НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

УДК 669.01 На правах рукописи

**АЛИНА АРАЙЛЫМ АЛТЫНБЕКОВНА**

**Разработка и исследование ресурсосберегающей технологии изготовления тонкостенных стальных отливок литьем в холодно-твердеющие формы**

8D07203 – Металлургия

Диссертация на соискание степени

доктора философии PhD

Научные консультанты

кандидат технических наук,

профессор

В.Ю. Куликов

кандидат технических наук,

доцент

П.В. Ковалев

(СПбПУ Петра Великого)

Республика Казахстан

Караганда, 2023

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**…………………………………... | 4 |
|  | **ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**…… | 5 |
|  | **ВВЕДЕНИЕ**……………………………………………………….. | 6 |
| 1 | **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ**………………………………………… | 11 |
| 1.1 | Область применения и особенности формирования тонкостенных изделий в литейном производстве……………….. | 11 |
| 1.2 | Обзор мирового опыта применения холодно твердеющих смесей в литейном производстве…………………………………………... | 15 |
|  | Вывод по разделу…………………………………………………… | 19 |
| 2 | **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ И ОТЛИВОК В ТАКИХ ФОРМАХ**…………………………………………………. | 20 |
| 2.1 | Компьютерное моделирование процесса изготовления тонкостенных отливок в формах из ХТС………………………… | 20 |
| 2.2 | Расчет теплопроводности формовочной смеси с комплексным связующим на программе PoligonSoft…………………………….. | 23 |
| 2.3 | Вывод по разделу…………………………………………………… | 30 |
| 3 | **МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**……………………………. | 31 |
| 3.1 | Технологическое и исследовательское оборудование, применяемое для исследований…………………………………… | 31 |
| 3.2 | Влияние связующих материалов на теплопроводность ХТС…… | 34 |
| 3.3 | Связующие материалы, применяемые для получения холоднотвердеющей смеси………………………………………… | 39 |
|  | Вывод по разделу…………………………………………………… | 46 |
| 4 | **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВОВ И РЕЖИМОВ НА СВОЙСТВА ФОРМ ИЗ ХТС**………………………………... | 47 |
| 4.1 | Выбор связующих материалов для получения ХТС…………….. | 47 |
| 4.2 | Исследование физических, механических и технологических свойств образцов из ХТС………………………………………….. | 51 |
| 4.2.1 | Исследование влияния состава ХТС на твердость…………….... | 52 |
| 4.2.2 | Исследование влияния состава ХТС на прочность………………. | 54 |
| 4.2.3 | Исследование влияния состава ХТС на осыпаемость……..……. | 59 |
| 4.2.4 | Исследование технологических свойств форм из ХТС…………. | 61 |
| 4.3 | Исследование теплопроводности форм из ХТС………………….. | 65 |
| 4.4 | Рентгенофазовый анализа форм из ХТС………………………….. | 68 |
| 4.5 | Исследование микроструктуры опытных образцов……………… | 75 |
|  | Вывод по разделу…………………………………………………… | 76 |
| 5 | **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК**…………………………………. | 79 |
| 5.1 | Расчет литниковой системы для отливки «Струбцина»…………. | 78 |
| 5.2 | Проведение опытно-промышленных работ по получению тонкостенной отливки в ТОО «КМЗ имени Пархоменко»……… | 79 |
| 5.3 | Исследование микроструктуры стальных образцов…………….. | 84 |
| 5.4 | Точность и чистота поверхности тонкостенных отливок, 3D моделирование……………………………………………………… | 87 |
|  | Выводы по разделу………………………………………………… | 89 |
| 6 | **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ХТС**…………………………………………… | 91 |
| Выводы по разделу……………………………..…..……………… | | 95 |
|  | **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**…………………………………………………… | 95 |
|  | **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**…………... | 97 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ А** –Алгоритм процесса изготовления формы из ХТС нового состава…………………………………………….. | 103 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Б** – Патент на полезную модель…………….. | 104 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ В** – Акт о проведение промышленных испытаний в ТОО «КМЗ имени Пархоменко»…………………… | 105 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Г** – Акт о внедрении…………………………… | 107 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Д** – Акт о промышленных испытаний ……… | 113 |
|  | **ПРИЛОЖЕНИЕ Е** – Технологическая карта……………………. | 115 |

**НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 26645-85. Отливки из металлов и сплавов.

ГОСТ 2138-56. Пески формовочные.

ГОСТ 18318-73. Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием.

ГОСТ 1300-74. Ареометры общего назначения стеклянные для измерения плотности жидкостей.

ГОСТ 2999-75 и ISO 6507. Металлы и сплавы.

ГОСТ 2789-84. Шероховатость поверхности.

ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79). «Металлографические методы определения неметаллических включений».

ГОСТ 26645-85. Отливки из металлов и сплавов.

ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.

ГОСТу 8233-84. Эталоны микроструктуры.

ГОСТ 5640-68. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты.

**ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

**Осыпаемость** – технологическое свойство формовочных смесей, характеризующее их поверхностную прочность.

**Живучесть** – способность формовочной смеси сохранять свои рабочие качества в зависимости от продолжительности времени.

ЖСС – жидко-стекольные смеси

КМЗ – Карагандинский машиностроительный завод

ЛГМ – литье по газифицируемым моделям

ПГС – песчано-глинистая смесь

ПГФ – песчано-глинистые формы

ПСС – песчано-смоляные смеси

РФА – рентгенофазовый анализ

ХТС – холодно-твердеющая смесь

ХТФ – холоднотвердеющие формы

ЭП – эпоксидная смола

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных направлений экономического и социального роста Республики Казахстан является рост увеличения машиностроительной и металлургической продукции.

Согласно данным в Правительстве Республики Казахстан рост увеличения промышленности черной металлургии составил всего 2%, тогда как другие отрасли как фармацевтика, легкая промышленность составляют выше 15%. Поэтому до настоящего времени многие изделия для автомобилестроения, станкостроения и горно-металлургических оборудовании привозят с других стран. Для этого в Послании для народа Казахстана президент К.К. Токаев поручил ввести программу «О промышленной политике», что способствует увеличения промышленного роста Республики Казахстан с поддержкой АО «Банк Развития Казахстана». Первый шаг – это инвестиции в технологии. Это – использование современных миксеров, современной химии, современных связующих систем и ориентация на качество продукции [1].

Тонкостенные детали являются важными и широко распространенными элементами конструкций многих современных машин.

В подавляющем большинстве перечисленные конструкции изготовляются весьма трудоемкими способами штамповки, клепки, что требует специального дорогостоящего оборудования.

