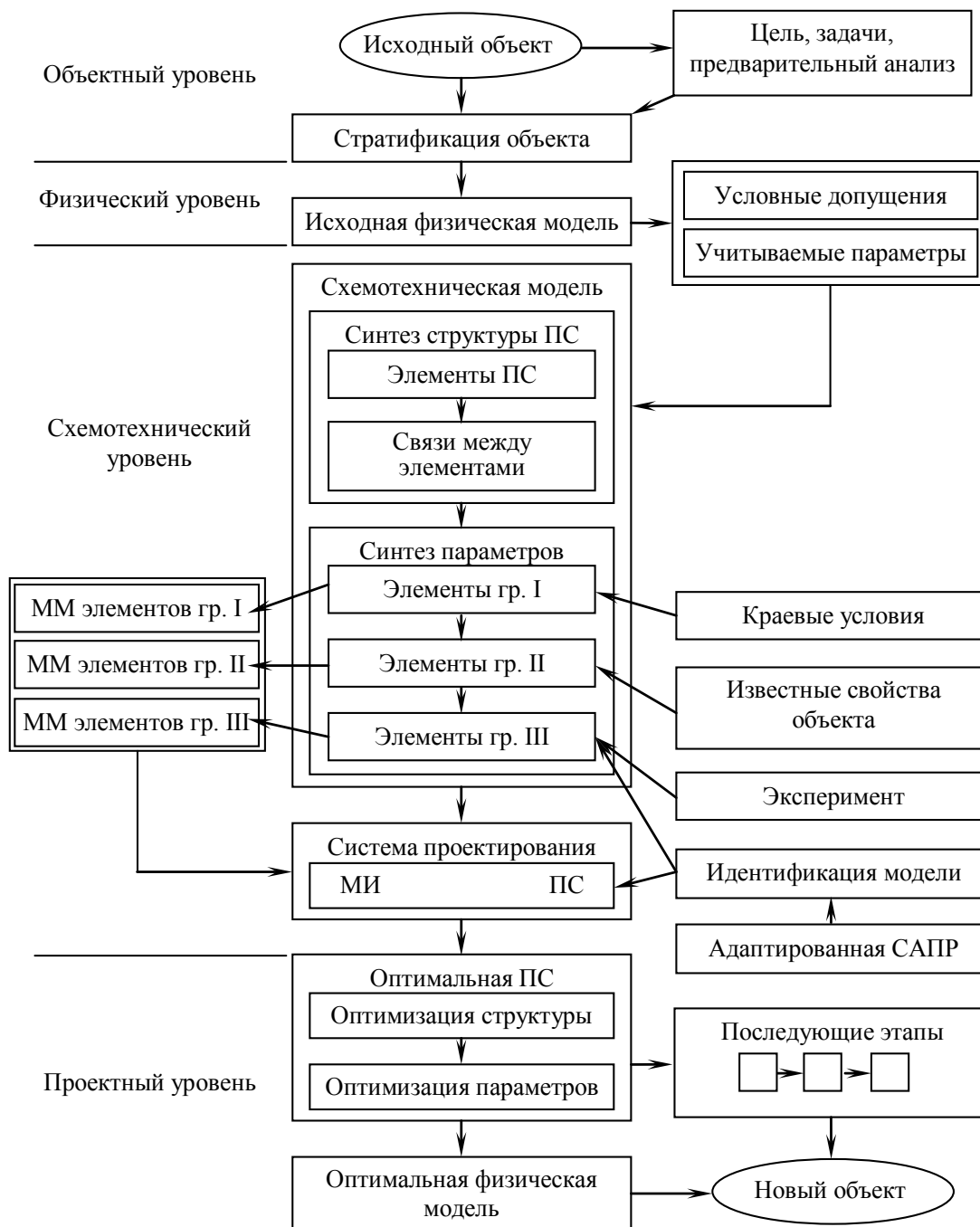


Рис. 4.38. Структура процесса схмотехнического проектирования

Целью проектных процедур на схемотехническом уровне проектирования являлось построение такой ПС и ее ММ, которые достоверно моделировали бы поведение исходного объекта в пределах допустимых изменений параметров исходной физической модели.

Переходя непосредственно к проектированию, на основании ММ ПС рассматривали возможность адаптации существующих схемотехнических САПР. В этом случае удавалось сократить сроки проектных работ, однако условия подобия ММ электрических и моделируемых процессов, необходимые для такой адаптации, имеют узкую область существования, ограниченную, в основном, подобием электрических, термических и гидравлических процессов на микроуровне. В тех случаях, когда необходимо было одновременно учесть развитие нескольких взаимодействующих физико-химических процессов, а также при проектировании на макро и мета уровнях создавали оригинальные системы проектирования.

На первом этапе проектного уровня анализом ПС определяли основные направления совершенствования исходной модели, удовлетворяющие целям проектирования, и приступали к структурной и параметрической оптимизации ПС в этих направлениях. На основании окончательной ПС, признанной системой оптимальной, строили физическую модель и формировали исходные данные для следующих этапов проектирования объекта.

В общем виде синтез и анализ состоял из этапов синтеза и анализа структуры ПС, а также синтеза и анализа параметров элементов ПС. Стратификация исходного ОЛП определяла подходы к структурированию. Так, на микроуровне структура схемы зависела от структуры объекта, на макроуровне выполняли условное разбиение объекта на фрагменты, моделируемые отдельными элементами ПС, на метауровне упрощали объект, сводя его к макроуровню.

Задачи параметрического синтеза заключались в определении значений параметров элементов для выбранной структуры, обеспечивающих выполнение требований ТЗ на проектируемый объект. Методами параметрического синтеза в работе решали следующие группы задач:

- приближение параметров схемы и характеристик объекта, полученных экспериментально, т.е. идентификацию модели;
- уточнение параметров, полученных расчетом, адаптацию известных решений к новым условиям и поиск параметров, обеспечивающих экстремальное значение целевой функции.

Перечень ОЛП для схемотехнического проектирования выбирали таким образом, чтобы с наибольшей полнотой исследовать возможности новой методологии на различных уровнях стратификации объектов, моделей и методов анализа (табл. 4.2).

Кроме того, в работе выделен один из специальных способов литья, для которого выполнено схемотехническое проектирование носило сквозной комплексный характер, т.е. от технического задания на изготовление отливок из черных сплавов без поверхностных дефектов до проекта соответствующего цеха (участка) литья в оболочковые формы (рис. 4.39).

Анализ условий образования дефектов на поверхности отливок при литье в оболочковые формы. Поверхности отливок из черных сплавов, получаемых в оболочковых формах, часто поражены раковинами, вмятинами, пригаром. Первые два дефекта вызваны химическим и физическим взаимодействием газов в порах формы с поверхностью начавшей кристаллизоваться отливки. Давление газов играет существенную роль также в образовании механического пригара. В результате предварительного анализа установлено, что основными условиями получения отливок без газовых раковин и пригара при литье в оболочковые формы являются высокая газопроницаемость формы, направленный газовый поток, малая металлопроницаемость поверхностного слоя формы и затвердевание отливки в контакте с негазотворной поверхностью.

Таблица 4.2

Объем практической реализации методологии схмотехнического проектирования объектов литейного производства

Уровни стратификации		Условные обозначения	Разработанные объекты литейного производства											
			Тонкостенные формы	Внутриформенные барьеры	Двухслойные формы	Цех оболочкового литья	Цех оболочкового литья	Тонкополостные отливки	Остеклованные формы	Контейнер для фиксации форм	Кристаллизатор для непрер. литья	Вытягивающее устройство	Установка для литья под НДС	Система управления заливкой
Объектов	Тип объекта	У – устройство С – способ	У	У	С	У	У	С	С	У	У	У	У	У
	Вид объекта	Ф – форма О – оснастка Т – техпроцесс М – оборудование Ц – цех	Ф	Ф	Ф	Ц	Ц	Т	Т	О	М	М	М	М
	Вид проектирования	Р – реконструкция Н – новый проект	Р	Р	Р	Р	Н	Н	Н	Р	Р	Н	Р	Н
Моделей	Абстракции	МИ – микро МА – макро	МИ	МИ	МИ	МА	МА	МИ	МИ	МА	МИ	МА	МА	МА
	Новизны	Р – разработанный З – заимствованный	Р	Р	Р	Р	Р	З	Р	Р	Р	Р	Р	Р
Анализа	Оптимизации	С – структурный П – параметрический	П	СП	П	СП	СП	П	СП	С	П	С	С	С
	Компонентов	шт.	2	2	4	1	1	1	1	1	5	1	1	2
	Новизны	Р – разработанный З – заимствованный	Р	Р	Р	Р	Р	З	Р	З	Р	Р	Р	Р

ПС эксплуатации оболочковых форм была синтезирована с учетом многофакторности процессов в форме после заливки, изучаемых на микроуровне, их относительную скоротечность, а также исходя из допущений физической модели. Форму ММ элементов ПС синтезировали на основании приложения физико-химических законов к описываемым процессам. Значения коэффициентов ММ определяли, исходя из краевых условий, свойств участвующих в процессе материалов и по данным эксперимента.

При этом были учтены следующие эффекты:

- изменение теплофизических свойств материалов формы с изменением температуры;
- изменение теплоотдачи на наружной поверхности формы;
- изменение давления в порах формы при изменении температуры, массы и состава газов;
- изменение газопроницаемости отдельных слоев формы после заливки в связи с повышением температуры и отложениями в порах;
- механическое проникновение газов в жидкую отливку с образованием и всплыванием пузырьков;
- образование зазора между формой и затвердевающей отливкой.

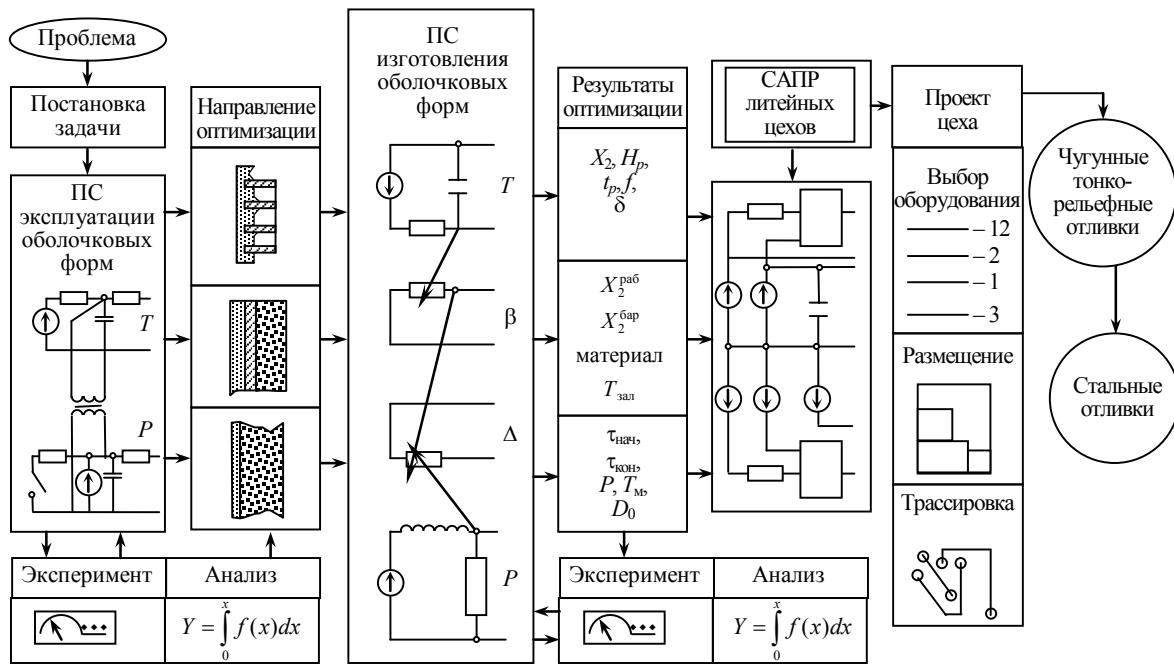


Рис. 4.39. Сквозное комплексное проектирование методов литья в оболочковые формы

Исходные параметры элементов ПС были уточнены путем подбора коэффициентов в ММ ПС таким образом, чтобы кривые газового давления вблизи границы металл-форма, полученные расчетом, были бы близки к аналогичным кривым, полученным в результате эксперимента. В частности, уточнению были подвергнуты следующие параметры: коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности формы, масса выделяющихся при деструкции газов, изменение пневмосопротивления наружных слоев формы, коэффициент истечения газов в окружающее пространство, проводимость клапана, моделирующего прорыв пузырька газа в жидкую отливку.

Для построения ММ ПС применили узловой метод. В качестве вектора базисных координат использовали вектор переменных типа узловых потенциалов, а в качестве топологических уравнений – уравнения типа первого закона Кирхгофа.

С помощью идентифицированной ПС проанализировано влияние на газовое давление в первом слое следующих факторов:

- теплофизических свойств материала формы;
- размера зерна и плотности формы;
- толщины формы и фильтрации газов в ней.

Все данные, на которых был построен анализ, подтверждены экспериментально. Установлено, что при существующих толщинах оболочковых форм, преобладающих размерах отливок и применяемых формовочных материалах получить стальные отливки без поверхностных дефектов практически невозможно.

Структурным и параметрическим анализом ПС определены направления исследований в области изменения конструкции оболочковых форм для повышения качества отливок (табл. 4.3).

Армированные тонкостенные формы. Применение крупных оболочковых форм не позволяет снижать их толщину из-за потери прочности и жесткости. Это противоречие устраняли путем армирования тонкостенной формы металлическими ребрами.

Кинограммы процесса падения смеси на вертикальные ребра показали, что значительная часть кинетической энергии падения расходуется у ребер, и рабочий слой формы оста-

ется недоуплотненным. С помощью оригинального неразрушающего емкостного метода измерения плотности фрагментов оболочковых форм установлена зависимость средней плотности участков формы под ребрами от геометрических характеристик последних и оптимизированы параметры дополнительного уплотнения смеси вибрацией.

Таблица 4.3

Изменения конструкции формы для повышения качества отливок

№ п/п	Изменения в исходной схеме		Изменения конструкции формы
	структура	параметры	
1	Уменьшение количества слоев	–	Уменьшение толщины
2	Разрыв цепи в пневматической подсистеме	–	Сплошной противогазовый барьер
3	–	Для одного «внутреннего» слоя: уменьшение газопроницаемости после заливки	Противогазовый барьер с переменной проницаемостью
4	–	Для «рабочего» слоя: бóльшие значения газотворности, теплопроводности, теплоемкости; меньшие значения газопроницаемости, объема пор.	Двухслойная форма

Формы с противогазовыми барьерами. Анализом ПС установлено и прямым измерением подтверждено, что давление газов в рабочем слое формы перед сплошным барьером после заливки быстро падает, что свидетельствует о полной дегазации слоя тепловой охлаждающейся отливки. Действие сплошного барьера эффективно, если время дегазации рабочего слоя не превышает времени снятия перегрева металла отливки. Построена номограмма, позволяющая определять максимальную толщину рабочего слоя формы при температурах заливки 1523...1673 К для отливок разной толщины из чугуна и 1823...1973 К – из стали.

Для других сочетаний толщин и температур предложено применять «полупроводниковый» барьер, который пропускал бы газы только в одну сторону - от отливки, что значительно улучшает условия кристаллизации. Такой барьер должен быть открыт, пока идет дегазация рабочего слоя, и закрыт – при выделении газов из опорного, за барьером.

Технологически такой барьер создавали из порошков железа, применяя магнитное поле при формообразовании. В период термической дегазации рабочего слоя барьер открыт; одновременно происходит закупорка железного слоя продуктами деструкции, благодаря его каталитическому влиянию на осаждение пироуглерода.

Для изготовления оболочковых форм со слоем из железного порошка применили оснастку, выполненную из чередующихся слоев магнитных и немагнитных материалов, а также феррита.

Второй способ создания барьеров с изменяющейся проницаемостью – применение порошков алюмосиликатных щелочных стекол. «Закрытие» такого барьера связано с его оплавлением, для чего соответствующим расчетом ПС определены термические условия процесса и состав стекол.

Двухслойные формы из единой смеси. Уплотнение плакированных песчано-смоляных смесей в период прогрева связующего до состояния наибольшей текучести сопровождается изменением упаковки и сближением зерен песка за счет перетекания связующего в поры. Такой процесс приводит к повышению плотности с 1270 до 1720 кг/м³ и, с точки зрения металлопроницаемости, заменяет измельчение зерна с 04

до 0063. Поэтому обычную двухслойную оболочковую форму с различной зернистостью слоев можно заменить двухслойной формой с различной плотностью слоев.

Смеси на терморезистивных связующих изменяют свое агрегатное состояние в процессе формообразования по высоте столба смеси и во времени. Рентгеновским анализом установлены положения границ между зонами с различной уплотняемостью.

Анализом четырехкомпонентной (температура, давление, химическое превращение, уплотняемость) ПС получены зависимости для определения времени начала и конца уплотнения.

Выбор и расчет элементов цеха. Алгоритм выбора оборудования учитывал параметрическую составляющую ПС. Сначала все учитываемые факторы ранжировали по убыванию значимости (по мнению экспертов). Затем по первому приоритету выполняли выборку всех объектов данного назначения с учетом безусловных ограничений. Дальнейшее ранжирование проводили по параметрам остальных приоритетов с одновременной оптимизацией по условным баллам.

Размещение оборудования. Для размещения оборудования план каждого элемента заменяли условным прямоугольником по оригинальной подпрограмме, учитывающей параметры оборудования и места его установки. Затем по ПС определяли последовательность размещения (по технологической цепочке, либо по убыванию количества связей с другими элементами). Автоматизированное размещение выполняли с помощью адаптированных САПР «РАПИРА-4» и «ГРИФ».

Проектирование связей между оборудованием. Трассировка связей между элементами отражала структурную составляющую ПС и представляла собой тополого-геометрический метод трассировки. Метод основан на определении геометрических форм фрагментов трасс из заданного множества, построения кратчайшей конфигурации каждой трассы из полученного набора фрагментов, а также анализа всех трасс в совокупности и дальнейшего итерационного процесса улучшения характеристик трасс. Разработан метод проектирования коммуникаций с переменным положением конечных точек, например, для транспортного робота.

Адаптация ППП «MICRO-CAP II» к проектированию тонкополостного литья. Основным препятствием при изготовлении отливок с развитыми тонкими внутренними полостями является низкая термостойкость материалов легкоудаляемых стержней. Замена таких материалов на более термостойкие сказывается на их удаляемости из готового изделия.