Применение литья снижает трудоемкость и стоимость изготовления подобных изделий в 20-30 раз. Увеличение жесткости, литой конструкций и ее вибростойкости повышает экономичность машин и сооружений, увеличивает проходимость и скорость автомобилей, грузоподъёмность и т.д.

В связи с этим были разработаны технологические процессы получения тонкостенных отливок. Первая трудность, с которой столкнулись технологи при попытках литья тонкостенных панелей, это – заполнение формы. Далее имеет место быть горячим трещинам. И самое главное, это достижение высоких механических свойств отливки.

Использование песчано-глинистых форм для изготовления металлических конструкции используется с давних времен. Но из-за различных проблем, связанных с песком, формой и заполнением, этот процесс считается непригодным для производства отливок с тонкой геометрией.

Технология литья в ХТС позволяет обеспечить высокое качество поверхности литья, отсутствие газовых раковин и включений формовочных смесей в случае обвала формы или стержня [2].

В настоящее время в литейных цехах Казахстана, в том числе и Караганды, используют такой способ: на поверхность стен обычной формы из ПГС наносят жидкое стекло. Как мы знаем, формы из ПГС имеют невысокую прочность, и так сказать, это смесь, которая «дышит», что, следовательно, приводит к трещинам и пористости форм. А нанесение жидкого стекла на поверхность стенки формы приводит к появлению дефектности отливок. Кроме того, жидкое стекло имеет температуру плавления 1000°С [3]. А при заливке металла в форму, возможно, произойдет изменения состава сплава.

Одной из перспективной разработки в направлении изготовления форм для получения отливок является внедрение холодно-твердеющих смесей (ХТС). Масштабы применения ХТС непрерывно растут. Способ получения отливок с помощью ХТС внедрено еще в 80-х годах [4]. Но по причине дороговизны материалов и их вреда для здоровья человека и окружающей среды не используют в производстве РК. Но в то же время соседние страны как Россия и Украина широко применяют этот процесс для получения отливок разных габаритов.

ХТС – это тоже смесь, основой которого является песок. Но по сравнению с ПГС имеет ряд преимуществ, как повышение точности поверхностей, уменьшения шероховатости стен, не требует тепловой сушки, сокращения транспортных операции, повышение производительности труда и т.д.

Одним из прогрессивных методов литейной технологии является скоростное изготовление форм и стержней с применением быстротвердеющих смесей со смолами, жидких самотвердеющих смесей и самотвердеющих жидкостекольных смесей с добавкой феррохромных шлаков [5].

Физико-механические свойства жидкой самотвердеющей смеси зависит от содержания в этой смеси песка, жидкого стекла или смолы.

**Актуальность работы.** В настоящее время потребителями деталей предъявляются все более высокие требования к продукции, получаемой литьем: к геометрической точности размеров, отсутствию литейных дефектов, гомогенности структуры. Ряд деталей имеет конструктивные части с толщиною менее 5 мм, то есть такие отливки можно отнести к тонкостенным. Их получение затруднено литьем в песчано-глинистые формы, при этом могут возникнуть раковины, засоры, спаи и т.п. Использование, например, литья по выплавляемым моделям, в целом обеспечивает получение отливок с высокой геометрической точностью, но значительно увеличивает себестоимость литья, усложняет технологический процесс, снижает производительность. Использование ХТС для получения тонкостенных отливок позволяет повысить качество литья при сохранении относительной простоты технологического процесса. Вместе с тем недостатком ХТС является достаточно высокая стоимость связующего (смолы). Поэтому снижение содержания смолы в такой смеси, например, за счет частичного замещения ее глиной и при сохранении всех достоинств литья в ХТС, является актуальной производственной и научной задачей.

**Целью данной диссертационной работы** является разработка технологии изготовления бездефектных тонкостенных отливок литьем в холодно-твердеющие формы с использованием комбинированных связующих при сохранении технико-экономических преимуществ данного метода литья.

**Для достижения этих целей предлагаются следующие задачи:**

– анализ состояния вопроса в области применения составов и способов для получения тонкостенных отливок с использованием форм из холодно-твердеющих смесей;

– исследование состава и свойств казахстанских глин различного минерального состава для выбора добавки в комплексное связующее;

– определение состава ХТС для изготовления литейной формы с целью получения отливок;

– определение влияния технологических режимов изготовления литейных форм с комплексным связующим на свойства формы;

– получение опытной партии образцов бездефектных тонкостенных отливок в промышленных условиях, исследование свойств опытных образцов (с целью разработки технологической карты).

**Объект исследования** – литейная форма из холодно-твердеющих смесей с комбинированным связующим.

**Предмет исследования** – влияние состава ХТС с комплексным связующим и режимов изготовления литейных форм из них на качество тонкостенных отливок.

**Научная новизна:**

Получена эмпирическая формула определения коэффициента теплопроводности в формах из ХТС нового состава, которая позволяет определить коэффициент теплопроводности в зависимости от содержания в смеси влаги, глины и эпоксидной смолы.

Выявлены зависимости механических (прочность, твердость) свойств литейных форм из ХТС с комплексным связующим от состава смеси и режимов их изготовления.

Выявлены зависимости технологических (осыпаемость, живучесть, газопроницаемость) свойств литейных форм из ХТС с комплексным связующим от состава смеси и режимов их изготовления (Приложение А).

**Практическая значимость:**

Предложен оптимальный состав с комплексным связующим ХТС для изготовления тонкостенных отливок.

Определены технологические режимы изготовления литейных форм из ХТС с комплексным связующим для изготовления тонкостенных отливок.

Определено влияние режимов изготовления литейных форм из ХТС с комплексным связующим на качество тонкостенных отливок.

**Методы исследования:**

1. Математическое планирование эксперимента по определения оптимального состава связующих материалов по методу Малышева-Протодьяконова.
2. Определение алгоритма литья в 3D формате с помощью системы компьютерного моделирование литейного производства PoligonSoft.
3. Определение физико-механических свойств образцов форм из ХТС и отливок, полученные с их применением.
4. Методы металлографического исследования образцов форм из ХТС и образцов отливок полученные на них.
5. Методы количественного и качественного анализа микроструктуры отливок на программе Tixomet Pro.
6. Проведение рентгенофазового анализа образцов из ХТС.
7. Виртуальное моделирование конечного элемента процесса по получению отливок с применением ХТС.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Эмпирическая формула определения коэффициента теплопроводности в формах из ХТС нового состава.
2. Результаты моделирования литейного процесса получения форм из ХТС (PoligonSoft).
3. Результаты исследований по выбору глины казахстанского происхождения.
4. Результаты исследований по отработке нового состава ХТС.
5. Результаты исследований по определению механических и технологических свойств форм из нового состава, полученных при различных режимах.
6. Результаты опытно-промышленных работ по выплавке тонкостенной отливки в формах из нового состава ХТС.

Работа выполнялась на кафедре «Нанотехнологии и металлургия» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», также для исследований применялись оборудования НАО «КазНИТУ им. К. Сатпаева», Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Краковского политехнического университета имени Т. Костюшко.

**Апробация работы.** По результатам исследований, были опубликованы 7 статей, в том числе:

– 1 статья в международном журнале «Metallurgija» (Хорватия), входящий в базу Scopus, процентиль 37 (Q3);

– 4 статьи в журналах, рекомендованных КОКСНВО РК:

1. Комплексное использование минерального сырья (2021. – №1).

2. Комплексное использование минерального сырья (2023. – №1).

3. Труды Университета. – 2021. – №4.

4. Труды Университета. – 2023. – №3.

– 1 статья в журнале «Литейное производство», входящий в базу РИНЦ;

– получен 1 патент на полезную модель на тему способа получения холодно-твердеющей смеси (Приложение Б).

Основные исследования диссертанта были представлены в 3 докладах международных конференций.

Также был получен 1 акт о проведение промышленных испытаний в ТОО «КМЗ имени Пархоменко» (Приложение В) и 1 акт по внедрения исследований по данной теме в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (Приложение Г), 1 акт о проведение промышленных испытаний в ТОО «Сантехпром» (Приложение Д).

**Объём и структура работы**: Данная диссертационная работа состоит из введения и 6 основных разделов, также включены 6 приложений. Диссертация изложена на 102 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 27 таблиц, список использованной литературы, состоящий из 85 наименований.

**1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ**

**1.1 Область применения и особенности формирования тонкостенных изделий в литейном производстве**

Тонкостенные детали являются важным и широко распространенным элементами конструкции многих современных машин: это – настилы, перекрытия и переборки строительных сооружений, детали машин, как рабочие колеса, корпус МПШ, насосы, элементы кузовов легковых и грузовых автомобилей, корпусы и многие другие конструктивные элементы речных судов, сельскохозяйственных, горно-металлургических машин [6].

В подавляющем большинстве перечисленные конструкции изготавливаются весьма трудоемкими способами штамповки, гибки, клепки, что требует дорого стоящего и громоздкого оборудования.

Применения литья снижает трудоемкость и стоимость изготовления подобных изделий в 20-30 раз. Увеличение жесткости литой конструкции и ее вибростойкости повышает экономичность машин и сооружений.

Также применение ПГС и ЛГМ не всегда является приемлемым. Например, в формах из ПГС тонкостенные отливки не имеют геометрической точности, низкой шероховатости. А с помощью ЛГМ процесс литья получится трудоемким.

В настоящее время тонкостенные отливки имеют широкое применение не только в горно-металлургическом, но и в других отраслях за счет своей легкости, экономии материала и компактной структуре.

После многих лет разработок было разработаны несколько видов получения тонкостенных отливок и их механической обработки [7]. На раннем этапе использовались песчано-глинистые формы, которые требовали длительное время подготовки и высокие производственные затраты.

Однако по мере того, что детали горно-металлургических машин меняется часто, проблема длительной производственной работы и высокие производственные затраты стали ощутимы. Кроме того, песчано-глинистые формы серьезно влияют на точность отливки.

Тонкостенное литье разработано для более легких отливок. Уменьшение веса достигается за счет толщины стены отливок целиком или же в определенной части. Например, корпус пластинчатый является целиком тонкой деталью, а муфта является частично тонкостенным [8]. Естественно, в получении тонкостенных деталей литьем сокращается время затвердевания и вырастает скорость охлаждения. Время заливки сократится, так как объем отливки уменьшается из-за процесса обеднения. Чтобы преодолеть это, литейщики склонны повышать температуру заливки. Повышение температуры заливки увеличит разницу температур, что приведет к более высокой скорости затвердевания.

Проблемы в получении тонкостенных изделий возникает из-за его толщины. При обычном литье, чтобы избежать преждевременного затвердевания, температура заливки повышается, когда продукт литья тонкий. Преждевременное затвердевание приведет к таким дефектам, как недолив [9].

К тонкостенным деталям предъявляется ряд требований, как твердость, геометрическая точность, шероховатость поверхности [10]. От эффективности повышения данных технологических свойств, повышается экономическая сторона производства. Далее этот процесс влияет на экономику многих стран, а особенно тех у которых запас полезных ископаемых невысоко или в странах, где промышленность имеет низкий уровень развития.

Про получения тонкостенных отливок представлены ряд работ, но до настоящего времени изучается момент проведения механических работ после получения тонкостенных отливок. В виду своей тонкости стен, при изготовлении тонкостенных изделий необходимо обеспечить размерную точность изделий, также твердость. Потому что тонкостенным деталям свойственна пластичная деформация в зависимости от материала изготовления. Например, насос МПШ, используются в средних и тяжелых условиях промышленности, предназначен для перекачки технологических растворов и т.д., то есть при работе ей свойственно прочность [11]. Прочность в свою очередь зависит от процесса литья, так как при литье могут возникнуть внутренние поры, что может вызвать ломкость отливки. Поэтому вопрос о повышении технологических качеств тонкостенных изделий еще остается актуальным.

Сведение про повышение технологических качеств в современных литературах встречается редко несмотря на то, что есть много сведений про применение этих деталей и требования, предъявляемые к ним.

Несмотря на то, что Казахстан является богатым недрам страной, а металлургии остается чувствительной средой, так как имеет больше сырьевое направление. Развитие металлургической промышленности сдерживает экономический рост страны. Около 90% производства в сфере черной металлургия приходится на три области – Карагандинская, Павлодарская и Актюбинская [12]. В настоящее время крупнейшими предприятиями в металлургической отрасли Казахстана являются ТОО «Корпорация Казахмыс», АО «Арселор Миталл», ТНК «Казхром», Жайремский ГОК и т.д. Тем не менее, в Карагандинской области имеется ряд предприятий, которые выполняют план по производству качественных отливок, в том числе тонкостенных. Такие предприятия, как ТОО «КМЗ имени Пархоменко», «Qazkarbon», «AziyaFerrorAlloys» и т.д. По статистике 2019 года производства стали в год составил 3,9 млн. тонн, что является меньше на 6 % по сравнению с 2018 годом [13].