Предложена реконструкция процесса, заключающаяся в получении внутренней, непосредственно примыкающей к полости части детали по «холодной» (гальванопластика) технологии. Для этого органический стержень металлизировали погружением в псевдооживленный слой нагретого медного порошка ПМ-I. Благодаря электротепловой аналогии для параметрического синтеза применили схмотехническую САПР «MICRO-CAP II». В результате анализа ПС установлено, что оптимальная температура порошка – 433...453 К.

Аналоговое моделирование принципиальной схемы процесса остекловывания керамизированных форм. Особую роль при изготовлении тонкорельефных матриц и прессформ играют противоздушные барьеры на рабочей поверхности форм из кварцевого наполнителя. Их отличительной особенностью является формирование непосредственно из материала формы, высокотемпературная обработка которого вызывает оплавление кварца в поверхностном слое, его остекловывание.

Для получения плотного и равномерного слоя стекла на поверхности песчаной формы определены параметры процесса.

Оптимизация физической модели осуществлена на микроуровне. Для этого на основе ПС была спроектирована и изготовлена АВМ, моделирующая трехмерный про-

цесс теплопереноса в форме. Топологической особенностью схемы являлся подвод компонента в одну точку схемы из всех, имитирующих поверхность формы, и перемещение точки подвода. Результаты использованы при разработке технологии получения в керамизированных песчаных формах тонкорельефных чугунных пресс-форм для стеклоизделий.

Автоматизированное эвристическое проектирование литейной оснастки. При засыпке форм сыпучим материалом последний попадает в контейнер, когда форма туда уже установлена. Такая схема обладает существенным недостатком: необходимо защищать литник от попадания сыпучего материала.

Задачу удалось решить, совмещая схемотехнический анализ с эвристическим программированием. Построенную на макроуровне ПС процесса фиксации формы подвергли структурной оптимизации. Конструкцию контейнера для засыпки форм, реализующую новый техпроцесс засыпки, разработали на основе эвристического подхода. Конструкция обеспечивает инверсию операций процесса до заливки, что важно, например, для охлажденных форм.

Проектирование кристаллизатора для непрерывного литья. Исследование процесса непрерывного литья строили на применении системной модели, учитывающей наложение сложных взаимосвязанных явлений, происходящих, в основном, в зоне кристаллизации отливки: тепловых, кинетических, диффузионных, гидродинамических, механических. Управляющие функции оптимальной модели находили и из экстремума энтропийного функционала - обобщенного интегрального параметра качества слитка.

Анализ напряженно-деформированного состояния медного кристаллизатора цилиндрической формы проведен на базе задачи об изгибе образующей симметрично нагруженной цилиндрической оболочки из упруго-вязкого материала. Учитывали, что круговая цилиндрическая оболочка подвергается действию сил, возникающих из-за неравномерности теплового поля, внешних механических сил, распределенных симметрично относительно оси, а также силы тяжести. Кроме того, учитывали давление расплава на стенки кристаллизатора и релаксационные явления.

Реконструкция вытягивающего устройства. Известные тянущие устройства установок для непрерывной разливки металлов выполнены в виде эксцентриковых либо роликовых зажимов, совершающих возвратно-поступательное перемещение. К недостаткам этого решения следует отнести сложность тянущей клетки, обусловленную наличием электромеханического привода, ограниченную частоту включений привода, связанную с инерционностью вращающихся частей, значительную длину установок, наличие трущихся и, следовательно, изнашивающихся рабочих органов – валков, а также деформацию поверхности отливки валками тянущей клетки.

Анализ ПС известной установки позволил устранить указанные недостатки. Для достижения этой цели предложено тянущее устройство выполнить в виде линейного двигателя. Применение такой конструкции позволило сократить примерно на 75 % длину установки, упростить конструкцию тянущего устройства, повысить качество поверхности и однородность структуры получаемых отливок, надежность установки.

Реконструкция установки для литья под низким давлением. Недостатком существующих установок для литья под низким давлением является наличие трех групп направляющих и силовых приводов. Расположение направляющих для кассет на поворотной платформе увеличивает ее вращательный момент и, соответственно, необходимый крутящий момент привода поворота платформы. Подвижный привод неудобен в изготовлении, эксплуатации и ремонте.

В результате структурной оптимизации ПС установки получила решение, в котором количество приводов уменьшено до двух, установленных стационарно. В новой

установке единственный колпак поочередно соединяется с двумя кассетами, одна из которых участвует в заливке, а другая в это время находится на позиции заполнения ковша жидким металлом.

Проектирование системы управления заливкой. Недостатком существующих систем является изменение давления газа в кассете по мере расхода металла и понижения его уровня в ковше. Задача по проектированию устройства для управления заливкой состояла в обеспечении автоматического повышения давления газов в кассете до достижения металлом формы и постоянном приращении давления на высоту формы и подпор.

Соответственно проектировали трехкомпонентную ПС для давления газа, уровня металла в ковше и пространственного положения штока подпружиненного пневмоцилиндра, являющегося элементом системы управления. ММ этого элемента была построена таким образом, что аргументом в ней являлась разница давлений в штоковой и поршневой полостях, которые могут соединяться между собой. В последнем случае шток неподвижен, несмотря на повышение давления.

4.9. Кинетика химических реакций при выплавке легированных сталей для пресс-форм ЛПД

Повышение конкурентоспособности литой оснастки для литья под давлением в сравнении с механообработкой – важнейшая задача литейщиков. Одним из направлений решения этой задачи является получение отливок в керамизированных формах, используя переплав лома инструментальных сталей. Из многообразия факторов, влияющих на качество литой оснастки, выбраны металлургические аспекты технологии, рассматриваемые в данной работе.

Плавка стали проводилась методом переплава в индукционной печи. Загрязнение шихты вредными примесями при переплавах ограничивалось постоянным притоком свежей шихты и отходов со стороны.

Количество отходов должно в среднем составлять: впервые переплавляющихся около 70%, вторично переплавляющихся 21 %. Количество легированных отходов в составе шихты без ущерба для качества можно доводить до 100 %.

При выплавке стали методом переплава – сплавления без кислорода содержание углерода в шихте поддерживалось на 0,1...0,2 % меньше нижнего предела в стали 40X5MФСЛ. В этом случае в состав шихты, кроме отходов выплавляемой марки, вводился малоуглеродистый лом или отходы однотипных легированных, но низкоуглеродистых сталей.

При использовании метода переплава с продувкой кислородом содержание углерода в шихте на 0,2...0,3 % превышало заданный состав. Продувку ванны кислородом начинали после расплавления шихты и заканчивали после получения углерода на нижнем пределе марки в зависимости от количества и характера последующих присадок ферросплавов. В процессе продувки полностью окисляется алюминий, кремний и по достижении соответствующих температур начинает окисляться углерод. При этом, такие легирующие элементы, как хром и марганец, окисляются незначительно. Чем более высокие концентрации марганца и хрома в ванне, тем выше должна быть температура продувки. По окончании продувки (10...15 мин) перед скачиванием шлака его раскисляли для восстановления оксидов марганца, хрома, ванадия. Раскисление шлака проводили порошками 75 %-го ферросилиция, силикохрома и, в отдельных случаях, алюминия.

При переплаве высокохромистых сталей и сплавов применяли нейтральные шлаки. В этом случае при основности близкой к единице в шлаки вводили дополнительно магнетит и шамот.

Принято считать, что в жидком железе кислород растворяется в форме FeO. Растворимость кислорода с повышением температуры железа растет практически прямолинейно. Соответствующая кривая выражается формулой

$$\lg[\%O] = -\frac{6320}{T} + 2,734. \quad (4.21)$$

Аналогичная зависимость растворимости кислорода от температуры (в °C) выражается формулой $[\%O]_{\max} = 0,131 \cdot 10^{-2} t^{\circ}C - 1,77$ или в пересчете на FeO: $[\%FeO]_{\max} = 0,588 \cdot 10^{-2} t^{\circ}C - 7,93$.

Если в конце плавки выпустить из печи сталь нераскисленной, то произойдет реакция между оставшимися углеродом и кислородом. Образовавшийся при этом оксид углерода частично уходит в атмосферу, частично остается в стали в виде газовых раковин. Поэтому основной задачей является получение металла с минимальным содержанием кислорода. Задача раскисления, кроме снижения содержания кислорода, сводится еще и к снижению концентрации серы в металле и изменению формы, размера и характера распределения сульфидов, а также образованию соединений (оксидов, сульфидов, нитридов), увеличивающих число центров кристаллизации, влияющих на размер первичного зерна и физико-механические свойства стали.

Поскольку раскислительная способность элементов различна (рис. 4.40), последовательность раскисления выбрана следующей: вначале вводился марганец, затем кремний, затем алюминий и титан.

Термодинамические функции наиболее важных реакций раскисления приведены в табл. 4.4.

В общем виде реакции раскисления могут быть представлены как реакции взаимодействия растворенных в расплаве кислорода и элемента-раскислителя:



При этом продукты реакции могут быть в газообразном, жидком и твердом агрегатных состояниях.

Константа равновесия реакции раскисления K_p с учетом отсутствия растворимости образующегося оксида в жидком металле, особенно при низких концентрациях элемента-раскислителя, может быть представлена уравнением:

$$K_p = [Me]^y \cdot [O]^x. \quad (4.23)$$

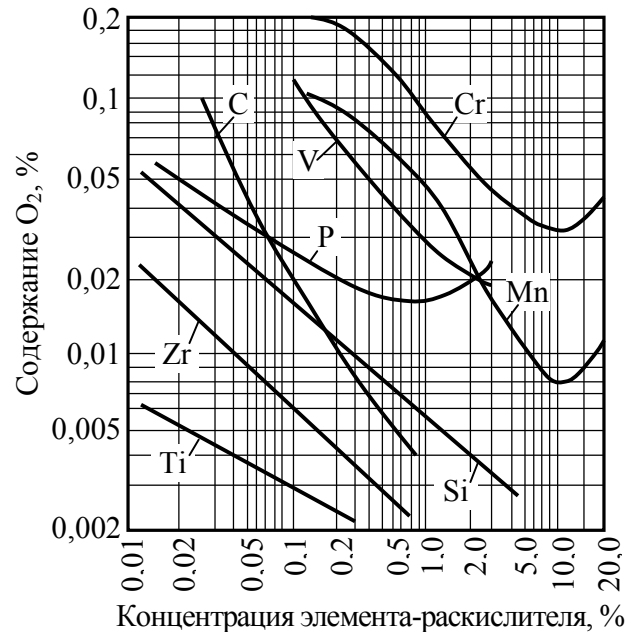


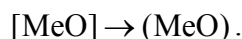
Рис.4.40. Раскислительная способность элементов при 1600 °C

Таблица 4.4

Термодинамические функции реакций

Реакция	Константа равновесия	Зависимость константы равновесия от температуры $\lg K_p$	Изменение свободной энергии ΔE°
$MnO_{(r)} = [Mn] + [O]$	$[%Mn][%O]$	$-25270/T + 12,55$	$115600 - 57,43T$
$C + x[O] = CO_{x(2)}$	$\frac{P_{CO}}{[%C][%O]^x}$	$-1660/T + 1,65$	$7600 - 7,55T$
$SiO_{2(r)} [Si] + 2[O]$	$[%Si][%O]^2 f_{Si}$	$-48174/T + 21,63$	$220400 - 98,98T$
$FeO \cdot SiO_{2(ж)} = [Si] + 3[O] + Fe_{(ж)}$	$[%Si][%O]^3 f_{Si}$	$-68930/T + 31,0$	$315340 - 141,97T$
$FeO \cdot Al_2O_{3(r)} = 2[Al] + 4[O] + Fe_{(ж)}$	$[%Al]^2 [%O]^4$	$-58600/T + 22,75$	$268000 - 104,00T$
$TiO_{2(r)} [Ti] + 2[O]$	$[%Ti][%O]^2$	$-30700/T + 10,33$	$140500 - 47,30T$
$2FeO \cdot TiO_{2(ж)} = [Ti] + 4[O] + 2Fe_{(ж)}$	$[%Ti][%O]^4$	$-64850/T + 23,47$	$294000 - 107,30T$
$ZrO_{2(r)} = [Zr] + 2[O]$	$[%Zr][%O]^2$	$-41340/T + 12,07$	$189000 - 55,18T$

При выплавке легированной стали для вставок пресс-форм использовали осаждающее раскисление, при котором образовавшиеся оксиды, имеющие меньший, чем сталь, удельный вес, всплывают в шлак:



Суммарная реакция осаждающего раскисления представляется следующим образом



Константа равновесия этой реакции

$$K_p = \frac{[FeO] \cdot [Me]}{[Fe](MeO)} \quad \text{или} \quad [FeO] = K_p \frac{[Fe] \cdot (MeO)}{[Me]}. \quad (4.25)$$

Таким образом, остаточное содержание кислорода в стали будет уменьшаться с повышением концентрации в ней элемента-раскислителя.

С целью снижения угара молибдена, хрома, ванадия при переплаве отходов стали 40X5MФС проводилось предварительное раскисление. При этом в печь вводили вначале ферромарганец, затем ферросилиций или силикокальций. Окончательное раскисление проводили за 10 мин до выпуска плавки из печи.

Успех раскисления зависит от полноты удаления продуктов раскисления из расплава. Всплывание неметаллических частиц в жидком металле происходит под действием силы

$$f = \frac{4}{3} \pi r^2 (\gamma_m - \gamma_{шл}), \quad (4.26)$$

где r – радиус частицы;

$\gamma_m, \gamma_{шл}$ – плотность металла и шлаковых частиц, соответственно.

Сопrotивление среды движению малых сферических частиц определяется законом Стокса

$$S = 6\pi r v \frac{\eta}{g}, \quad (4.27)$$

где v – скорость всплывания;

η – динамическая вязкость металла;

g – ускорение свободного падения.

Определяя скорость всплывания из условия $S=f$, имеем

$$v = \frac{2}{9} \frac{g}{\eta} r^2 (\gamma_m - \gamma_{шл}). \quad (4.28)$$

Закон Стокса удовлетворительно описывает удаление сравнительно крупных включений сферической формы в спокойной ванне. Крупные включения (10...20 мкм и более) в этих условиях всплывают в металлической среде и довольно быстро удаляются из металла. Поэтому желательно, чтобы включения при температуре сталеварения находились в жидком состоянии. Что касается мелких включений, то их укрупнение происходит очень медленно и конвективные потоки сводят на нет действие закона Стокса. Перенос мелких включений на границу «металл – шлак» осуществляется, в основном, движущейся жидкостью, причем с увеличением интенсивности перемешивания частота выхода включений к шлаковой фазе возрастает. Помимо этого конвекция способствует укрупнению включений за счет увеличения частоты столкновения включений друг с другом. После того, как включение подведено к межфазной поверхности, начинается второй этап – переход границы раздела «металл – шлак». На этом этапе решающее значение приобретают явления смачивания. Включения, плохо смачиваемые металлом (Al_2O_3 , ZrO_2), легко переходят из металла в шлак и ассимилируются шлаковой фазой. Включения (FeO , MnO , SiO_2), хорошо смачиваемые сталью, переходят межфазную поверхность с трудом, поэтому могут накапливаться на границе раздела «шлак – металл», и вероятность возвращения их в металл существенно больше, чем несмачиваемых включений.

Таким образом размер включений определяет способ его доставки к межфазной границе. Крупные включения всплывают сами, мелкие – переносятся конвективными потоками расплава. На втором этапе удаления включений, связанном с переходом границы раздела, решающее значение приобретают поверхностные явления, и, прежде всего, смачивание неметаллических включений металлом и шлаком. Следовательно, более полно удаляются из расплавленной стали крупные включения, а также мелкие, но несмачиваемые металлом.

Включения, остающиеся в металле после его затвердевания, вызывают дефекты структуры и ухудшают механические свойства. На механические свойства оказывают влияние не только количество включений, но и их форма, распределение и пластичность. Причем эти факторы могут быть более важными.

Кроме эндогенных в отливке могут присутствовать и экзогенные включения, наличие которых отрицательно сказывается на механических свойствах и стойкости литых вставок пресс-форм. Одной из причин образования такого рода включений является разрушение поверхности литейной формы за счет прилипания формовочной смеси к моделям из-за адгезии, обусловленной силами межмолекулярного взаимодействия. За счет упругих свойств смеси на поверхности литейной формы могут образовываться трещины. Разупрочненная поверхность формы размывается металлом с образованием экзогенных включений. Таким образом, связь между моделью и поверхностью формы обусловлена наличием жидкостных пленок, появляющихся в процессе уплотнения, смачивающих поверхности модели и пограничные с поверхностью модели песчинки. Эта связь предопределяется как силами адгезии, так и силами когезии. Поэтому уменьшить или устранить силы связи между поверхностью модели и поверхностными песчинками формы можно путем создания условий, при которых работа адгезии жидкостной пленки на поверхности модели $W_{ам}$ была бы меньше когезии данной жидкости W_k , а когезия, в свою очередь, была бы меньше работы адгезии жидкости на поверхности песчинок $W_{ап}$: $W_{ам} < W_k < W_{ап}$. Уменьшение значения $W_{ап}$ достигается путем покрытия

модели лаками, припылами, жидкостями, при котором угол смачивания данной жидкостью поверхности модели будет больше, чем угол смачивания песчинок.

Однако кардинальным средством снижения количества экзогенных включений является применение керамизированной формы, где опорным слоем является жидкостекольная смесь, а облицовочным слоем – холодногеливаемая керамика. Керамизированная форма позволяет также повысить качество поверхности отливки, получить вставки пресс-форм с тонкорельефной поверхностью и минимальной механической обработкой.

Исследование химических реакций, протекающих в сложных гетерогенных системах – легированных инструментальных сталях, позволяет изменить раскислением состав и свойства эндогенных включений, повысить прочностные и пластические характеристики сталей; в сочетании с технологическими приемами – удешевить процесс получения литой оснастки.

4.10. Безотходная технология литья пресс-форм ЛПД в комбинированные формы

Пресс-формы для литья под давлением сплавов на медной основе, изготовленные традиционным способом, имеют низкую эксплуатационную стойкость. Дефицитность вольфрамсодержащих сталей для этих пресс-форм приводит к тому, что в производственных условиях применяют безвольфрамовые стали: хромованадиевые и хромованадиймолибденовые. Использование таких сталей не приводит к повышению стойкости оснастки и снижает производительность труда. Разработана технология получения композиционной оснастки ЛПД, стойкость и эксплуатационная надежность которой превышает существующую в 1,2...1,3 раза.