Оборудованиям, применяемые на данных производственных предприятиях, постоянно требуется техническое обслуживание, в некоторых случаях частичная замена. И 40% из деталей, прошедшие техническое обслуживание, являются тонкостенными полностью или же частично имеют участки, с тонкой стеной. И именно эти участки обычно требуют ремонтные работы, что исправляется сваркой или же заменой другой запчасти. Поэтому получение тонкостенных отливок с высоким качеством, которые могут противостоять работам в тяжелых условиях промышленности является одним из основных задач для повышения качества работы производства.

Обычно тонкостенные детали и конструкции изготавливаются трудоемкими процессами штамповки, вытяжки, гибки, с последующей сборкой в тонкостенные конструкции сваркой, клепкой, пайкой и склеиванием.

Технологический процесс изготовления панельных деталей требует мощного и энергоемкого оборудования, а трудоемкость изготовления отдельных тонкостенных конструкции измеряется, в некоторых случаях, сотнями человек и времени [14].

Возрастающие требования к прочностным характеристикам тонкостенных деталей привели к необходимости перейти на монолитные [15] панельные конструкции. Обычно такие детали вырезаются на копировально-фрезерных станках из катаной плиты. Отходы металла в стружку при указанной технологии в несколько раз превышают массу готового изделия, что и определяет его стоимость и трудоемкость процесса.

Получение тонкостенных отливок литьем в формы является более легким, быстрым и дешевым процессом. Первостепенными задачами при литье тонкостенных деталей являются: заполнение формы и борьба с горячими трещинами в отливках. На них влияют габариты изделий, а также толщина стены, так как она является тонкой.

Время отвода формой теплоты перегрева и теплоты кристаллизации металла с достаточной степенью точности пропорционально квадрату отношения объема, отливки к площади ее поверхности охлаждения [16]. У тонкостенных деталей это отношение очень мало. Поэтому металл охлаждается очень быстро, подвижность его уменьшается и течение прекращаются. Более того заполняемость формы [17] уменьшается пропорционально квадрату толщиной стенки отливки.

Следует добавить, что полость формы тонкостенных отливок оказывает большое гидравлической сопротивление течению металла при заполнении. Гидростатический напор, обеспечивающий заполнение формы тонкостенной отливки, обратно пропорционален кубу половины толщины стены отливки.

Если подогреть формы выше температуры ликвидуса заливаемого сплава, жидкотекучесть будет равна бесконечности, при этом можно заливать крупные тонкостенные отливки. Возможность улучшения заполняемости форм тонкостенных отливок за счет увеличения жидкотекучести расплава и повышения температуры заливки порой ограничена. Очень часто для получения высоких механических характеристик тонкостенные отливки изготовляют или из качественных сплавов, жидкотекучесть которых невысока [18]. Также нужно отметить, что качественные сплавы не следует перегревать, так как это сопровождается окислением и улетучиванием легирующих элементов, что, следовательно повлияет на механические свойства отливок. При заливке форм металлом с высоким перегревом повышается опасность появления пригара, усадочной пористости и горячих трещин.

Из практики известно [19], что для успешного заполнения форм тонкостенных деталей необходимо осуществлять быструю заливку, чтобы во время течения металла не произошло сильного снижения его температуры и подвижности.

Скорость заполнения формы определяется напором и гидравлическим сопротивлением формы. Рациональная геометрия литниковой системы дает возможность увеличить скорость истечения металла в форму при неизменном напоре и сечение питателя [20]. Скорость заполнения можно также существенно увеличить путем принудительного давления на металл и увеличения площади поперечного сечения всей литниковой системы. Также можно регулировать гидравлические сопротивление полости формы, зависящее от места подвода металла, толщины тела, конструкции отливки, количество и расположение ребер, приливов, качества поверхности формы. Возможно, также улучшить заполняемость при регулировании теплоотводящей способности формы.

Если проблема заполнения формы сводится к решению вопроса о возможности формообразования литой тонкостенной детали заданной конструкции, то не менее важными являются вопросы, определяющие качественные показатели получаемой отливки (структура, механические свойства, плотность, наличие трещин и других дефектов). С этой точки зрения мероприятия, способствующие заполнению формы, могут иногда приводить к ухудшению качества литого изделия. Сокращение времени заливки затрудняет удаление воздуха и газов из полости формы - отливка может быть поражена газовыми дефектами. Появлению подобных дефектов способствует и инжекция воздуха в форму при высоких скоростях заливки. Сильная струя металла может вызвать размывание формы - появятся земляные раковины и т.д. Однако все эти дефекты, кроме горячих трещин, могут быть устранены при использовании сравнительно несложных технологических средств (хорошей вентиляции формы и стержней, качества набивки и т. д.). Борьба с горячими трещинами при литье тонкостенных крупногабаритных деталей является наиболее сложным вопросом [21].

Как правило, применяемые для литья тонкостенных деталей высокопрочные и теплопрочные легированные сплавы в большинстве своем имеют значительную склонность к образованию горячих трещин. Кроме того, при одинаковой сложности отливок с уменьшением толщины стенок увеличивается вероятность образования горячих трещин [22]. При двух- и трехкратном увеличении длины отливки напряжения в ней, вызванные торможением усадки, возрастают соответственно в 2 и 2,5 раза, а следовательно, увеличивается опасность появления горячих трещин.

Избежать горячих трещин в тонкостенных отливках – значит воспрепятствовать их зарождению, так как возможность залечивания горячих трещин в период кристаллизации [23] для тонкостенного литья мало вероятна. При неизменной конструкции отливки есть два пути борьбы с горячими трещинами: повышение сопротивляемости сплавов образованию горячих трещин и улучшение податливости формы. Повышения сопротивления можно добиться подбором химического состава сплава, модифицированием, низкочастотной и ультразвуковой вибрацией и т. д. Податливость формы определяется свойствами формовочной смеси, конструкцией формы и отливки. Очевидно, совокупность мероприятий, направленных на повышение сопротивляемости и улучшение податливости формы, могут уменьшить опасность возникновения горячих трещин в литых панелях [24].

**1.2 Обзор мирового опыта применения холодно-твердеющих смесей в литейном производстве**

Литейное производство является одним из многопрофильных отраслей промышленности. Существуют несколько видов литья для получения металлических деталей, как центробежное литье, литье под давлением, литье в песчано-глинистые формы, литье в кокиль и т.д.

В настоящее время популярным в мире является семейство ХТС-процессов [25]. Это – современный уровень качества, современный уровень возможной компьютеризации, получение различных характеристик формы, который приводит к лучшим качествам поверхности, как размерная точности к универсальности.

В современном виде ХТС пришел в Казахстан в 90-х годах. В настоящее время около 30% вот всех предприятий литейной отрасли используют ХТС-процесс.

На данный момент в Казахстане большое распространение в литейном производстве получает применение песчано-глинистых смесей (таблица 1.1). Этот метод получения форм базировалась еще со времен советского союза. Метод получения отливок с помощью ХТС имеет ряд мест, где применяется. Тем не менее, в настоящее время, для получения холодно-твердеющих смесей в виде связующих используют разные смолы, которые имеют высокую степень токсичности. Кроме того, они должны подвергаться тепловой сушке углекислым газом.

С точки зрения материалов, в промышленности более 70 % используется песок и глина, это есть и есть песчаные формы.

Таблица 1.1 – Технология формирования песчаных форм

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Песчаные формы | | | | |
| несвязанный сыпучий песок | химический связанный | | | связанный песок |
| необразовавшаяся | Органический связанный | | | неорганический |
|  | фурановая смола | формальдегидная  смола | феноловая смола |  |

Среди всех видов песка кварцевый песок в основном используется для формования песка, а желаемые свойства кварцевого песка представлены в таблице 1.2. Огнеупорность песка прямо пропорциональна количеству SiO2 (%), но обратно пропорциональна количеству из оксида железа. Потеря воспламенения зависит от органических примесей. Процентное содержание CaO вызывает увеличение значения потребности в кислоте. Другой причиной снижения огнеупорности является более высокое содержание K2O и Na2O. Также высокая потребность в кислоте отрицательно влияет на связующие с кислотным катализатором [26].

Таблица 1.2 – Свойства кварцевого песка

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование | Допустимое содержание |
| SiO2 | 95-96% мин |
| Fe2O3 | 0,3% макс |
| CaO | 0,2% макс |
| K2O, Na2O | 0,5% макс |
| Потеря при сжигании | 0,5% макс |
| Значение потребности в кислоте до pH4 | 6 мл макс |

Для соединения частиц песка используются различные механизмы связи, такие как сырой песок (глина и вода), несвязанный рыхлый песок с потерянной пеной и химически связанный песок. Связующие материалы используются для армирования форм и стержней, что обеспечивает лучшее качество литья.

В настоящее время химически связанный песок широко используется для форм и стержней. Способы применения связующего:

1. Песок и связующие материалы смешивают и выдувают или утрамбовывают в опоку. Реакция затвердевания практически не происходит или не происходит до тех пор, пока она не будет вызвана применением тепла или углекислого газа. Затем затвердевание происходит за секунды. Процесс используется для крупносерийного производства.
2. Это комбинация песка, связующего и отвердителя. Связующее и отвердитель сразу же начинают вступать в реакцию друг с другом, и соответственно должны формироваться формы или стержни. Дальнейшее затвердевание продолжается до тех пор, пока оно не станет достаточно прочным, чтобы его можно было отливать. Песок, необходимый для формования, имеет средний размер зерен 200-125 микрон (AFS 45-60), который не имеет потребности применения углекислого газа. Если песок имеет малую фракцию, то потребления связующих материалов уменьшается.

Связующие материалы в основном основаны либо на органических смолах, либо на неорганических связующих.

Новые технологические процессы изготовления стержней основаны на применении смесей, отверждающихся непосредственно в модельной оснастке. Это позволяет получать стержни высокой точности. Однако из-за высокой стоимости связующих материалов холодно-твердеющие смеси целесообразнее применять для изготовления крупных стержней и форм в условиях мелкосерийного и индивидуального производства [27]. В массовом и крупносерийном производстве применяют процесс изготовления стержней из холоднотвердеющих смесей.

Создание ресурсосберегающей технологии получения холодно-твердеющих смесей с комбинированными связующими базировалась на следующих основах:

1. Ликвидация тепловой сушки углекислым газом.
2. Максимальное снижения вреда с экологической точки зрения.
3. Экономия средств на комплексные связующие вещества, и, желательно, местного производства.
4. Повышение качества отливки, за счет применения связующих в комплексном виде.

Первым вариантом холоднотвердеющей смеси, решившим практически задачу ликвидации сушки форм, явился "СО2-процесс", основанный на химическом отверждении жидкого стекла при продувке смеси углекислым газом. Смеси для "СО2-процесса" имеют длительную живучесть и позволяют регулировать скорость твердения в широких пределах. В настоящее время он широко распространен в нашей стране и за рубежом [28].

Позже на основе жидкого стекла были разработаны ХТС, отверждение которых достигалось вводом в смесь веществ, содержащих двухкальциевый силикат, ферросилиций, цемент, органические отвердители и другие [28, с. 198].

В настоящее время стало актуально внедрять «Английский традиции». Английские традиции – это высокая производительность, использование минимальное количество сотрудников в линейном цеху за счёт автоматизации многих процессов, так же это «экологическая» безопасность сотрудников [29].

Для введения ХТС-процесса в производство необходимо вложение, так как работа на старом оборудовании со старыми мощностями является неэффективным. Очень важен температурный режим в цеху, от него зависит эффективность литейного процесса.

ХТС – процесс позволяет изготавливать отливки, по технологиям на основе катализаторов и смол. К достоинствам технологии на основе смол является точная поверхность формы, регенерация смеси, так же высокая жидкотекучесть жидкого металла по форме. Кроме того, ХТС-процесс позволяет полностью управлять процессом заливки, контролем времени, производительностью и качеством литья. ХТС-процесс является более перспективным по сравнению с ПГЛ [30].

За последние 10-12 лет в нашей республике получила широкое распространение технология изготовления форм и стержней из холодно-твердеющих смесей. Здесь в основном используют песчано-смоляные смеси. Они обладают рядом технологических, технико-экономических и санитарно-гигиенических преимуществ. Данная технология намного сокращает тепловую сушку стержней и форм, повышает размерную точность отливок, снижает энергетические затраты, сокращает количество используемой арматуры, решает вопросы хорошей выбиваемости и регенерируемости отработанных смесей, повышает производительность труда стерженщиков, повышает культуру производства.

Однако из литературы и практики известно, что смолы, используемые в составе ХТС, в той и иной степени токсичны.

Литературные данные по холоднотвердеющим смесям свидетельствуют о том, что в качестве связующих для них применяются многие классы полимерных материалов (высыхающие масла, полиэфирные, карбамидные и фенолформальдегидные смолы) [31]. Выбор конкретного связующего материала определяется не только реакционной способностью отверждаться без нагрева, но и его влиянием на технологические и физико-механические свойства смеси.