С этой целью используют отходы легированных сталей и лома пресс-форм, бывших в употреблении, к которым при плавке добавляются ферросплавы для обеспечения требуемого химического состава, а также проводится рафинирование и модифицирование расплава. Таким образом, шихта для плавки состоит из вторичных металлов и, по оценке специалистов, дешевле на 70 % первичного проката. Плавка металла проводится в кислой индукционной печи под слоем шлака, что позволяет свести к минимуму угар дорогостоящих легирующих элементов.

В качестве формообразующего элемента рекомендован керамизированный кокиль с толщиной стенки 5...8 мм. В сочетании с принудительным воздушным охлаждением это позволяет создать в отливке направленную кристаллизацию, обеспечивающую наибольшую плотность металла на рабочей поверхности литой вставки.

Использование керамизированного кокиля, кроме того, позволяет избежать обезуглероживания поверхностного слоя металла за счет ускоренного охлаждения поверхности и углеродосодержащих добавок в суспензию. Полученные таким образом вставки пресс-форм имеют светлую неокисленную поверхность шероховатостью по 6-му классу (ГОСТ 2789-95). Плотность металла рабочей поверхности вставки на 6-8% выше плотности остального металла.

После механической обработки присоединительных размеров, которой предшествует отжиг, проводится химико-термическая обработка вставок со следующими режимами: отжиг при 600 °С, закалка при 890 °С, высокотемпературный отпуск, диффузионное хромоазотирование. Окончательная обработка рабочей поверхности достигается нанесением защитного покрытия – карбида вольфрама на установке типа «Булат».

В процессе проведения экспериментальных работ были исследованы механические свойства, термостойкость, шероховатость поверхности и особенности структуры образцов из стали 40X5MФС, отлитых по предложенной технологии. При испытании образцов, установлено, что прочность при разрыве составляет 1150 МПа, т.е. близка к показаниям кованных сталей. Ударная вязкость после термообработки образцов находится в пределах 51,4...77,8 Дж/см², что в 1,5 раза превышает показатели кованой стали. Это обстоятельство предполагает повышенную стойкость литых вставок против разгара, что было проверено при исследовании термостойкости образцов в результате термодублирования. Литая сталь 40X5MФС дала первую трещину после 245 циклов, инкубационный период 180 циклов, налипание латуни отсутствует, что подтверждает ее повышенную стойкость. Образец, вырезанный из поковки, дал первую трещину на 120-ом цикле, инкубационный период составляет 30 циклов, изменение формы наблюдалось уже после 30 циклов.

Результаты металлографических исследований показали, что при получении точных литых пресс-форм в керамизированный кокиль с принудительным охлаждением благодаря созданию условий для направленного затвердевания получена литая структура, идентичная структуре прокатной закаленной стали (мартенситно-трооститной) с микротвердостью Н₅₀ 428...569. Изготовленные по разработанной технологии литые вставки пресс-форм имеют светлую неокисленную поверхность, на которой практически отсутствует обезуглероженный слой.

Таким образом, образцы из литой стали за счет направленной и ускоренной кристаллизации, комплексной обработки расплава показали более высокие эксплуатационные результаты в сравнении с образцами из кованой стали.

4.11. Исследование методов и сплавов, используемых для изготовления вставок пресс-форм ЛПД

Литьем под давлением получают наиболее качественные отливки, однако дальнейшее развитие этого способа литья тормозится по причинам низкой стойкости и высокой стоимости оснастки, которая формирует отливку. Для решения этой проблемы необходимо выбрать оптимальный способ получения вставок пресс-форм и оптимальный химический состав материала для них в зависимости от условий эксплуатации.

Известны такие способы получения формообразующей оснастки, как механическая обработка, электроэрозионное выжигание, методы пластической деформации, методы порошковой металлургии, литье специальными способами, ультразвуковая и электроннолучевая обработки и т.д. На сегодняшний день наиболее широко используются метод механической обработки и электроэрозионное выжигание.

Метод механической обработки поволоков из сложнолегированных инструментальных сталей, как наиболее исследованный и детально разработанный, используется в промышленности уже достаточно давно. Этот метод совместно с соответствующей термической или химико-термической обработкой позволяет получать оснастку с мелкозернистой структурой мартенсита, которая имеет высокие физико-механические свойства. Однако, этот метод имеет ряд недостатков, которые существенно влияют на рентабельность изготовления отливок, изготавливаемых литьем под давлением. Для изготовления механической обработкой необходимо: во-первых, высококвалифицированная рабочая сила, то есть значительные расходы на заработную плату; во-вторых, дорогостоящий режущий инструмент, который расходуется в значительном количестве.

Кроме того, при механической обработке в отходы поступает большое количество ценной инструментальной стали в виде стружки. Достаточно часто рабочая поверхность вставки, которая контактирует с расплавом, имеет дефекты в виде следов от режущего инструмента, которые во время эксплуатации становятся концентраторами напряжения и центрами зарождения трещин, приводящих к преждевременному выходу из строя вставок пресс-форм.

Метод электроэрозионного выжигания углеродными электродами формообразующей полости дает возможность получать гладкую поверхность разнообразной конфигурации вставок пресс-форм, что значительно упрощает процесс их изготовления. Однако этот процесс является достаточно энергоемким и при этом также образуется большое количество отходов сложнолегированных инструментальных сталей, которые растворены в электролите и не подлежат последующей утилизации. Также недостаточно изучено, какое влияние процесс выжигания оказывает на структуру и свойства поверхностного слоя рабочей полости вставки.

Наиболее оптимальными с учетом всех достоинств и недостатков являются способы литья с применением различных методов устранения дефектов литой структуры (неоднородности и крупнозернистости). Это, в первую очередь, литье в шликерные формы, литье по керамическим армированным стержням и литье в керамизированный кокиль.

Литье по керамическим стержням и в керамизированный кокиль, рабочая поверхность которых покрыта тонкодисперсной керамической оболочкой на основе этилсиликата, позволило получить отливку вставки с низкой шероховатостью поверхности, на которой практически отсутствовал обезуглероженный слой.

При изготовлении вставок решалась задача получения качественного расплава заданного химического состава без газовых и неметаллических включений. Для достижения мелкозернистой и однородной структуры отливки вставки пресс-формы, которая обеспечивает соответствующие физико-механические свойства, применялась комплексная обработка расплава (предварительное раскисление ферромарганцем, ферросилицием и силикокальцием, комплексное модифицирование, продувка инертным газом, принудительное охлаждение кокиля, подогрев прибыли и другие).

Если в конце плавки выпустить из печи сталь нераскисленной, то произойдет реакция между оставшимися углеродом и кислородом. Образовавшийся при этом оксид углерода частично уходит в атмосферу, частично остается в стали в виде газовых раковин. Поэтому основной задачей является получение металла с минимальным содержанием кислорода. Задача раскисления, кроме снижения содержания кислорода, сводится еще и к снижению содержания серы в металле и изменению формы, размера и характера распределения сульфидов, а также образованию соединений (оксидов, сульфидов, нитридов), увеличивающих число центров кристаллизации, влияющих на размер первичного зерна и соответствующие физико-механические свойства стали.

Для получения высоких механических свойств стали необходимо максимально освободить расплав от продуктов окисления, являющихся источником эндогенных включений. Достигается это продувкой расплава аргоном.

Для модифицирования сплавов практическое значение имеют поверхностно-активные металлы, характеризующиеся величиной свободной поверхностной энергии в жидком состоянии на границе с воздухом, т.е. минимальными силами сцепления в жидком состоянии, а следовательно, и более низкими температурами кипения (плавления) и твердостью. При этом поверхностная активность металла как модификатора определяется его способностью адсорбироваться на границе расплав – кристалл и характеризуется величиной понижения поверхностной энергии на этой границе. Поверхностная активность модификатора, присутствующего в расплаве, может быть опреде-

лена по изменению его поверхностного натяжения. Наилучшие результаты при этом достигаются в том случае, когда модифицируемый расплав будет иметь более высокое поверхностное натяжение по сравнению с поверхностным натяжением расплавленного модификатора. Поверхностное натяжение оказывает значительное влияние на динамическую вязкость металлической жидкости, поэтому модифицирование одновременно улучшает литейные свойства сплавов.

Эффективными модификаторами первого и второго рода являются комплексные раскислители Al-Ca-Si-B, при которых измельчается структура металлической матрицы, улучшается форма неметаллических включений, повышается жидкотекучесть и механические свойства. В состав комплексного модификатора входили ферроцерий, силикокальций и ферробор в оптимальном соотношении. Для устранения усадочных раковин и пористости, которые в значительной степени присущи сложнолегированным инструментальным сталям, и с целью экономии дорогостоящего сплава использовалась термоизолированная закрытая прибыль, подогреваемая специальным термическим патроном.

Кроме оптимального выбора способа изготовления формообразующей оснастки на ее себестоимость и стойкость оказывает не меньшее влияние правильный выбор материала для вставки пресс-формы. При выборе материала в первую очередь необходимо учитывать вид сплава, из которого будут получать отливки, так как механизм разрушения пресс-формы при литье конкретных сплавов различен. Хотя на процесс эксплуатации оснастки влияет большое количество факторов, взаимодействие которых учесть достаточно сложно, можно выделить основные. Формообразующая оснастка перестает отвечать требованиям, в основном, по трем причинам: термической усталости, формоизменениям и износу.

Для расчета оптимального выбора материала проводилась оценка стойкости и стоимости материалов, а также рассчитывался комплексный показатель «цена – качество» (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Комплексная оценка материалов для вставок пресс-форм

№ п/п	Материал	Стойкость, в баллах	Стоимость, в баллах	Показатель «цена – качество»
1.	30X2B8Ф	4,10	4,67	0,87
2.	30X2B8K5Ф	3,40	5,23	0,65
3.	30X5MФС	2,30	2,80	0,82
4.	30X10B4M5K3Ф1ГС	3,82	5,46	0,70
5.	40X5MФС	2,80	2,93	0,96
6.	Молибденовые сплавы	10,00	10,0	1,00
7.	Медные сплавы	8,50	9,06	0,93
8.	Ниобиевые сплавы	5,67	6,67	0,85

Термостойкость рассчитывалась по известным критериям с учетом химических и физико-механических свойств сплавов при температурах от 20 до 1000 °С и экспериментально исследовалась на опытных образцах. Стойкость оценивалась по 10-балльной шкале, по которой наивысшую стойкость показывали молибденовые сплавы (ЦСДМ1).

Стоимость материалов оценивалась также по 10 балльной шкале в соответствии с усредненным значением рыночной цены.

Как видно из табл. 4.5, наилучшим показателем обладают сплавы на основе молибдена, но, учитывая высокую стоимость, их применение целесообразно только при больших объемах производства отливок узкой номенклатуры, так как значительная стоимость формообразующей оснастки через амортизационные отчисления накладыва-

ется на себестоимость изготовления годных отливок. Медные и ниобиевые сплавы имеют ограниченную область применения, связанную с температурным режимом эксплуатации постоянных металлических форм.

Для литья под давлением в пресс-формы сплавов с температурой плавления 700 °С и выше (алюминиевые сплавы и, особенно, латуни) лучше всего себя показали сложнолегированные инструментальные стали. Традиционной является сталь 3Х2В8Ф, но значительное количество дорогостоящего и дефицитного вольфрама в ее составе увеличивает стоимость и ограничивает ее использование.

Наилучшим соотношением «цена – качество» среди аналогичных инструментальных сталей обладает сталь 40Х5МФС, в которой дорогостоящий вольфрам заменен на комплекс Мо-Si. Вставки пресс-форм, которые изготавливались из этой инструментальной стали, показали достаточно высокую термическую стойкость при литье в них латунных сплавов с температурой плавления 950...1050 °С.

Стали типа 3Х2В8К5Ф и мартенситно-старяющие стали (30Х10В4М5К3Ф1ГС) рекомендуется применять в низкотемпературных областях, например, для литья сплавов на основе цинка, магния и алюминия. Повышенная стоимость в этом случае компенсируется увеличением срока службы формообразующей оснастки вследствие невысоких температур эксплуатации.

На основе приведенных исследований была выбрана инструментальная сталь 40Х5МФС, из которой изготавливались вставки пресс-форм методами литья в керамизированный кокиль с использованием керамических армированных стержней. Полученные отливки исследовались на физико-механические свойства (испытания на разрыв и ударную вязкость), определялась структура и фазовый состав, проводились производственные испытания на термостойкость. Структура и механические свойства после проведения соответствующей химико-термической обработки удовлетворяли тем же требованиям, которые предъявляются к кованным сталям. При этом технология литья позволяла утилизировать вышедшие из строя вставки многократным переплавом, что значительно снижало их себестоимость.

Таким образом, себестоимость формообразующей оснастки из стали 40Х5МФС, которая была получена методом литья, была ниже, чем себестоимость при изготовлении методами механической обработки и электроэрозионного выжигания. В табл. 4.6 дана сравнительная характеристика затрат на изготовление вставки пресс-формы по изменяющимся статьям калькуляции в процентах. За 100 % приняты затраты по литейной технологии.

Таблица 4.6

Затраты на изготовление вставок пресс-форм различными методами

№ п/п	Статьи затрат	Механическая обработка	Точное литье	Электроэрозионное выжигание
1	Затраты на основные материалы	20,696	10,675	20,695
2	Затраты на вспомогательные материалы	–	0,413	0,244
3	Затраты на модельно-стержневую оснастку и режущий инструмент	20,41	0,321	2,444
4	Затраты на заработную плату	97,116	77,298	81,48
5	Затраты на текущий ремонт и обслуживание оборудования	1,514	0,382	1,829
6	Затраты на электроэнергию	3,684	8,757	9,397
7	Затраты на амортизацию оборудования	1,411	1,866	1,381
8	Затраты на амортизацию производственных площадей	0,128	0,285	0,085
Всего, %		144,982	100,00	117,573

Исследования методов и сплавов, которые используются для изготовления вставок пресс-форм для литья под давлением, с целью оптимизации и интенсификации процесса подтвердили целесообразность изготовления формообразующей оснастки методами точного литья из стали 40X5МФС, что позволяет рекомендовать их для промышленного применения.

4.12. Зубопротезные отливки высокого качества поверхности и размерной точности

Основной причиной изготовления зубных протезов путем штамповки коронок и литья промежуточной части с последующей пайкой является отсутствие технологии и материалов для получения цельнолитых каркасов. Процесс изготовления комбинированного протеза сложен и весьма трудоемок. Кроме того, штампованная коронка не точно воспроизводит конфигурацию восстанавливаемого зуба. А необходимость соединения припоем создает условия для возникновения гальваноза в полости рта. Эти недостатки снижают функциональную надежность и срок службы зубных протезов.

Получение цельнолитых каркасов зубных протезов требует применения специальных формовочных смесей, так как размеры отливок соответствуют размерам выплавляемой модели, изменение которых недопустимо, поскольку в каждом конкретном случае ее получают моделировкой из воскообразной композиции. Точность цельнолитой конструкции зависит прежде всего от компенсационных свойств формовочных смесей, которые определяются суммой термического расширения и расширения при твердении.

Большинство отечественных формовочных смесей имеют низкие показатели расширения. Одной из причин является отсутствие природных месторождений кристобалита, который имеет более высокое термическое расширение по сравнению с другими огнеупорными наполнителями. А получаемый искусственным путем кристобалит весьма дорогостоящий и имеет более низкие показатели по термическому коэффициенту линейного расширения (ТКЛР). Применение для замешивания смеси связующей жидкости – кремнезоля повышает компенсационные свойства и прочность литейных форм. Однако кремнезоль теряет свои связующие свойства при охлаждении ниже 0 °С, что затрудняет его транспортировку в холодное время года. При выборе составов формовочных смесей большинство исследователей стремится к увеличению данных показателей, не учитывая, что конечная точность зубопротезных отливок зависит от большего числа факторов.

Формовочные смеси на фосфате аммония или гипсе, которые используются при литье зубных протезов, твердеют за счет образования кристаллогидратов. Следовательно, изменения процесса твердения можно добиться введением добавок. Для смесей на гипсе твердение определяется степенью гидратации полугидрата гипса. Процесс гидратации представляет собой непрерывный процесс растворения полугидрата и выкристаллизовывание из раствора дигидрата. По мере роста кристаллогидратов гипса и их переплетения формируется поликристаллическая структура затвердевшего гипса.

Введение электролитов, например, галита, изменяет процесс образования зародышей кристаллогидратов, что приводит к увеличению времени начала твердения, текучести и прочности при сжатии. Эти изменения обуславливаются взаимным электростатическим притяжением и отталкиванием гидратированных ионов, создающих ионную атмосферу вокруг частиц огнеупорного наполнителя. Причем энергия их взаимодействия зависит от количества электролита, в нашем случае, галита. При небольших кон-

центрациях до 2 % он несколько изменяет растворимость полугидрата гипса и растворимость полугидрата выше чем дигидрата. Полученный раствор является перенасыщенным по отношению к последнему, что приводит к понижению текучести и прочности формовочных смесей, а также уменьшает время начала твердения. Особенно это проявляется в массах, где отношение вязкость / прочность (В/П) = (20...50)/100, но может возникнуть и в суспензиях – В/П = (60...90)/100.

При увеличении количества галита свыше 2 % наблюдается пересыщение по отношению к полугидрату, что обуславливает возрастание разжижения замешанной смеси. Текучесть резко увеличивается, а прочность падает. Это объясняется растворением части полугидрата в межкристаллических контактах, которые из-за форм и размеров термодинамически неустойчивы и имеют большую растворимость, чем дигидрат. Образующийся раствор способствует росту более крупных кристаллов дигидрата. Следствием уменьшения межкристаллических контактов и связанного с этим увеличения кристаллов является уменьшение степени их срастания, что приводит к разрыхлению структуры и дальнейшему снижению прочности на 20...30 % (4 % галита).

Несколько отличным является влияние электролита – галита на механизм твердения формовочных керамических смесей на фосфате аммония. В этом случае введение воды не приводит к твердению смеси, так как кристаллогидраты фосфата аммония не образуют пространственного каркаса. С этой целью вводится оксид магния и при взаимодействии образуется сложный комплекс из кристаллогидратов (магний-аммоний фосфатов). Введение галита позволяет резко увеличить растворение фосфата аммония, что обуславливает разжижающий эффект и увеличивает текучесть замешанной смеси.

Значительное увеличение текучести наблюдается при увеличении количества галита до 2 %, затем это влияние уменьшается. По нашему мнению, это обуславливается возрастанием количества сольватных новообразований в системе «галит – фосфат аммония», которые входят в кристаллическую решетку кристаллогидратов магний-аммоний фосфатов, образующихся при твердении. Они же и увеличивают время начала твердения смеси. Образование сложного комплекса из кристаллогидратов и сольватов приводит к повышению прочности формовочных керамических смесей после твердения.

Изменение механизма твердения формовочных керамических смесей на фосфате аммония при введении галогенидов щелочных и щелочно-земельных металлов приводит к изменению линейных размеров при твердении, а для смесей на гипсе эти изменения незначительны и составляют не более 0,15 %, поскольку для гипсовых смесей они только изменяют растворимость полугидрата гипса, а в случае фосфатных смесей – диффундируют в кристаллическую решетку кристаллогидратов магний-аммоний фосфатов. Это способствует увеличению прочности литейных форм-монолитов, снижению их расширения при твердении вследствие сближения узловых точек пространственного каркаса формовочной керамической смеси на фосфате аммония. Чтобы увеличить расширение при твердении необходимо введение флюорита, который имеет больший диаметр ионов, что и способствует увеличению расширения при твердении.

Кроме того, введение галогенидов металлов способствует образованию расплавов по границам зерен наполнителя. Являясь сильными минерализаторами, они замещают атомы кислорода в вершинах тетраэдров кристаллической решетки кремнезема при термообработке литейных форм. Нарушение связей между отдельными узлами кристаллической решетки кремнезема приводит к ослаблению структурных связей и повышению линейного термического расширения литейных форм. Это подтверждают и дериватограммы формовочных керамических смесей. Ярко выраженные эндотермические пики при температуре 573 °С указывают на переход β-кварца в α-кварц с измене-

нием линейного термического расширения на 0,2...0,35 % вследствие увеличения кристаллической решетки кремнезема. Наличие галогенидов приводит к небольшому эндозффекту при температуре 685...695 °С. При этой температуре наблюдается разупрочнение литейной формы и снижение ее прочности. Заливку расплавленного металла в литейную форму необходимо производить только при температурах на несколько десятков градусов выше или ниже, что исключает размыв стенок литейной формы.

Таким образом, введением галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов можно управлять технологическими и термомеханическими характеристиками формовочных керамических смесей и усадочно-деформационными процессами в литейной форме-монолите.

Возможность управления усадочно-деформационными процессами в форме за счет введения галогенидов открывает перспективу получения отливок с заданной размерной точностью. С этой целью варьированием трех рецептурных факторов, количества галита, флюорита и гипса (для гипсовых смесей) или периклаза (для фосфатных смесей) на трех уровнях были получены экспериментальные составы. Согласно выбранным критериям качества смеси, формы и отливки проведены исследования. Комплексные исследования экспериментальных составов позволили рассчитать коэффициенты математической модели. Адекватные конечные модели со всеми значимыми коэффициентами позволили построить зависимости рассматриваемых критериев качества от компонентного состава формовочных керамических смесей. Поиск оптимальных значений факторов для каждого свойства проводился на основе диссоциативно-шагового метода. Поиск оптимального решения по минимизации выхода приводится на примере поиска оптимального решения для размерной точности отливок, полученных в литейных формах-монолитах из гипсовых смесей. Как следует из первоначальной модели (рис. 4.41) для X_1 выполняется условие: $b_{11} < 0$; $|b_{11}| < \sum |b_{1i}|$ (рис. 4.41, б), следовательно минимум выхода размерных отклонений достигается при X_1 равном ± 1 , т.е. на границах эксперимента $X_1 = -1$ и $X_1 = +1$. Постановка значений X_{1opt} (рис. 4.41, в, г) привела к получению двух конкурирующих двухфакторных моделей (рис. 4.41, д, е). Из результатов сравнения оценок размерной точности в девяти точках точечных диаграмм видно, что лучшие результаты получены для двух типов рецептур. В верхней части точечной диаграммы модели (рис. 4.41, е), соответствующей формовочным керамическим смесям с 4 % галита ($X_1 = +1$), и в нижней части диаграммы модели (рис. 4.41, д), описывающей смеси при отсутствии галита ($X_1 = -1$). Совместное решение моделей (рис. 4.41, д, е) позволяет установить местоположение границы перехода L от одной рецептуры формовочных керамических смесей на гипсе к другой.

Аналогично проведена индивидуальная оптимизация других свойств формовочных керамических смесей. Оптимальный состав получали путем нахождения компромиссного решения по всему комплексу свойств смесей, форм и отливок. Следует отметить, что увеличением компенсационного расширения формовочных керамических смесей нельзя обеспечить заданную размерную точность отливок. Для контроля качества отливок необходима оценка размерной точности, а для контроля приготовления смесей – величина компенсационного расширения и прочности при сжатии. Размерные отклонения зубопротезных отливок не должны превышать $\Delta l = 0...+0,1$ %, а для смесей – компенсационное расширение не более 1,1 % (для гипсовых) и не более 1,9 % (для фосфатных) и прочность при сжатии не менее 5 МПа.

Оптимальный состав формовочных керамических смесей на гипсе, обеспечивающий заданную размерную точность зубопротезных отливок, содержит не более 1 % галита, флюорита не более 6 %, гипса – 20 %, остальное – пылевидный кварц. В оптимальном составе смесей на фосфате аммония содержится не более 0,5% галита, флюо-

рита не менее 2,5 %, периклаза не более 5 %, остальное – кварц различных фракций. Подводя итог вышесказанному, можно сделать вывод, что путем введения галогенидов щелочных и щелочноземельных металлов можно регулировать усадочно-деформационные процессы в литейной форме-монолите, а на основе оптимизации компонентного состава формовочных керамических смесей получить заданную размерную точность отливок.

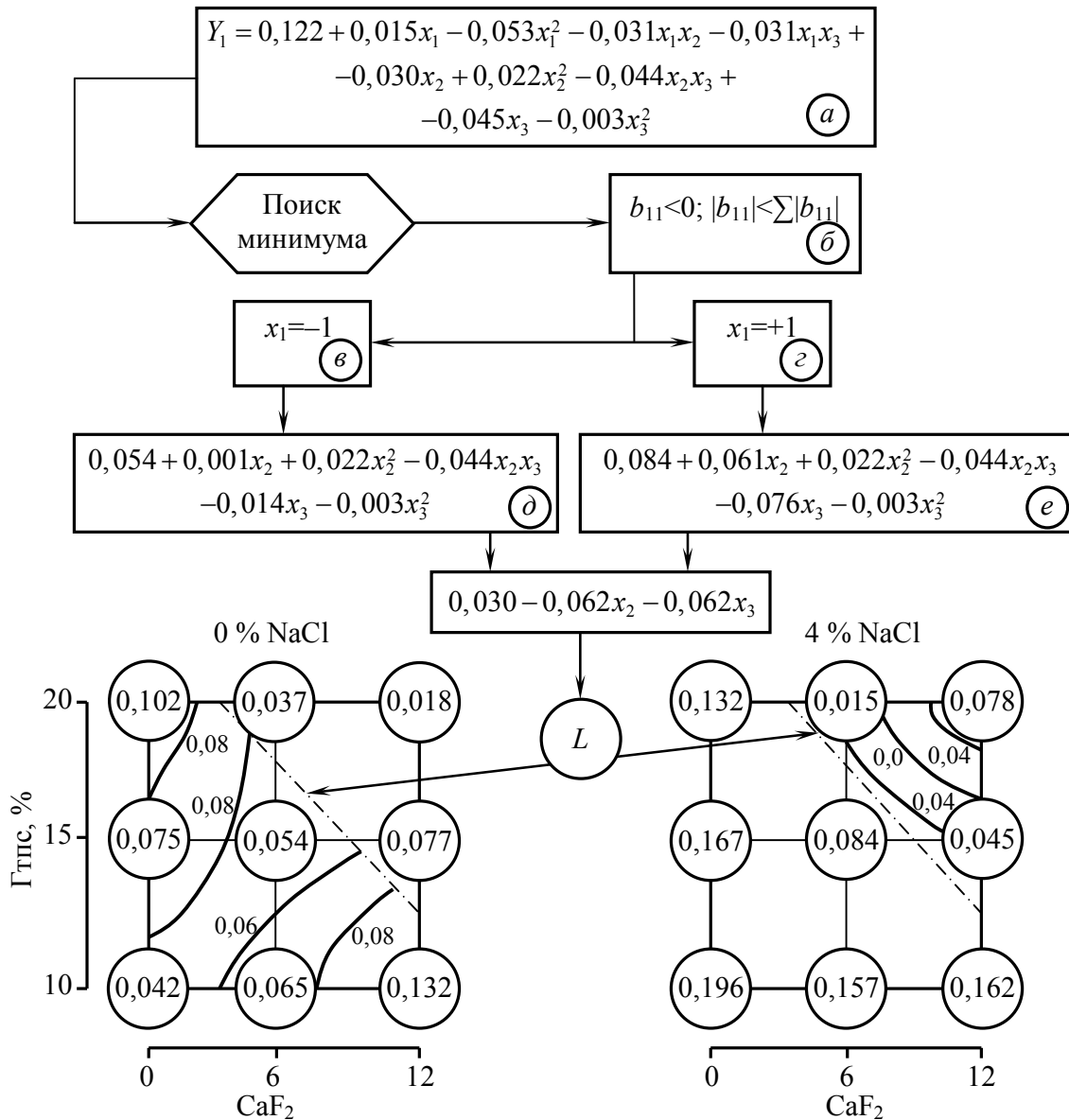


Рис. 4.41. Блок-схема поиска оптимальной размерной точности отливок, полученных в литейных формах из формовочных керамических смесей на гипсе

Однако качество зубопротезных отливок характеризуется не только размерными отклонениями, но и качеством поверхности. Отливки, полученные в литейных формах из смеси Силамин, используемой в практике отечественного зубопротезного литья, имеют низкое качество поверхности, большое количество шарообразных наплывов. По нашему мнению, это вызвано грубозернистыми угловатыми частицами огнеупорного наполнителя. Оценивая качество входящих наполнителей в разрабатываемые смеси с точки зрения их пригодности для формирования заданной структуры литейной формы

– монолита установлено, что кварцевые пески имеют овальную форму без резких переходов плоскостей. Для пылевидного кварца характерны угловатые частицы с большим разбросом размеров. По-видимому, для форм-монолитов, получаемых с минимальных количеством жидкости до 0,15, определяющим становится характер поверхности частиц наполнителя и, прежде всего, пылевидного кварца.

Таким образом, для создания плотной однородной поверхности необходимо было осуществить подбор гранулометрического состава наполнителя. Для исследования гранулометрического состава огнеупорного наполнителя и технологии введения и подготовки пылевидного кварца проведен эксперимент, согласно которому рассчитаны коэффициенты математической модели для технологических свойств смесей и качества отливок. Анализ моделей проводили по технологическим диаграммам, количество домолотого пылевидного кварца – время его помола, реализуемых в семи точках смесового треугольника. Установлено, что при заданном рецептурном составе формовочных керамических смесей и закреплённом гранулометрическом составе наполнителя увеличение времени помола пылевидного кварца улучшает качество поверхности отливок только при наличии крупных и средних фракций. Частицы домолотого пылевидного кварца, пропорционально продолжительности домола, приобретают более округлую форму. Это способствует лучшему формозаполнению, более плотной упаковке формовочной керамической смеси. Однако для составов, содержащих только мелкую фракцию наполнителя и домолотый пылевидный кварц, наблюдается снижение качества поверхности отливок. На наш взгляд, причиной является резкое увеличение числа контактов частиц наполнителя. Ухудшается формозаполнение и, как следствие, увеличение количества захваченного воздуха в теле литейной формы-монолита, особенно в месте раздела «модель – форма». Таким образом, для получения высокого качества поверхности отливок необходимо, чтобы средние и крупные частицы огнеупорного наполнителя равномерно заполняли объем с большим числом мельчайших частиц или мельчайшие частицы равномерно заполняли объем между крупными и средними фракциями.

Однако первый путь несколько ухудшает размерную точность отливок. Для получения зубопротезных отливок с точным прилеганием величина отклонения действительного размера должна быть не более +0,1 %. Следовательно, практически для всех составов смесей, содержащих более 50 % домолотого пылевидного кварца наблюдается усадка отливок и в большей степени, чем дольше его домол и меньше разброс фракционного состава наполнителя.

Таким образом, дополнительным помолом пылевидного кварца можно получить оптимальный состав формовочной керамической смеси для получения цельнолитых конструкций зубных протезов. Однако фиксирование гранулометрического состава наполнителя в семи точках смесового треугольника снижает возможность широкого варьирования фракционным составом с целью получения минимальных отклонений размеров как на макроуровне, так и микроуровне. Поэтому необходимо было определить влияние плавного изменения гранулометрического состава смесей на размерную точность и качество поверхности отливок с учетом дополнительного помола пылевидного кварца и варьирования его количества.

С целью получения оптимального состава при заданной размерной точности $\Delta l = 0 \dots +0,1$ % и шероховатости поверхности $Ra < 2$ мкм отливок была проведена реализация эксперимента в девяти точках технологической диаграммы «количество домолотого пылевидного кварца ПК-А – время его помола».

Установлено, что увеличение содержания средней и крупной фракций в равной степени способствует увеличению положительных отклонений размеров отливок. При содержании домолотого пылевидного кварца 75 % все величины размерных отклоне-

ний отрицательные – наблюдается усадка отливок. Здесь определяющим является влияние мельчайшей фракции – домолотого пылевидного кварца. Более крупные фракции рассредоточены во всем объеме формовочной керамической смеси и не оказывают влияния на размерную точность отливок. В остальных случаях более крупные фракции определяют размерную точность отливок. Увеличение количества крупной фракции $W_3=200\dots315$ мкм оказывает влияние в большей степени на размерные отклонения отливок, чем средняя фракция $W_2=100\dots160$ мкм. По нашему мнению, соотношение размеров частиц мелкой и крупной фракции предпочтительней, чем у мелкой и средней. Это подтверждается тем, что при увеличении времени помола пылевидного кварца уменьшается влияние крупной фракции по сравнению со средней. Соотношение размеров частиц крупной $W_3=200\dots315$ мкм и частиц домолотого пылевидного кварца в течение 1 часа с размером около 35 мкм составляет (6...8):1, что является оптимальным для наиболее плотной упаковки смеси и стабилизирующе действует на размерные отклонения отливок. При дальнейшем увеличении времени помола пылевидного кварца до 3 часов средний размер его частиц доходит до 22 мкм. В этом случае наиболее благоприятное соотношение размеров наблюдается со средней фракцией. Таким образом, определяющим для получения точных отливок в литейных формах-монолитах является соотношение между частицами различных фракций. При этом соотношение размеров должно быть (6...8):1, что дает возможность получать отливки с размерными отклонениями не более +0,1 %. Количество фракций с размерами частиц менее 50 мкм не должно превышать 50 % от общего массового количества. При содержании домолотого пылевидного кварца – 7,5 % время его помола практически не влияет на размерную точность отливок и приводит к усадке до – 0,5 %.

Однако увеличение времени помола пылевидного кварца оказывает положительное влияние на качество поверхности отливок. Уменьшение частиц огнеупорного наполнителя способствует более равномерному заполнению пространства между крупными частицами. Это справедливо только для гранулометрических составов формовочных керамических смесей, содержащих не более 50 % домолотого пылевидного кварца.

Оценивая гранулометрические составы смесей при различном количестве домолотого пылевидного кварца и времени его помола, получаем две группы конкурирующих составов с временем помола 3 часа с 25 и 50 % домолотого ПК-А. Однако составы с 25 % домолотого пылевидного кварца имеют низкую прочность при сжатии. Поэтому путем решения совместно трех уравнений для заданных показателей размерной точности, шероховатости и прочности при 50 % домолотого пылевидного кварца и времени его помола 3 часа получаем зону оптимального гранулометрического состава формовочных керамических смесей для литейных форм-монолитов (рис. 4.42). Поскольку зона оптимального гранулометрического состава характеризуется повышенным содержанием мельчайшей фракции, то следует исключить мелкую фракцию до 50 мкм. В этом случае оптимальные составы расположатся на грани смесового треугольника « W_2-W_3 ». А наиболее технологичный должен содержать 35 % средней фракции, 15% крупной и 50 % домолотого пылевидного кварца в течение 3 ч со средним размером частиц около 22 мкм. Отливки, полученные в литейных формах-монолитах, из смесей с оптимальным гранулометрическим составом, имеют высокую размерную точность $\Delta l=+0,08$ % и качество поверхности $Ra=1,9$ мкм.

На основании результатов исследований разработан технологический процесс получения цельнолитых конструкций зубных протезов по выплавляемым моделям в литейные формы-монолиты. Он включает два варианта: первый предназначен для изготовления протяженных конструкций с использованием предварительно изготовленного стержня – огнеупорной модели, получаемой дублированием гидроколлоидной массой

рабочей гипсовой модели. На огнеупорной модели-стержке производят моделирование воскообразной композицией будущего каркаса зубного протеза. По второму варианту моделировку каркаса проводят непосредственно на рабочей модели с последующим снятием конструкции. После формирования литниковой системы модельные кусты помещают в металлические кольца – опоки и заполняют жидкоподвижной массой из затворенной формовочной керамической смеси.