С этой точки зрения для стержней отливок из высокотемпературных сплавов наибольший интерес представляют феноло-формальдегидные смолы, благодаря которым смеси в отвержденном состоянии обладают меньшей гигроскопичностью, повышенной термостойкостью. Последняя связана с наличием в структуре смолы карбоциклических звеньев (фенольных ядер), отличающихся достаточно высокой энергией связи. В результате при термодеструкции в автогенерируемый атмосфере феноло-формальдегидные смолы образуют коксовый остаток (30-50%). Образование коксового остатка происходит с выделением «блестящего» углерода, который положительно влияет на формирование качества поверхности отливок [32].

Вместе с тем, применение феноло-формальдегидных смол для холоднотвердеющих смесей (при массовом изготовлении стержней) сдерживается относительно низкой скоростью их отверждения.

Один из вариантов повышения скорости отверждения феноло-формальдегидных смол – это метод совместной полимеризации, целью которого является получение материалов, обладающих комплексом необходимых свойств, чем не обладает полимер каждого компонента в отдельности, или улучшение какого-то конкретного свойства. В данном случае применение совместного полимеризации направлено на повышение скорости отверждения при сохранении положительных свойств феноло-формальдегидных смолы.

Многочисленные исследования процесса получения и отверждения феноло-формальдегидных смол показывают [33], что конденсация фенола и формальдегида идет с образованием метиленовых связей в орто- и параположениях по отношению к гидроксильной группе фенольного ядра.

При этом гидроксильная группа не вступает в реакцию конденсации, т.е. в неотвержденной смоле имеются функциональные группы, которые не участвуют в реакции, но могут служить дополнительными реакционноспособными центрами для образования сшивающих поперечной связей.

Следовательно, при совмещении феноло-формальдегидных смол с соединениями, содержащими не менее двух функциональных групп, активно взаимодействующих с гидроксильной группой фенольного ядра, можно ожидать получение полимера сетчатой или трехмерной структуры. Такими могут быть соединения, содержащие функциональные изоцианатные группы – полиизоционаты, применяемые при получении полиуретанов.

Аналогично получению полиуретанов отверждение феноло-формальдегидных смол полиизоцианатами будет представлять полимеразационный процесс, происходящий за счет миграции атома водорода гидроксильной группы к атому азота изоцианатной с образованием уретановой связи между радикалом полиизоцианата и фенольным ядром [34].

**Вывод по разделу**

Выполнен анализ состояния вопроса в области применения составов и способов для получения тонкостенных отливок с использованием форм из холодно-твердеющих смесей:

1. Ряд деталей имеет конструктивные части с толщиною менее 5 мм, то есть такие отливки можно отнести к тонкостенным.
2. Тонкостенные отливки до настоящего времени в казахстанской литейной промышленности получали в основном с использованием форм из ПГС. Но их получение литьем в песчано-глинистые формы затруднено, при этом могут возникнуть раковины, засоры, спаи и т.п. Использование, например, литья по выплавляемым моделям, в целом обеспечивает получение отливок с высокой геометрической точностью, но значительно увеличивает себестоимость литья, усложняет технологический процесс, снижает производительность.
3. Одним из перспективных направлений литья, обеспечивающий получение тонкостенных отливок является применение ХТС. К недостаткам форм из таких смесей следует отнести высокую стоимость связующего и наличие дополнительной операции по сушке литейной формы углекислым газом. Следовательно, создание технологии должно базироваться на ликвидации сушки углекислым газом, снижении или полном исключении вредных связующих, экономии средств на связующее.

Исходя из вывода, для дальнейшей работы ставятся следующие задачи:

– определение оптимального состава применяемого ХТС для получения тонкостенных отливок;

– выбор связующих материалов для получения качественной формы, в дальнейшем для получения бездефектной отливки;

– исследование физико-механических свойств формы, полученной из нового состава.

**2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ И ОТЛИВОК В ТАКИХ ФОРМАХ**

**2.1 Компьютерное моделирование процесса изготовления тонкостенных отливок в формах из ХТС**

В век информационной технологии разрабатываются множество программ [35] для получения точных анализов, для демонстрации, для упрощения задач и т.д. Одним из таких программ является система компьютерного моделирования литейной системы «PoligonSoft». Программа позволяет построить сетку отливки, составить алгоритм литья с вашими данными, позволяет рассчитать температурный градиент во время заливки, охлаждения, определяет пористость отливки. В базе программы существует несколько видов литья как, литье в песчано-глинистые формы, литье в кокиль, литье по выплавляемым моделям, литье по газифицируемым моделям. Так же в системе существует и база литья в формы из ХТС. Кроме того, программа позволяет менять связующие материалы в составе смеси. Программа была разработана российскими IT-специалистами. Данная программа совершенствуется каждый год, и соответственно появляются новые возможности продемонстрировать систему литейного производства показать более подробно. Следует отметить, что с программой «PoligonSoft» появляется возможность поэкспериментировать с составом смеси.

По периметру панельной отливки следует учитывать, что небольшие по ширине места отливки заполняются лучше, чем более широкие. Поэтому заполнение форм небольших по ширине отливок и даже значительных габаритных размеров по длине не вызывает серьезных затруднений, так как литники в этом случае располагают обычно по длинным сторонам отливки и заливку ведут из нескольких ковшей. Значительно большие трудности возникают при конструировании литниковых систем для отливок, имеющих очертания, приближающиеся к квадрату, и большие габаритные размеры [36].

При литье тонкостенных панельных отливок важно обеспечить быстрый отвод воздуха и газов из полости формы во время заливки.

Однако большая разница гидравлических сопротивлений тонкого тела панели и выпоров не позволяет применять их для вентиляции формы. При заполнении панельной отливки трудно определить количество необходимых выпоров и места их установки на отливке. Установка же выпоров на массивных и самых высоких частях отливки не дает желаемого результата – металл при заливке не заполняет тела панельной отливки, а устремляется по пути наименьшего сопротивления и вытекает через выпор, выключая сразу же его из работы [37]. Повышение газопроницаемости формы (от 50 до 100 ед.) изменением состава формовочной смеси или регулированием ее уплотнения не приводит к заметному улучшению вентиляции формы. Удовлетворительные результаты достигаются установкой прокладок толщиной 0,25-0,4 мм, образующих щель по разъему формы при ее сборке. При такой системе вентиляции воздух и газ отводятся из полости формы почти мгновенно, но установка прокладок снижает точность тела отливки и не всегда приемлема. Быстро отвести воздух и газ из формы возможно при применении плоских щелевых каналов той же толщины, что и прокладки по разъему формы.