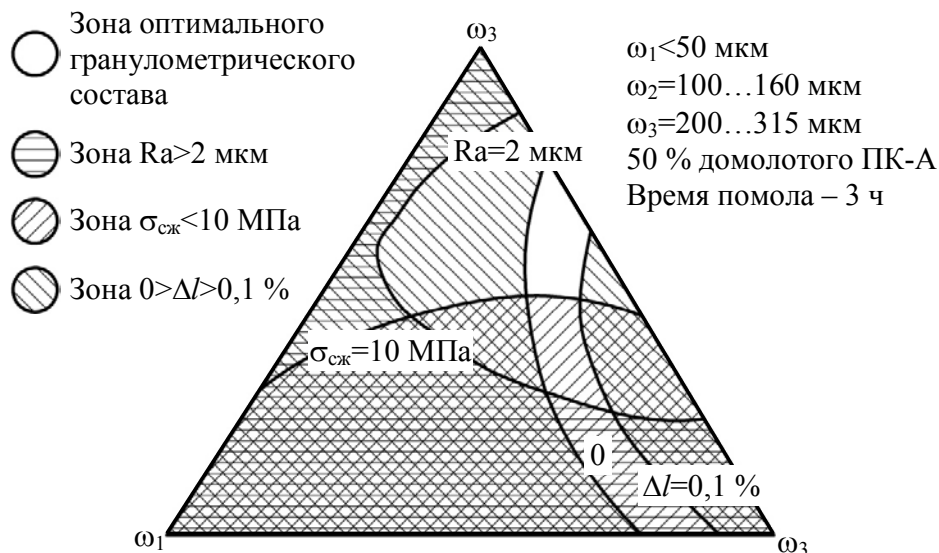


Рис. 4.42. Поиск оптимального гранулометрического состава формовочной керамической смеси

Литейные формы-монолиты прокаливают при 850...900 °С из фосфатных смесей и при температуре 750...800 °С из гипсовых смесей. Плавку и центробежную заливку форм расплавленным металлом производят на плавильно-заливочной установке ВЧИ 10/044. Охлаждение и выбивку гипсовых форм-монолитов производят в проточной воде, а фосфатных-пескоструйной очисткой или в расплаве щелочей. После отрезки литников цельнолитые каркасы передают для окончательного изготовления зубного протеза.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 502709 СССР. Диафрагма для отделения прибыли от отливки / Ф.Д. Оболенцев, В.В. Ясюков. Оpubл. в Б.И., № 6. 1976.
2. А. с. 531620 СССР. Смесь для изготовления легкоудаляемых стержней / Д.П. Грозов, Ф.Д. Оболенцев, М.Я. Телис, В.В. Ясюков. Оpubл. в Б.И. № 38, 1977.
3. А. с. 624694 СССР. Смесь для изготовления водорастворимого стержня / Ф.Д. Оболенцев, Л.А. Иванова, В.В. Ясюков, В.И. Саитов. Оpubл. в Б.И., № 35, 1978.
4. А. с. 863146 СССР. Способ изготовления полых металлических литейных стержней / А.Л.Становский, Ф.Д. Оболенцев, В.В. Ясюков, О.Е. Глазунова. Оpubл. в Б.И., № 34, 1981.
5. А. с. 916047 СССР. Двухслойная литейная форма / Л.А. Иванова, Ф.Д. Оболенцев, А.Л. Становский, В.В. Ясюков. – Оpubл. в Б.И., № 12. 1982.
6. А. с. 969462 СССР, МКИ В 22 F 3/26. Способ пропитки пористых спеченных заготовок / В.Г. Борщ, В. Б. Курушин, В. В. Ясюков. № 2999581 ; заявл. 03.11.80 ; опубл. 30.10.82, Бюл. № 40.
7. А. с. 996063 СССР, МКИ В 22 С 9/04. Способ изготовления биметаллических отливок / В.Б. Курушин, В.В. Ясюков. № 3292021 ; заявл. 25.05.81 ; опубл. 15.02.83, Бюл. № 6.
8. Баринов Ю.Г. Устранение газоусадочной пористости в отливках из алюминиево-магниевого сплава путем создания повышенного воздушного давления в прибыли и направленного затвердевания: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. Киев, 1985.
9. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М. : Металлургия, 1978. 245 с.
10. Бокштейн Б.С., Бокштейн С.З., Жуховицкий А.А. Термодинамика и кинетика диффузии в твердых телах. М. : Металлургия, 1974, 280 с.
11. Борщ В.Г. Получение композиционных отливок с качественной поверхностью при использовании металлокерамических оболочек: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Киев, 1981.
12. Борщ В.Г., Ключенко В.Н. Получение отливок с металлокерамическими покрытиями. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзній наук.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С.136–137.
13. Борщ В.Г., Курушин В.Б., Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Совершенствование технологии пропитки металлокерамических заготовок : информационный листок № 83–65. Одесса : ЦНТИ, 1983. 4 с.
14. Борщ В.Г., Попов В.С. Изготовление деталей с антифрикционными свойствами с применением пористых спеченных оболочек. *Детали машин*. К. : Техніка, 1986. Вип. 42. С. 120–123.
15. Воронова О.И. Исследование методов сплавов, используемых для изготовления вставок пресс-форм для литья под давлением. *Процессы литья*. 2014. № 4. С. 57–61.
16. Воронова О.И., Лысенко Т.В., Прокопович И.В., Ясюков В.В. Проблемы стойкости оснастки ЛПД. *Литво. Металургія : 2018 рік* : матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2018. С. 51–53.

17. Воронова О.И., Лысенко Т.В., Ясюков В.В. Легкоотделяемые прибыли для отливок пресс-форм литья под давлением. *Металл и литье Украины*. 2015. № 9. С. 26–30.
18. Гончаров Е.К., Онищенко Г.Г., Ясюков В.В. Повышение износостойкости пар трения механизмов периодического действия. В сб. *Современные проблемы триботехнологии*. Николаев, 1988. С. 154–155.
19. Елагин И.А., Лебедев В.Г., Ясюков В.В. Технология получения вставок пресс-форм с целью повышения стойкости. В сб. *II всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», присвячена Дню космонавтики*. Дніпропетровськ, 2000. С. 199.
20. Елагин И.А., Ясюков В.В. Пути повышения эксплуатационной надежности деталей ГТУ. В сб. *Всеукраїнська молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», присвячена Дню космонавтики*. Дніпропетровськ, 1999. С. 134.
21. Иванова Л.А. Процессы формирования отливок с тонкорельефной поверхностью повышенного качества: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук. Ленинград, 1984.
22. Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Керамизация песчаных форм – метод повышения качества отливок. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзній наук.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С. 106–107.
23. Каркин В.И. Керамизированные формы для точного литья стеклоформирующей оснастки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Киев, 1986.
24. Коваль А.М. Разработка технологии и выбор рациональных режимов изготовления литых композиционных шарошек: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Ленинград, 1989.
25. Курушин В.Б. Армированные проволокой и композиционными оболочками чугуны отливки: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. Киев, 1985.
26. Кушнир М.А. Точнолитые пресс-формы для получения изделий из стекла: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Киев, 1984.
27. Липтуга И.В., Воронова О.И., Ясюков В.В. Технология изготовления литых вставок пресс-форм. *Машиностроитель*. 1989. № 1. С. 23–24.
28. Липтуга И.В., Иванова Л.А., Клюенко В.Н., Становский А.Л. Использование двухслойных форм для повышения качества отливок. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзній наук.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С. 75–76.
29. Лысенко Т.В. Оптимизация технологических процессов получения отливок из железуглеродистых сплавов путем синхронизирующего управления тепломассообменом в литейной форме : автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук. Киев, 2006.
30. Лысенко Т.В. Управление качеством отливок в песчано-смоляных формах: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. Киев, 1995.
31. Лысенко Т.В., Ясюков В.В. Формирование поверхности раздела в композиционных отливках. В сб. *материалы XVIII семинара «Моделирование в прикладных научных исследованиях»*. Одесса, 2010. С. 65–66.
32. Лысенко Т.В., Ясюков В.В., Гладаренко Д.О. Физико-химические процессы на поверхности стальных отливок при литье в керамизированные формы. *Металл и литье Украины*. Киев, 2015. № 9. С. 22–26.
33. Лысенко Т.В., Ясюков В.В., Пенев И.Н., Савенко С.Н. *Металлообработка, оборудование и инструментарий*. 2010. № 1. С. 18–19.
34. Оболенцев Ф. Д., Борщ В. Г. Применение пористых металлокерамических оболочек при изготовлении отливок. *Литейное производство*. 1981. № 5. С. 15–16.
35. Оболенцев Ф.Д. ГПСМО-процесс и его применение для изготовления фасонных отливок. В сб. *Точность и качество поверхности отливок*. Москва, Ленинград, 1962. С. 117–131.
36. Оболенцев Ф.Д. Качество литых поверхностей. М, Л : Машгиз, 1961. 182 с.

37. Оболенцев Ф.Д. Технологические методы повышения эксплуатационной надежности отливок. *Новые материалы и методы их обработки, обеспечивающие повышение надежности и долговечности аппаратов, машин и механизмов*. Киев, 1981. С. 25–27.
38. Оболенцев Ф.Д. Точность отливок и пути ее повышения. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзній наук.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С. 3–4.
39. Оболенцев Ф.Д. Физико-химия и технология композиционного литья. Одесса : ОПИ, 1984. 97 с.
40. Оболенцев Ф.Д. Эксплуатационная надежность и ресурсосбережение при применении композиционных отливок и специальных неметаллических форм. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве*. Киев, Каунас, 1986. С. 97–99.
41. Оболенцев Ф.Д., Борщ В.Г. и др. Изготовление точнолитых вставок пресс-форм для литья под давлением цветных сплавов. *Технология и организация производства*. Киев, 1985. №2. С. 34–35.
42. Оболенцев Ф.Д., Борщ В.Г. Керамизация песчаных форм элементами, получаемыми деформацией и резанием. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзній наук.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С. 79–80.
43. Оболенцев Ф.Д., Борщ В.Г. Применение пористых металлокерамических оболочек при изготовлении отливок. *Литейное производство*. 1981. №5. С. 15–16.
44. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А. Методические указания по технологии литейного производства. Одесса : ОПИ, 1979. 111 с.
45. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Ясюков В.В., Селиванов Ю.А., Борщ В.Г. Развитие методов керамизации литейной формы. *В сб. Развитие методов и процессов образования литейных форм. Труды XVIII совещания по теории литейных процессов*. Изд-во «Наука», Москва, 1977. С. 139–144.
46. Оболенцев Ф.Д., Каркин В.И. Применение кварцевой керамики для уменьшения шероховатости поверхности отливок. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве*. Киев, Каунас, 1986. С. 102.
47. Оболенцев Ф.Д., Коваль А.И., Литвинова Е.И., и др. Армированная отливка буровой шарошки. *Литейное производство*. 1988. №7 С. 29.
48. Оболенцев Ф.Д., Кушнир М.А., Борщ В.Г., Каркин В.И. Точнолитая оснастка и эффективность ее применения. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, машины и оборудование в литейном производстве*. Одесса, 1983. С. 158–160.
49. Оболенцев Ф.Д., Кушнир М.А., Нечитайло В.А. Современная технология изготовления точнолитых рельефных пресс-форм. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве*. Киев, Каунас, 1986. С. 100–101.
50. Оболенцев Ф.Д., Кушнир М.А., Ясюков В.В. Исследование термической стойкости пресс-форм. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, высококачественные сплавы и оборудование в литейном производстве*. Киев, Каунас, 1986. С. 99–100.
51. Оболенцев Ф.Д., Литвинова Е.И., Попов С.В. Изготовление пористых металлокерамических оболочек для композиционных отливок. *Литейное производство*. 1985. № 1. С. 20–21.
52. Оболенцев Ф.Д., Литвинова Е.И., Попов С.В. Получение износостойких покрытий на деталях методом литья с металлокерамическими оболочками. *Совершенствование методов термической и химико-термической обработки в станкостроении*. М. : МИСиС, 1983. С. 30–32.
53. Оболенцев Ф.Д., Литвинова Е.И., Попов С.В., Коваль А.М. Диффузионные процессы – основа формирования композиционных отливок. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, машины и оборудование в литейном производстве*. Одесса, 1983. С. 163–166.
54. Оболенцев Ф.Д., Савченко О.Я. Геометрическая точность композиционных отливок с гальванопластическими оболочковыми стержнями. *Литейное производство*. 1983. № 11. С. 27–28.

55. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А., Юрченко Ю.Б. Дегазация керамизированных песчаных форм. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзный науч.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С. 105–106.
56. Оболенцев Ф.Д., Становский А.Л. Композиционный литье-экономичный метод формообразования деталей. Киев : Общество «Знание» УССР, 1982. 20 с.
57. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Моделирование температурных полей отливок при литье в керамические и керамизированные формы. *В сб. Актуальные вопросы технологии, совершенствования и модернизации оборудования литейного производства в крае*. Красноярск, 1983. С. 86–88.
58. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Повышение геометрической точности отливок при использовании солекерамических стержней. *В сб. Технология и оборудование литейного производства*. Москва, 1981. Вып. 8. С. 4–8.
59. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Получение биметаллических отливок при использовании металлокерамических каркасов : информационный листок № 85–29. Одесса : ЦНТИ, 1983. 4 с.
60. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Применение керамических перегородок с обогревом для легкоотделяемых прибылей. *В сб. Технология и организация производства*. Киев, 1978. С. 37–39.
61. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Солькерамические стержни тонкополостных отливок. *В сб. Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве*. Омск, 1982. С. 67–72.
62. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В. Теоретические и технологические вопросы применения солекерамических легкоудаляемых стержней для отливок из алюминиевых сплавов. *В сб. Технология производства, научная организация труда и управления*. Москва, 1978. № 5. С. 3–6.
63. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Грозов Д.П., Душкин А.М., Телис М.Я., Шухов Ф.В. Исследование и разработка процесса получения легкоудаляемых стержней для точных отливок. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзный науч.-техн. конф. литейщиков. Одесса, 1975. С. 102–104.
64. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Грозов Д.П., Телис М.Я. О применении легкоудаляемых стержней для тонкополостных отливок. *Литейное производство*. 1978. № 5. С. 30–31.
65. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Кушнир М.А. Технология изготовления точнолитых пресс-форм. *Информационный листок о научно-техническом достижении*. Одесса, 1985. № 85–41.
66. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Савченко О.Я., Становский А.Л. Композиционные методы получения тонкополостных отливок. *В сб. Новые высокопроизводительные технологические процессы, машины и оборудование в литейном производстве*. Одесса, Киев, 1983. С. 161–163.
67. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Савченко О.Я., Телис М.Я. Теплофизическая защита стержней для получения тонкополостных отливок. *Литейное производство*. 1982. № 9. С. 20–22.
68. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Сайтов В.И. Технология изготовления солекерамических легкоудаляемых стержней. *В сб. Технология производства, научная организация труда и управления*. Москва, 1976. № 6. С. 1–6.
69. Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Саченко О.Я., Телис М.Я. Теплофизическая защита стержней для получения тонкостенных отливок. *Литейное производство*. 1982. № 9. С. 20–22.
70. Оборский Г.А., Становский А.Л., Прокопович И.В., Духанина М.А. Выбор метрологического обеспечения управления сложными объектами литейного производства с трудноизмеримыми параметрами. *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии*. 2014. № 6/3 (72). С. 41–47.
71. Попов С.В. Композиционные износостойкие отливки, упрочненные металлокерамическими литыми оболочками : автореф. дис. ... на соискание научн. степени канд. техн. наук., Киев, 1987.
72. Попов С.В., Ясюков В.В., Каркин В.И. Снижение износа деталей при получении их методом композиционного литья. *В сб. Современные проблемы триботехнологии*. Николаев, 1988. С. 157–158.

73. Прокопович И.В., Духанина М.А., Монова Д.А. Управление свойствами структурочувствительных объектов литейного производства. *Труды одесского политехнического университета*. 2013. № 2 (41). С. 13–18.
74. Прокопович И.В., Швец П.С., Становская И.И., Духанина М.А. Адаптивный генетический алгоритм для «мягких» эволюционных вычислений. *Труды одесского политехнического университета*. 2013. № 2 (37). М. 218–223.
75. Прокопович І.В., Духаніна М.О., Становська І.І., Х. Валід Шер, Добровольська В.В., Торопенко О.В. Метрологічне забезпечення контролю щільності гетерогенних матеріалів. *Вісник ХПІ: Механіко-технологічні системи та комплекси*. 2016. № 50 (122). С. 22–28.
76. Савельева О.С., Прокопович І.В., Шмараев О.В., Духаніна М.О., Кошулян С.В., Саух І.А. Розробка методів вимірювання якості зчеплення між елементами сталєво-алюмінієвих виливків. *Міжнародний науковий журнал «Технологічний аудит та резерви виробництва»* 2016. № 1/2 (27). С. 68–73.
77. Савченко О.Я. Композиционные отливки с элементами, получаемыми гальванопластикой и точным литьем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Киев, 1985.
78. Савченко О.Я., Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Становский А.Л. Изготовление гальванопластических стержней для тонкополостных отливок. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1983. № 8. С. 77–80.
79. Савченко О.Я., Оболенцев Ф.Д., Ясюков В.В., Становский А.Л. Изготовление гальванопластических стержней для тонкополостных отливок. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. 1983. №8. С. 77–80.
80. Сайтов В.И. Обеспечение высокого качества поверхности и размерной точности зубопротезных отливок путем оптимизации составов формовочных керамических смесей: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. Ленинград, 1989.
81. Селиванов Ю.А. Исследование и разработка процесса получения тонкостенных отливок с повышенным качеством поверхности в песчано-керамических формах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Одесса, 1975.
82. Специальные способы литья : Справочник В.А. Ефимов и др. М. : Машиностроение, 1991, 436 с.
83. Становский А.Л. Повышение качества проектирования специальных способов литья: автореф. дис. на соискание научн. степени док. техн. наук. Москва, 1992.
84. Становский А.Л. Получение отливок с качественной поверхностью при литье черных металлов в формы на термореактивных связующих : автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук. Киев, 1980.
85. Становский А.Л., Савельева О.С., Прокопович И.В., Торопенко А.В., Духанина М.А. Разработка методов оптимизации теплообмена с помощью фрактальных сверток компьютерных томограмм. *Восточно-европейский журнал передовых технологий. Информационные технологии*. 2014. № 5 (64). С. 36–40.
86. Тонконогий В.М., Прокопович И.В., Духанина М.А., Шмараев А.В. Повышение качества машиностроительных литых деталей. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2015. № 10. С. 140–155.
87. Тонконогий В.М., Прокопович І.В., Духаніна М.О., Добровольська В.В. Методи вимірювання ефективних значень параметрів переносу в машинобудівних деталях із гетерогенних матеріалів. *Високі технології в машинобудуванні*. 2017. № 9. С. 126–134.
88. Чмых И.Д. Исследование и разработка процессов получения литых рабочих колес центробежных насосов с проточными полостями без механической обработки: автореф. дис. на получ. научн. степени канд. техн. наук. Киев, 1982.
89. Юрченко Ю.Б., Иванова Л.А. Оптимизация теплофизических процессов в литейных формах. *Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей* : Тези. доп. на XXVII Всесоюзній наук.-техн. конф. литейщиків. Одесса, 1975. С. 167–168.