На базе КарТУ имени Абылкаса Сагинова с помощью программы PoligonSoft была смоделирована производство отливки на формах из ХТС.

Программная среда "PoligonSoft" применяется в тех случаях, когда необходимо провести отработку важных технологических параметров при литейном производстве не в процессе реальной отливки, а на компьютерной модели. "PoligonSoft" позволяет визуализировать все полученные при моделировании данные. Например, можно рассмотреть моделируемую форму под всевозможными углами, рассмотреть отливку изнутри и производить наблюдение за ее изменением в процессе литья, устанавливать датчики на любой расчетный параметр и в любом месте отливки. Применяя данную программу, был составлен алгоритм литья тонкостенной отливки с применением формы из ХТС. Для демонстрации была выбрана отливка «Муфта».

Для изготовления отливки была выбрана сталь 30. Так как отливка является маленькой и весит 5 кг, в одну опоку были размещены 4 детали. Толщина стены у корпуса муфты 5 мм, что и является тонкостенной отливкой. Были применены два разных состава с обозначениями: ХТС 1, в котором содержание глины составляет 3,5% и ХТС 2, в котором содержание глины составляет 5%.

С помощью данной программы был построен алгоритм литейного процесса. Время и температура литья были определены автоматическим расчетом программы, так же были выявлены участки формы, имеющие пористость (макро и микро).

В качестве детали был выбран корпус из СТ30.

По периметру данной отливки следует учитывать, что небольшие по ширине места отливки заполняются лучше, чем более широкие (рисунок 2.1). Поэтому заполнение форм небольших по ширине отливок и даже значительных габаритных размеров по длине не вызывает серьезных затруднений, так как литники в этом случае располагают обычно по длинным сторонам отливки и заливку ведут из нескольких ковшей. Значительно большие трудности возникают при конструировании литниковых систем для отливок, имеющих очертания, приближающиеся к квадрату, и большие габаритные размеры.

При литье тонкостенных панельных отливок важно обеспечить быстрый отвод воздуха и газов из полости формы во время заливки.

В практике литейного производства наблюдается случаи [38] деформации литейных форм под действием давления жидкого металла и усадки сформировавшейся отливки. Деформация форм происходит в результате доуплотнения формовочной (стержневой) смеси и зависит от величины нагрузки, исходной плотности смеси и ее прочности при различных температурах.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |
|  |  |
| в | г |

а – отливка, полученная на форме из ХТС 1 (с глиной 3,5%) через 2 мин после заливки; б – отливка, полученная на форме из ХТС 1 (с глиной 3,5%) через 5 мин после заливки; в – отливка, полученная на форме из ХТС 2 (с глиной 5%) через 2 мин после заливки; г – отливка, полученная на форме из ХТС 2 (с глиной 5%) через 5 мин после заливки

Рисунок 2.1 – Заполняемость формы в одинаково определенное время

Литейная форма представляет собой структурно-пористое тело [39] с фиксированными геометрическими параметрами. Поэтому одной из характеристик ее плотности может служить коэффициент пористости, представляющий отношение объема пор и объему твердых частиц в единице объема литейной формы.

Объемный вес структурно-пористого тела в литейной формы γ выражается отношением его массы к объему:

γ= (2.1)

где – вес твердых частиц структурно пористого тела;

– вес воды в порах тела;

– объем твердых частиц и пустот тела соответственно.

В реальных условиях могут быть случаи [40], когда отдельные части литейной формы испытывают нагрузки без возможности бокового расширения. Тогда смесь доуплотняется подобно одностороннему действию равномерно распределенной нагрузки в замкнутом объеме.

**2.2 Расчет теплопроводности формовочной смеси с комплексным связующим на программе PoligonSoft**

Без правильно установленных и строго выдерживаемых значении температуры металла при заливке, температуры различных частей формы, скорости течения металла и других параметров, рассмотренные ранее способы литья и технологические мероприятия не дадут положительных результатов и достижении поставленной задачи – получении качественной тонкостенной отливки.

Выбор тепловых и гидродинамических параметров литья [41] является основным вопросом в решении задачи получения тонкостенной литой детали, от которого зависит возможность успешного заполнения формы и получение качественной отливки.

Исходным материалом для заполнения полости формы является расплав. Температурная область строго жидкого состояния его ограничивается снизу точкой плавления для чистых металлов и эвтектических составов для остальных сплавов – интервалом затвердевания, находящимся между точками ликвидуса и солидуса [42]. Внутри интервала затвердевания расплав находится в двухфазном состоянии.

Течение расплавленного металла по каналам литниковой системы и в полости формы при температурах выше температуры ликвидуса обычно рассматривают как течение несжимаемой жидкости с неизменяющейся вязкостью и не содержащей твердой фазы.

Строго говоря, вязкость расплавленных металлов остается постоянной с изменением их температуры, однако эти колебания в интервале используемых перегревов над температурой ликвидуса и вплоть до точки ликвидуса невелики и не могут, видимо, оказывать существенного влияния на характер течения.

Что касается твердой фазы, то ее отсутствие в потоке может иметь место лишь при заполнении достаточно массивных отливок при высоком перегреве сплава или при литье абсолютно чистых металлов. В случаях заполнения форм тонкостенных отливок и использования металла с небольшим перегревом в расплаве всегда имеется некоторое количество твердой фазы. Она появляется в результате охлаждения и затвердевания металла на стенках канала и последующего взаимодействия потока с затвердевающей корочкой [43]. Наиболее существенной влияние твердая фаза оказывает на процесс формирования структуры отливки и механизм остановки потока расплава в форме. Тем не менее при рассмотрении параметров течения расплава можно пренебречь влиянием твердой фазы в потоке, если учесть следующие обстоятельства.

Во-первых, содержание твердой фазы в потоке не может быть настолько большим, чтобы существенно влиять на такие свойства, как вязкость текущего металла, так как частицы твердой фазы непрерывно расплавляются перегретым металлом.