90. Ясюков В.В. и др. Повышение работоспособности и эксплуатационной надежности деталей ГТУ. *В сб. Технічні науки: проблеми теорії та практики. Міжвузівський збірник наукових праць. «Наука і освіта».* Дніпропетровськ, 1999. Вип. 1. С. 95–99.
91. Ясюков В.В. Исследование и разработка процесса получения легкоудаляемых стержней для тонкопостных отливок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Киев, 1979.
92. Ясюков В.В. Кинетика пропитки пористых металлокерамических оболочек. *Моделирование в прикладных научных исследованиях* : материалы XV семинара. Одесса, 2009. С. 64–65.
93. Ясюков В.В. Получение гидроплотных отливок при использовании металлокерамических оболочек. *Современное оборудование, технология плавки, внепечной обработки и заливки чугуна.* Львов, 2003. С. 67.
94. Ясюков В.В. Пути повышения стойкости оснастки литья под давлением. *В сб. Ресурсосберегающие технологические процессы в литейном производстве.* Орджоникидзе. 1988. С. 66.
95. Ясюков В.В. Экзогенные включения в отливках как следствие разрушения поверхности форм при отделении моделей. *В сб. Неметаллические включения и газы в литейных сплавах* : Тез. доп. IV республіканської наук.-техн. конф. Запоріжжя, ЗМИ, 1985. С. 230–231.
96. Ясюков В.В., Буланова А.В. Развитие методов керамизации разовых песчаных форм. *Литье 2016* : матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2016. С. 255–257.
97. Ясюков В.В., Волянская К.В. Факторы, определяющие скорость диффузии между элементами композиционных отливок. *Литье 2016* : матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2016. С. 257–258.
98. Ясюков В.В., Воронова О.И. Безотходная технология литья пресс-форм ЛПД в комбинированные формы. *Тезисы докладов межреспубликанской научно-практической конференции «Феррифосфатные ХТС и технология получения на их основе высококачественных отливок».* Липецк, 1987. С. 101–103.
99. Ясюков В.В., Колесник Е.В. Формирование поверхности раздела в композиционных отливках: материалы VI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 2014, С. 66–67.
100. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Волянская К.В. Композиционные отливки с регулируемым поверхностным слоем. *Металл и литье Украины.* 2016. № 4. С. 36–40.
101. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Воронова О. И. Композиционное литье – средство повышения эксплуатационной надежности литых деталей. *Металл и литье Украины.* 2017. № 8–10. С. 43–47.
102. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Воронова О.И. Перспектива применения композиционного литья. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні.* матеріали X міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 2018, С. 198–199.
103. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Крейцер К.А. Кинетика пропитки пористых металлокерамических оболочек : материалы X міжнар. наук.-техн. конф., Запоріжжя, 2014. С. 261–262.
104. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Инновационные технологии формирования качественного поверхностного слоя отливки. материалы VI міжнар. наук.-техн. конф. Краматорск, 2017. С. 152–154.
105. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Повышение эксплуатационной надежности отливок за счет улучшения качества отливок. *Литво. Металургія : 2018 рік* : матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2018, С. 223–224.
106. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И. Процессы кристаллизации при наложении давления и охлаждения на жидкий металл отливки. материалы VI міжнар. наук.-техн. конф. Краматорск, 2017. С. 154–155.
107. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И., Пархоменко Е.А. Методы воздействия на процесс формирования отливки. *Металл и литье Украины.* 2018. № 3–4. С. 42–46.
108. Ясюков В.В., Лысенко Т.В., Солоненко Л.И., Чередник В.А. Анализ и синтез физико-химического воздействия на эксплуатационную надежность отливок. *Металл и литье Украины.* 2016. № 8–9. С. 19–23.

109. Ясюков В.В., Оболенцев Ф.Д. Износостойкие композиционные отливки, работающие в абразивных средах при высоких температурах. *В сб. Современные проблемы триботехнологии*. Николаев, 1988. С. 142–143.
110. Ясюков В.В., Пархоменко Е.А., Замятин С.А. Условия получения оснастки ЛПД с высокой геометрической точностью и эксплуатационной надежностью. *Литво. Металургія : 2017 рік : матеріали XIII міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2017*. С. 263–264.
111. Ясюков В.В., Рудницкий Я.М. Условия формирования композиционных отливок с литыми оболочками. *Литье 2016 : матеріал XII міжнари. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2016*. С. 259–260.
112. Ясюков В.В., Савченко О.Я. Применение высокопрочного чугуна для вставок пресс-форм литья под давлением. *В сб. Полифосфатные холоднотвердеющие смеси и отливки из высокопрочного чугуна*. Липецк, 1989. С. 80–82.
113. Ясюков В.В., Солоненко Л.И., Цыбенко О.В. Композиционные вставки пресс-форм литья под давлением. *Металл и литье Украины*. 2015. № 9. С. 26–29.
114. Ясюков В.В., Тур М.П., Гофман А. Формирование качественных композиционных отливок. *Литво. Металургія : 2018 рік : матеріали XIV міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2018*. С. 225–226.

Приложение А

ПОЛУЧЕНИЕ ОТЛИВОК С ТОНКОРЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

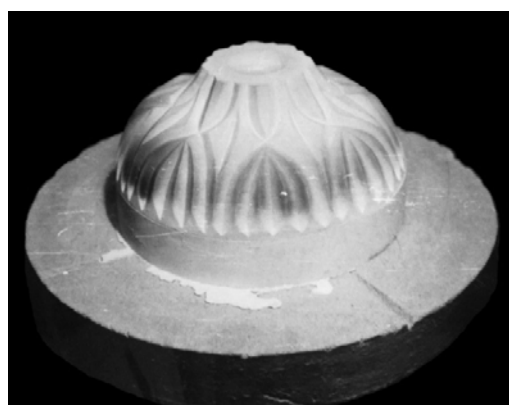
Разработанная технология предусматривает изготовление по стеклянному эталону (хрусталь) промодели из легкоплавкого модельного материала, изготовления по ней керамизированного стержня, который после термообработки устанавливается в песчаную форму и заливается чугуном. Таким образом, рабочая поверхность будущей пресс-формы формируется за счет последовательных негативных и позитивных отображений рельефа стеклянного эталона.



a



б



в



г

Рис. А-1. Конфетница № 3460 (Киевский завод художественного стекла):
a – эталон; *б* – промодель; *в* – керамизированный стержень; *г* – отливка



а



б



в



г

Рис. А-2. Ваза для цветов № 3457 (Киевский завод художественного стекла):
а – эталон; *б* – промодель; *в* – керамизированный стержень; *г* – отливка



a



б



в

Рис. А-3. Ваза для фруктов №3063 (Киевский завод художественного стекла):
a – эталон; *б* – отливка; *в* – кокиль в сборе



a

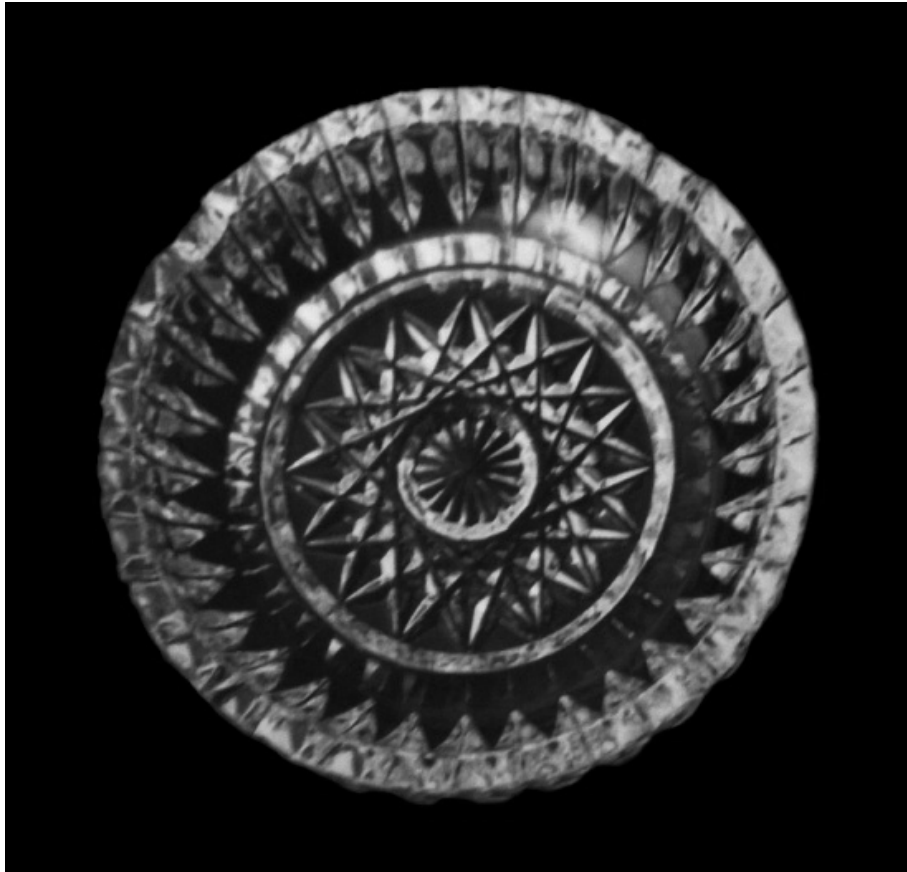


б



в

Рис. А-4. Салатник №3062 (Киевский завод художественного стекла):
a – эталон; *б, в* – отливки



а



б

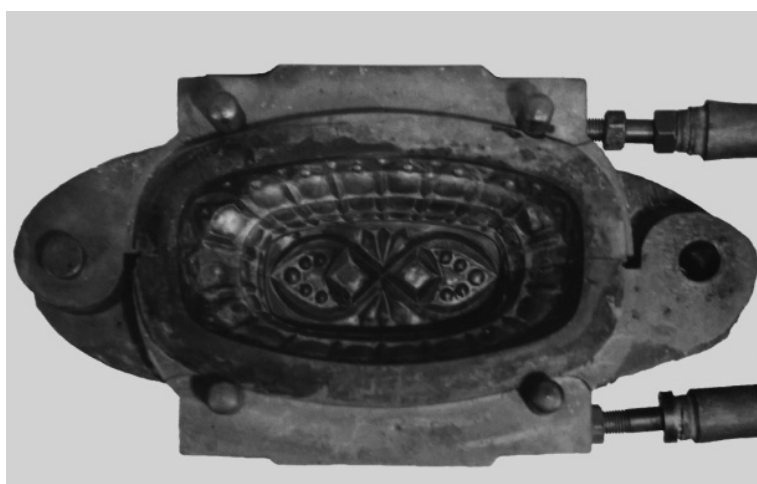
Рис. А-5. Пепельница № 2279 (ПО «Радуга» г. Львов):
а – эталон; *б* – отливка



а



б



в

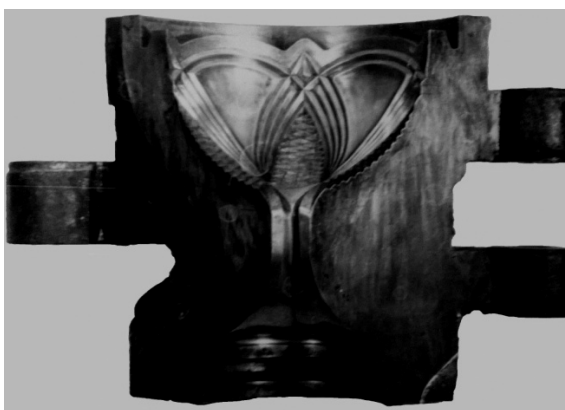
Рис. А-6. Салатник № 3594 (Киевский завод художественного стекла):
а – эталон; *б* – отливка; *в* – кокиль в сборе



a

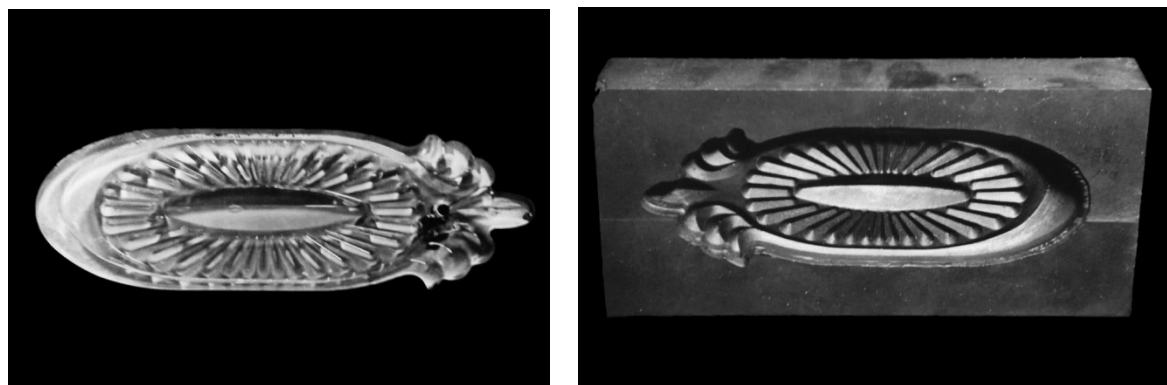


б



в

Рис. А-7. Ваза для фруктов №4102 (Стрыйский стекольный завод):
a – эталон; *б* – отливка; *в* – половина кокиля с вертикальным разъемом



a

б

Рис. А-8. Подвеска «Ореол-12 (Светотехника, Саранск): *a* – эталон; *б* – вставка в пресс-форму



a

б

в

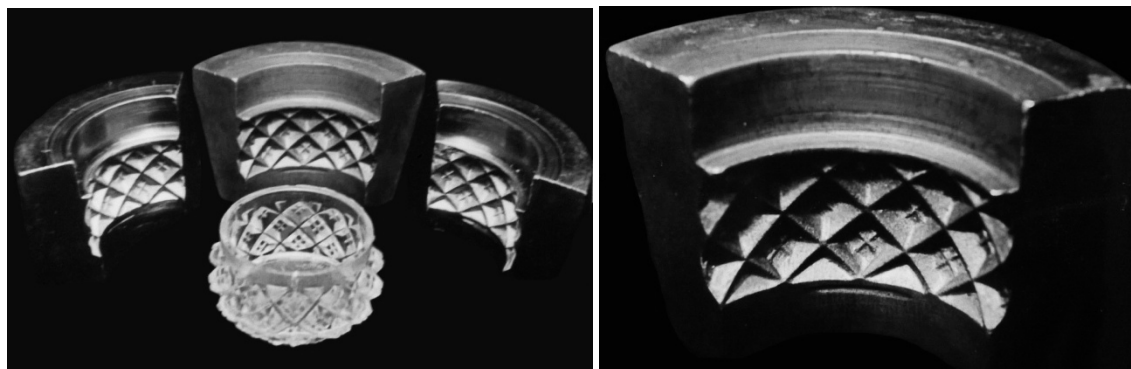
Рис. А-9. Плафон (Брест, стекольный завод): *a* – эталон; *б, в* – варианты кокиля



a

б

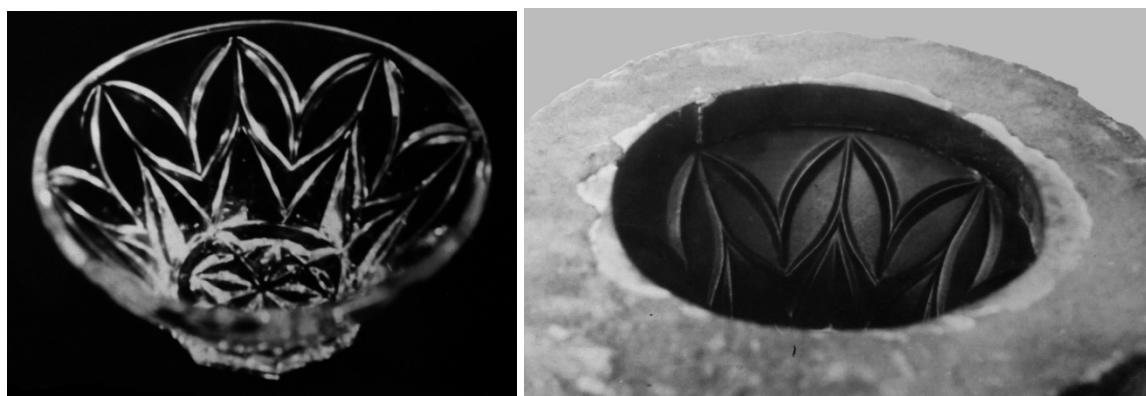
Рис. А-10. Сувенир «Олимпийский» (Светотехника, Саранск): *a* – эталон; *б* – кокиль



a

б

Рис. А-11. Солонка (завод «Полимер», Одесса): *a* – эталон с элементами кокиля, *б* – элемент кокиля



a

б

Рис. А-12. Салатница (Киевский завод художественного стекла): *a* – эталон; *б* – кокиль



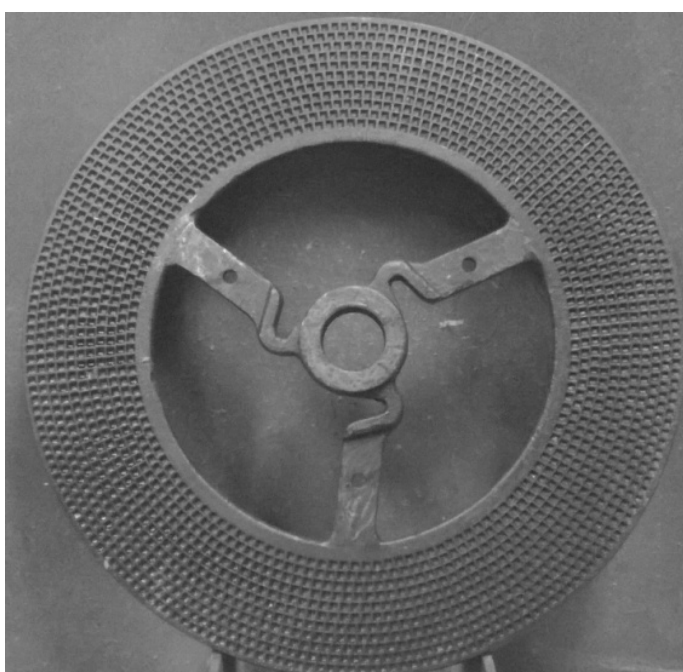
Рис. А-13. Фрагмент литого вала



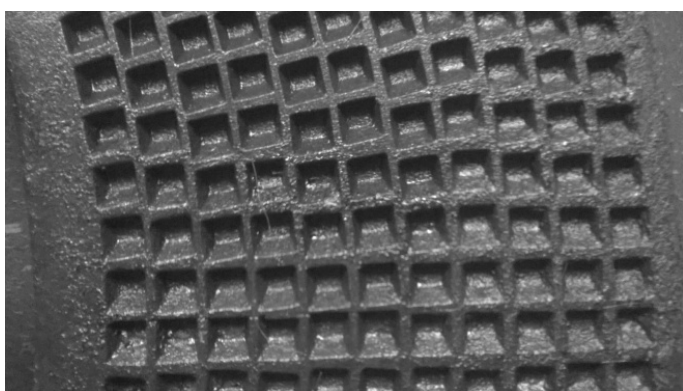
Рис. А-14. Фрагмент точнолитой пресс-формы



Рис. А-15. Точнолитой копир



а



б

Рис. А-16. Диск триера, отлитый в керамизированную форму: *а* – общий вид; *б* – фрагмент

Приложение Б

СОЛЕКЕРАМИКА ТВЕРДОФАЗНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ ЛИТЬЯ ТОНКОПОЛОСТНЫХ ОТЛИВОК

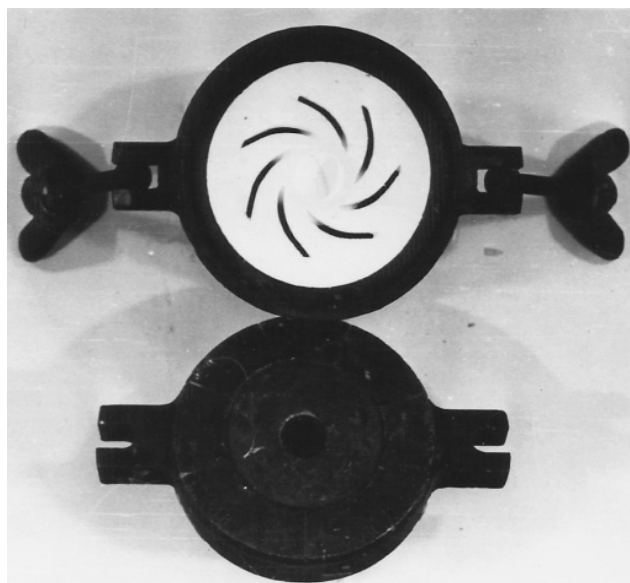
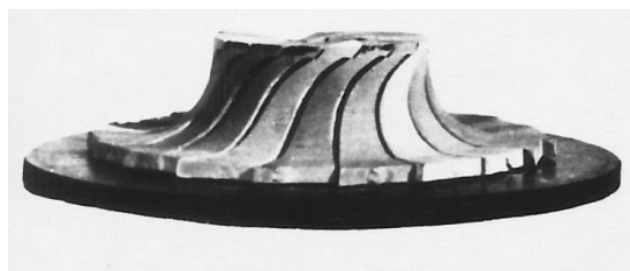
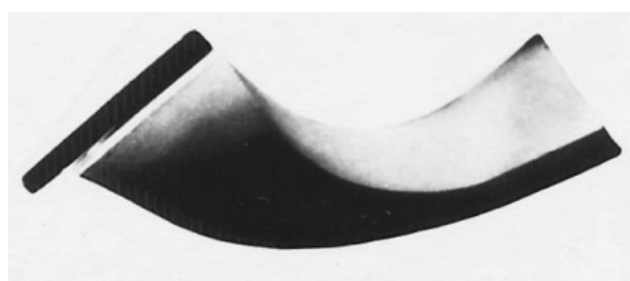


Рис. Б-1. Кокиль со стержнем перед заливкой



a

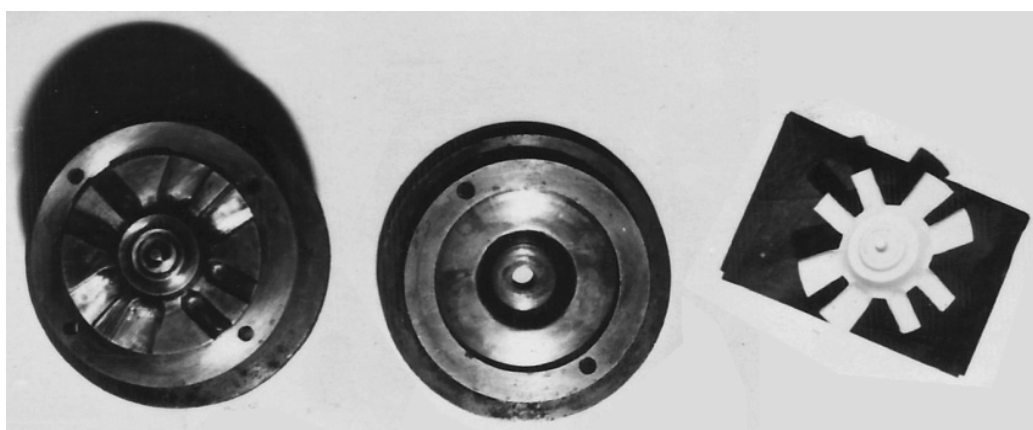


б

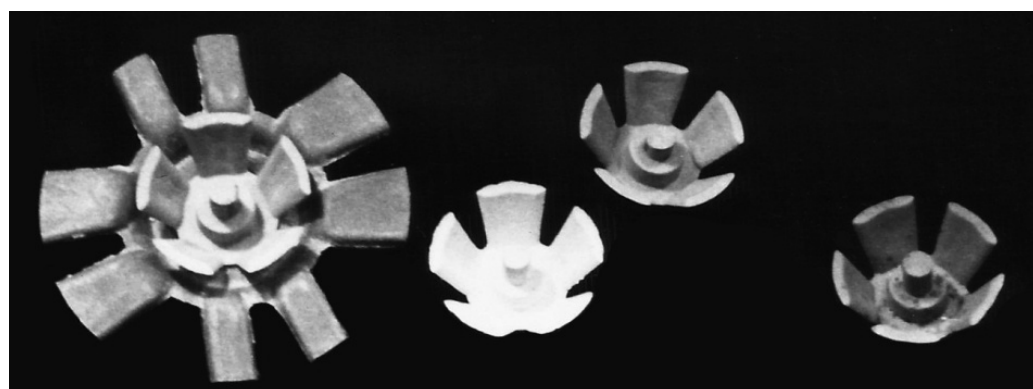
Рис. Б-2. Солекерамический стержень лопастного колеса (*a*), собранный из отдельных элементов (*б*)



Рис. Б-3. Лопастные колеса различной конструкции из сплава АЛ2

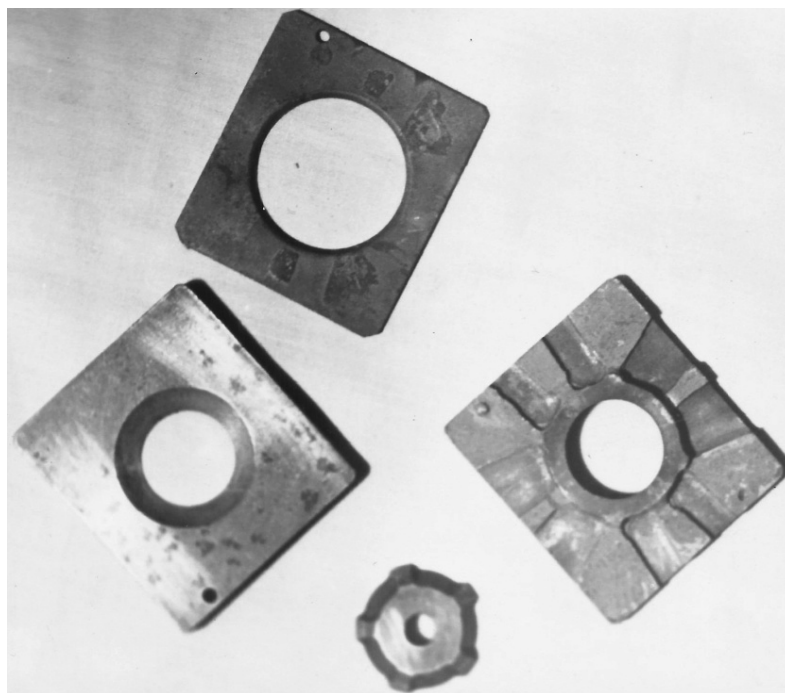


а

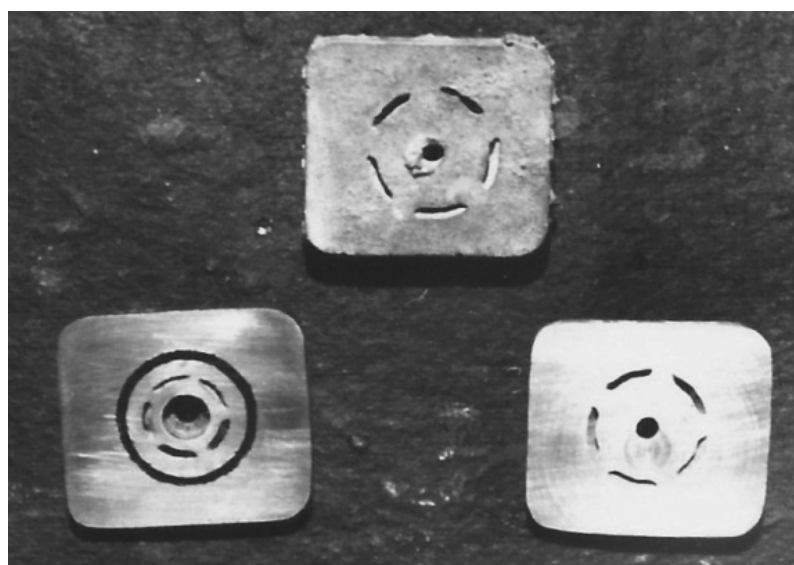


б

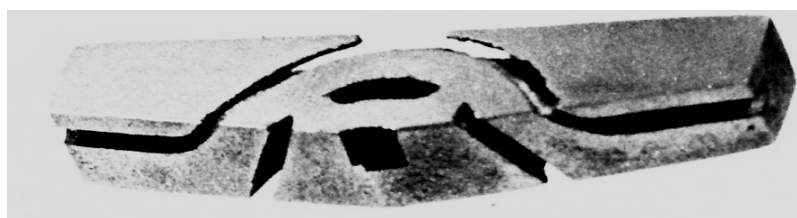
Рис. Б-4. Пресс-форма для изготовления стержней клапанной плиты ККХ 12010 (*а*), комплект стержней для клапанной плиты (*б*)



a

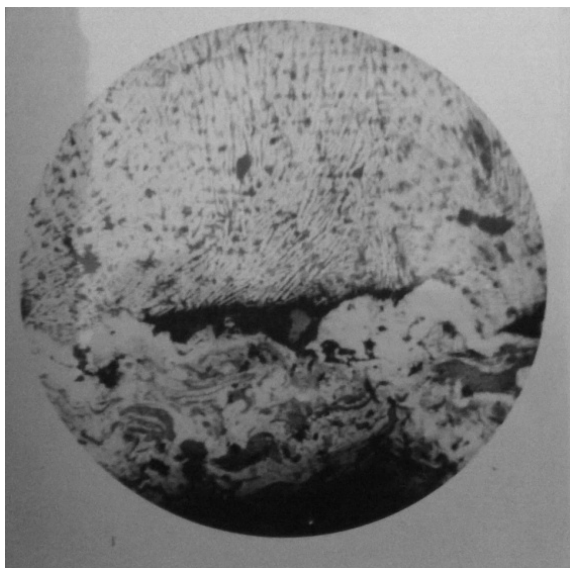


б

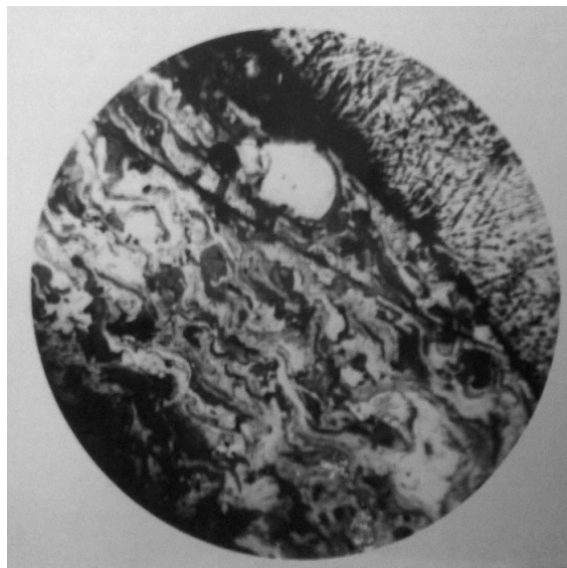


в

Рис. Б-5. Клапанная плита ККХ 12010: *a* – механически обработанные детали, соединяемые последующей пайкой; *б* – внешний вид отливки; *в* – разрез отливки



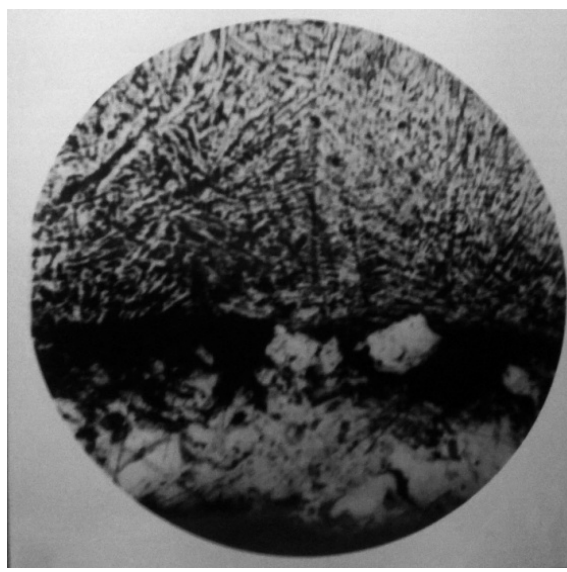
a



б

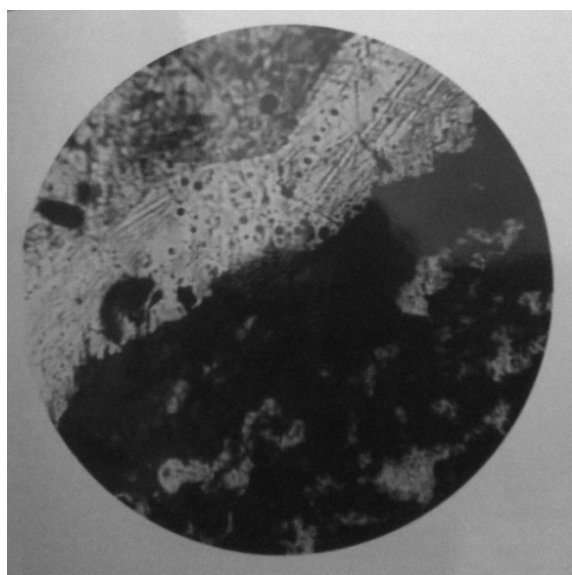


в

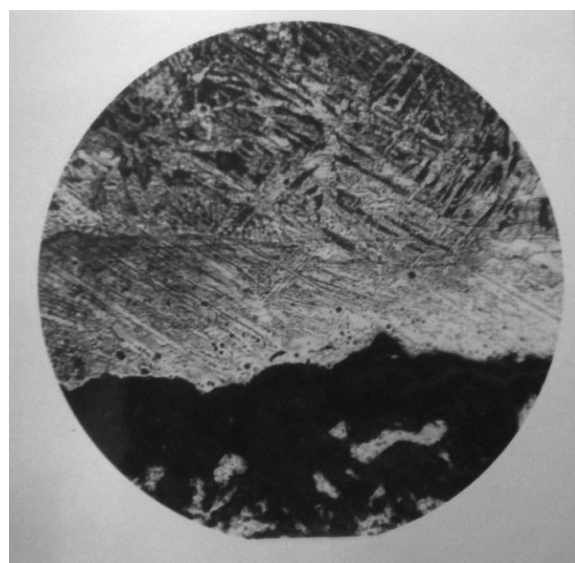


г

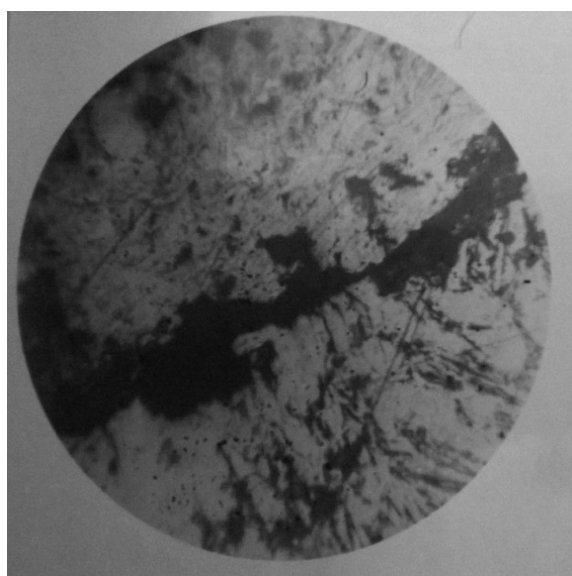
Рис. Б-6. Микроструктура отливок из чугуна СЧ 21-40, напыленный слой – никель ($\times 140$):
a – $\delta=0,2$ мм, $r=1$ мм; *б* – $\delta=0,3$ мм, $r=2$ мм; *в* – $\delta=0,5$ мм, $r=2$ мм; *г* – $\delta=0,25$ мм, $r=3$ мм
(δ – толщина напыленной оболочки, r – толщина отливки)



a



б



в



г

Рис. Б-7. Микроструктура переходного слоя отливок из стали ($\times 140$):
a – $\delta=0,3$ мм, $r=2$ мм (сталь 25ЛП); *б* – $\delta=0,5$ мм, $r=3$ мм (сталь 25ЛП);
в – $\delta=0,15$ мм, $r=3$ мм (сталь 20Х13Л); *г* – $\delta=0,5$ мм, $r=3$ мм (сталь 20Х13Л)
 (δ – толщина напыленной оболочки, r – толщина отливки)

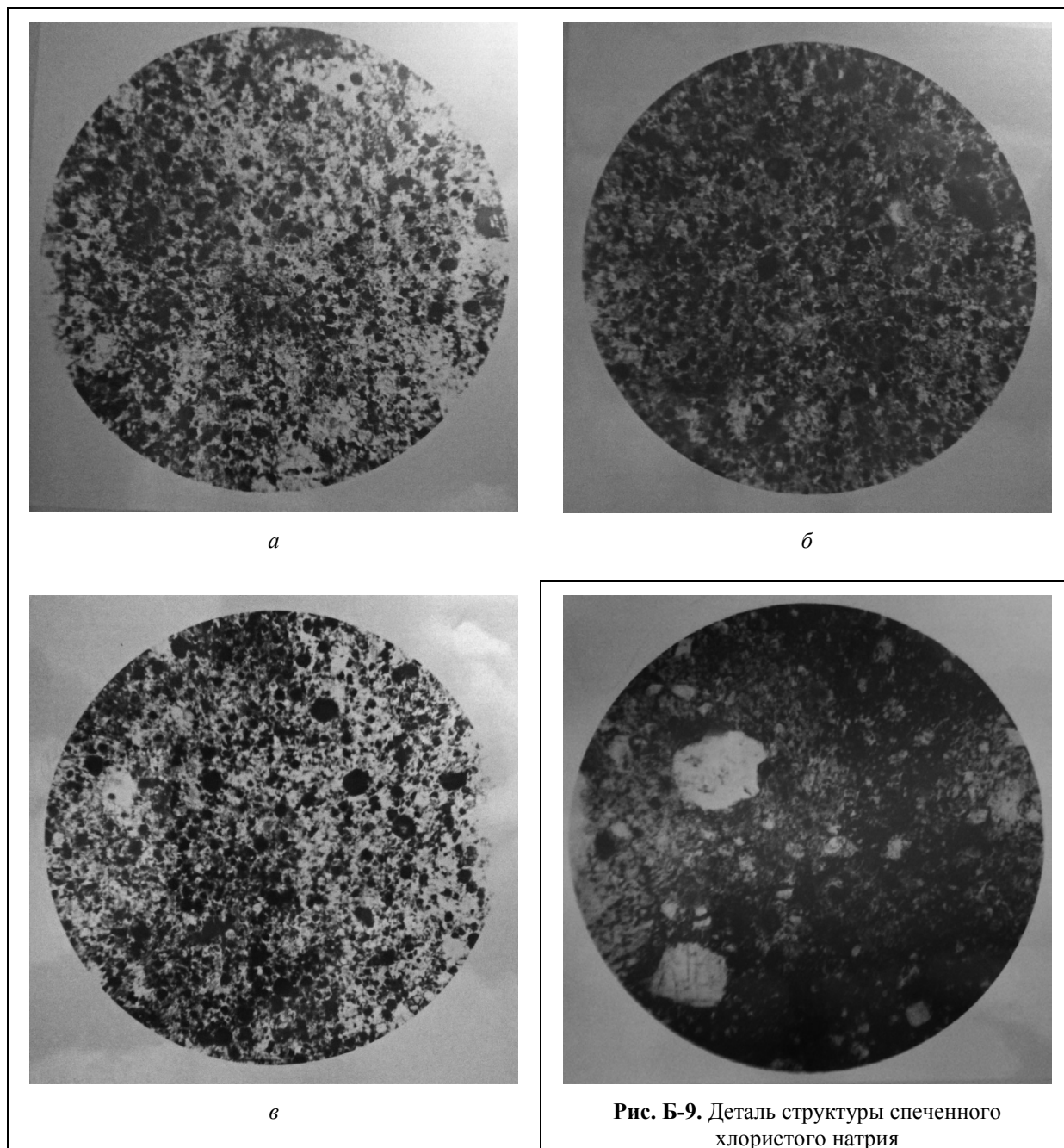
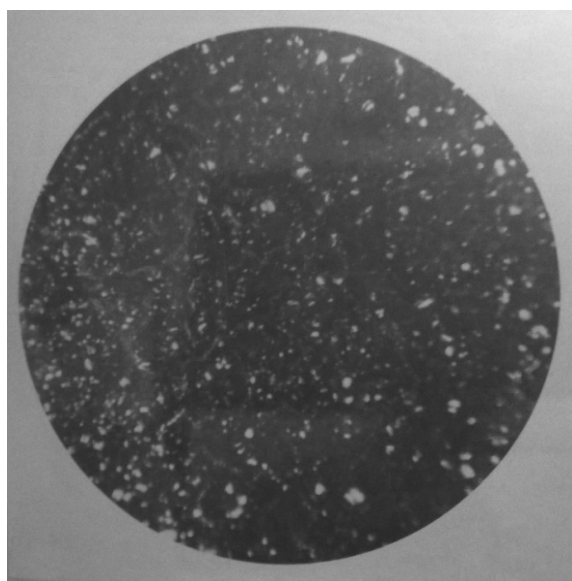
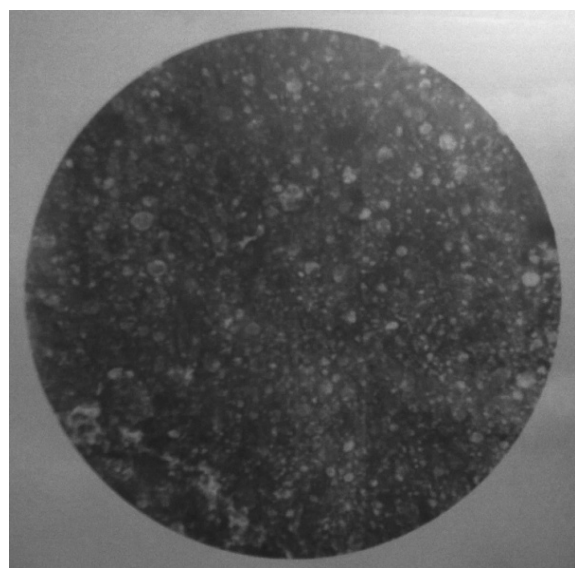


Рис. Б-8. Структура стержней из хлористого натрия с различной удельной поверхностью исходного порошка соли ($\times 140$): *a* – 54,5 1/мм; *б* – 112 1/мм; *в* – 164 1/мм

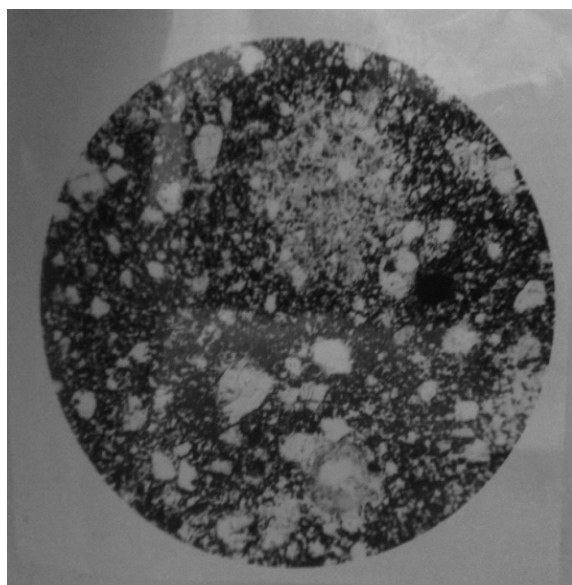
Рис. Б-9. Деталь структуры спеченного хлористого натрия с чрезмерным ростом зерна ($\times 140$)



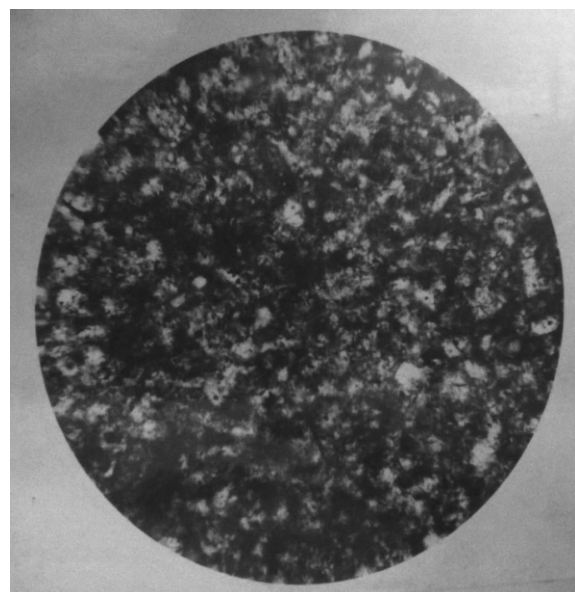
a



б



в



г

Рис. Б-10. Пористость керамики ($\times 140$): *a* – на основе циркона; *б* – корундовой; *в* – на основе хлористого натрия; *г* – на основе алюмината натрия



Рис. Б-11. Солекерамические стержни для охлаждаемых поршней ДВС различного конструктивного исполнения

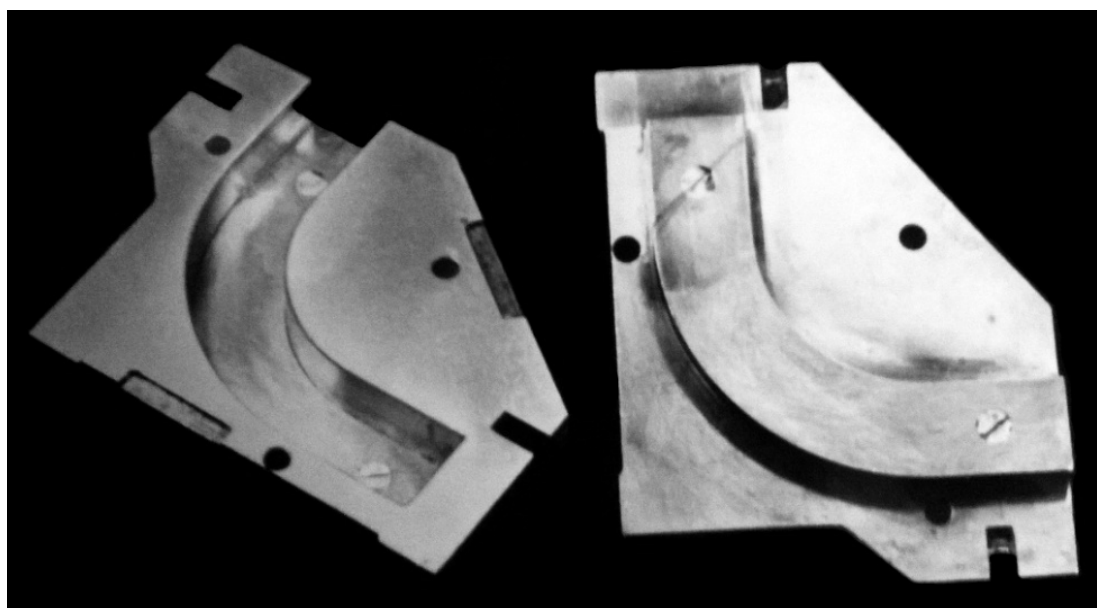
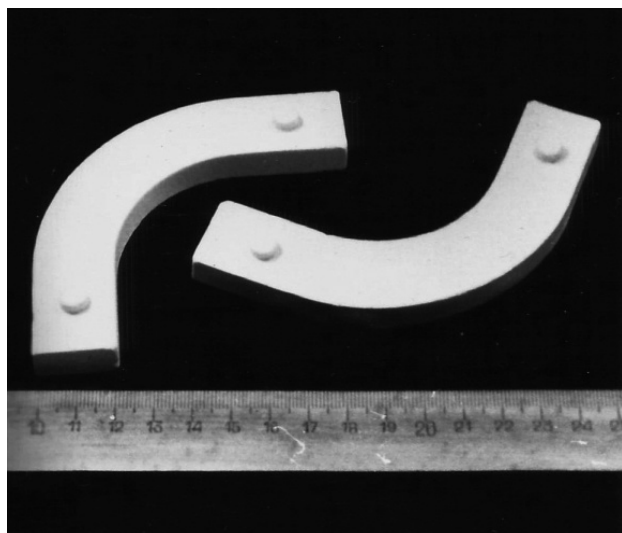
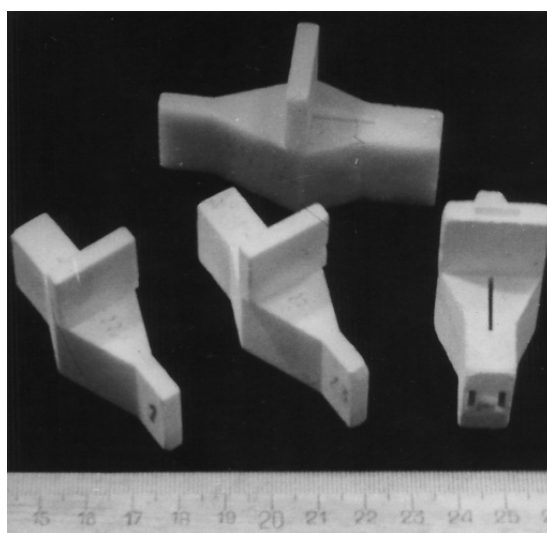


Рис. Б-12. Пресс-форма для изготовления стержней волноводных элементов радиоприборов СВЧ



a



б

Рис. Б-13. Солекерамические стержни для отливок волноводных элементов радиоприборов СВЧ:
a – труба; *б* – переходник

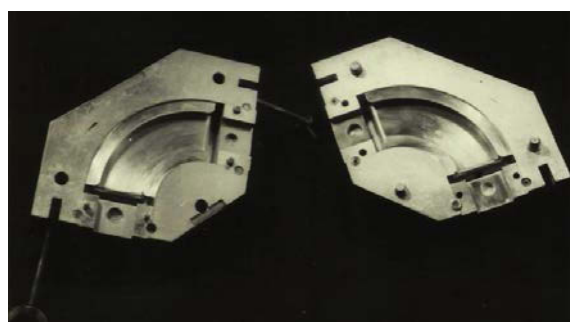


Рис. Б-14. Пресс-форма для формирования модели волноводного элемента



Рис. Б-15. Внешний вид моделей со стержнями для отливок волноводных элементов

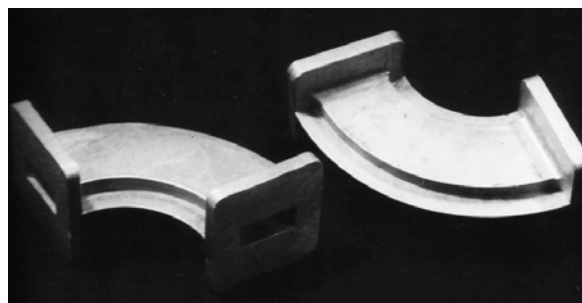
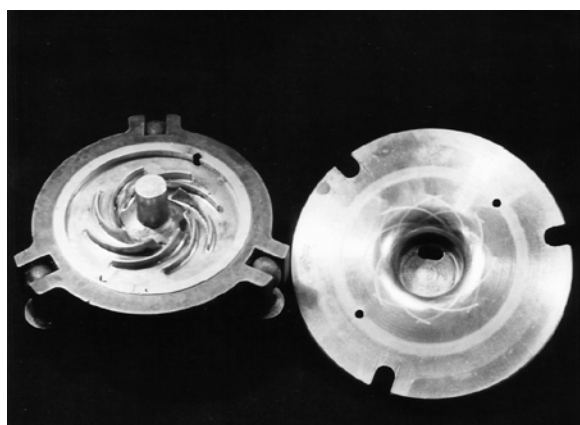


Рис. Б-16. Отливки волноводных элементов радиоприборов СВЧ



a



б

Рис. Б-17. Пресс-формы для изготовления стержней лопастных колес:
a – диаметр колеса 150 мм; *б* – диаметр колеса 132 мм

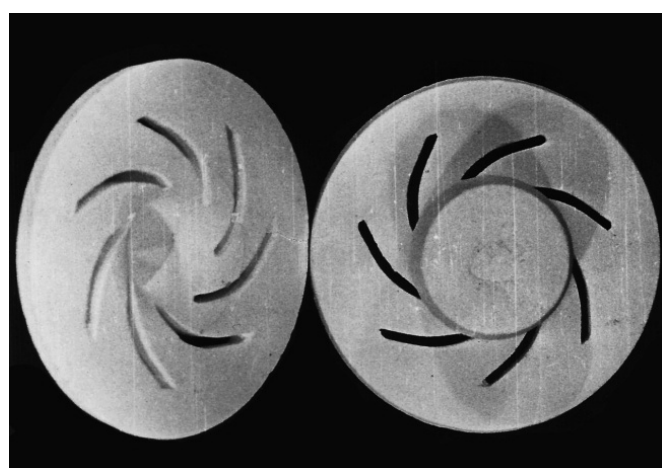


Рис. Б-18. Солекерамические стержни для лопастных колес различной конфигурации

У монографії викладено дослідження щодо підвищення геометричної точності виливків і експлуатаційної надійності литих деталей, які було виконано під керівництвом доктора технічних наук, професора Ф. Д. Оболенцева на кафедрі ливарного виробництва Одеського політехнічного інституту. Детально викладено теорію і практику композиційного лиття, формоутворення із застосуванням холодно-огнеліваємої кераміки, кераміки твердофазного спікання, разових ливарних форм.

Монографія призначена для інженерно-технічних працівників ливарних цехів, співробітників НДІ та ЗВО, а також студентів спеціальності 136-Металургія.

Наукове видання

КОНЦЕПЦІЯ УПРАВЛІННЯ ФОРМОУТВОРЕННЯМ ВИЛИВКІВ

МОНОГРАФІЯ

Укладачі:

ЛИСЕНКО Тетяна Володимирівна

ЯСЮКОВ Василь Васильович

ПРОКОПОВИЧ Ігор Валентинович

Російською мовою

Надруковано в авторській редакції
з готового оригінал-макета

Дизайн верстка Ігор Прокопович

Формат 60 x 84 / 8. Ум. друк. арк. 31,62. Тираж 300 прим. Зам. № 67 (7).

Видавництво та друкарня «Екологія»

65091, м. Одеса, вул. Разумовська, 23/1

Тел.: (0482) 33-07-17, 37-14-25, (048) 7-855-855

e-mail: astro_print@ukr.net www.astroprint.ua www.stranichka.in.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1873 від 20.07.2004 р.

Надруковано з готового оригінал-макета

ФОП Побута М. І.

65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1-а

Тел. (048) 770-34-74



Татьяна Владимировна Лысенко, д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой технологии и управления литейными процессами Одесского национального политехнического университета, член правления ОО «Ассоциация литейщиков Украины», автор и соавтор более 260 научных и научно-методических работ.



Василий Васильевич Ясюков, канд. техн. наук, доцент, приват-профессор кафедры технологии и управления литейными процессами Одесского национального политехнического университета, член ОО «Ассоциация литейщиков Украины», автор и соавтор более 200 научных и научно-методических работ.



Игорь Валентинович Прокопович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технологии и управления литейными процессами Одесского национального политехнического университета, член ОО «Ассоциация литейщиков Украины», автор и соавтор более 150 научных и научно-методических работ.