Во-вторых, содержание твердой фазы в каком-либо сечении потока заметно увеличивается, в результате его переохлаждения, течение мгновенно прекращается. Для «закупоривания» потока достаточно головной его части иметь 20% твердой фазы. Течение так называемой «аномальной жидкости», содержащей значительные количество твердой фазы, то есть течение расплава в температурном интервале ликвидус – солидус, возможно лишь при создании избыточных давлений такого порядка, который исключает возможность применения песчаных форм, или в изотермических условиях (рисунок 2.2).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а | б | в |
|  |  |  |
| г | д | е |

а – отливка, полученная на форме из ХТС (с глиной 2%) через 30 секунд после заливки; б – отливка, полученная на форме из ХТС (с глиной 3,5%) через 30 секунд после заливки; в – отливка, полученная на форме из ХТС (с глиной 5%) через 30 секунд после заливки; г – отливка, полученная на форме из ХТС (с глиной 2%) через 1 мин после заливки; д – отливка, полученная на форме из ХТС (с глиной 3,5%) через 1 мин после заливки; е – отливка, полученная на форме из ХТС (с глиной 5%) через 1 мин после заливки

Рисунок 2.2 – Виды отливок, полученнях на формах из ХТС с разным содержанием связующих (выполнена на программе PoligonSoft)

Следовательно, во всех случаях литья тонкостенных панелей расплав в процессе заполнения можно практический рассматривать как «ньютоновскую жидкость», поскольку расплав при приложении силы не меняет свою вязкость. Тогда для него будут справедливы все известные законы гидродинамики, и в частности, дифференциальные уравнения движения Навье-Стокса и сплошности или неразрывности.

Но даже решение этих уравнений не дает ответа на вопрос о возможности заполнения той или иной литейной формы, так как прекращение движения металла, а следовательно. И длина пробега связаны, прежде всего, с процессом охлаждения и затвердевания его. Кроме того, затвердевание металла в процессе течения на стенках литниковой системы и формы приводит к уменьшению живого сечения потока и к изменению параметров течения. Например, в опытах В. О Яковлева показаны [44], что коэффициент гидравлического сопротивления при повороте литникового канал, при прочих равных условиях, возрастает с понижением температуры заливаемого металла, что, безусловно, связано с образованием твердой корочки металла на стенках канала, отмеченным и другими исследователями.

Следовательно, параметры течения металла в литейной форме, геометрию литниковой системы и формы необходимо рассматривать в сочетании с анализом тепловых условий литья.

Процесс теплового взаимодействия между отливкой и формой заключается, как известно в отдаче отливкой форме известного качества тепла с определенной интенсивностью. Поэтому анализ условий литья невозможен без исследования процесса распространения тепла в отливке форме.

Теплоемкость формы из нового состава была рассчитана по программе PoligonSoft, также были проведены лабораторные испытания на образцах. По программе были выбраны несколько областей с заданными параметрами. Как показано на рисунке 2.3 соответствующая область по составу смеси – Область 3. Состав следующий: песок кварцевый (фракция песка не более 0,3 мм), смола - 1,2%, глина (огнеупорная) - 3,5 %, песок свежий - 100%, исходная плотность - 1565 кг/м3.

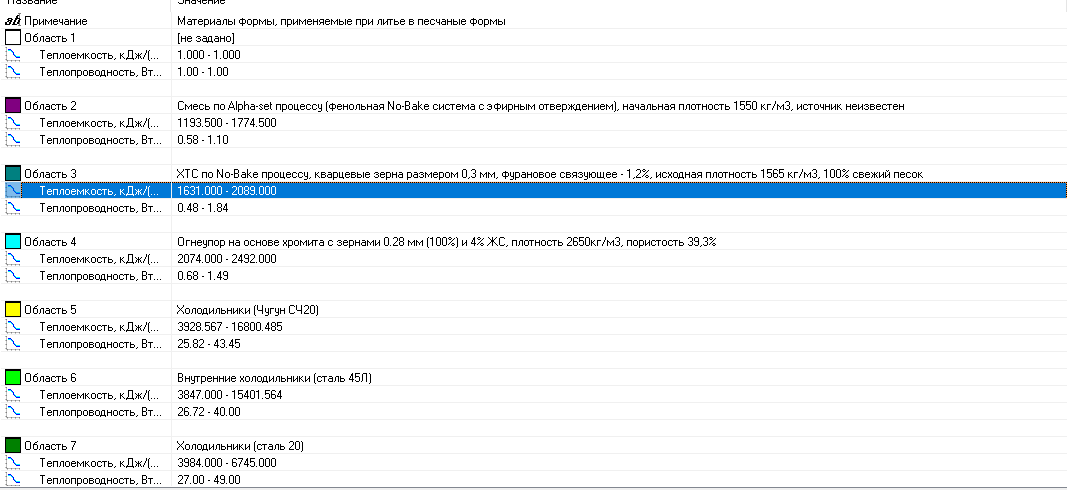
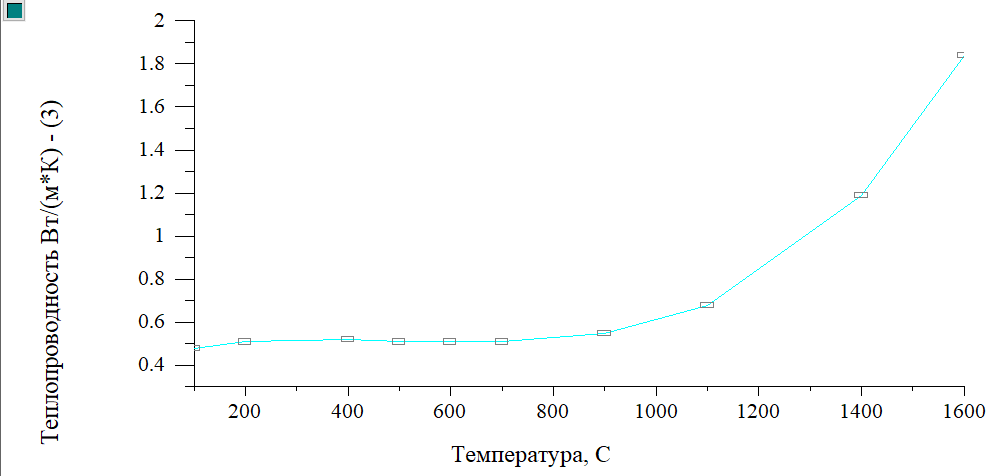


Рисунок 2.3 – Состав смеси, выбранной на программе PoligonSoft

По данным параметрам программа рассчитала теплоемкость и теплопроводность холоднотвердеющей смеси, они показаны на рисунке 2.4.



а



б

а – теплопроводность формы из ХТС; б – теплоемкость формы из ХТС

Рисунок 2.4 – Графики по тепловой отдаче форм из ХТС

на программе PoligonSoft

По результатам графиков видно, что при начальной стадии заливки металла теплопроводность остается неизменяемой, а после 1000°С теплопроводность увеличивается. Часть теплового потока от заливаемого металла расходуется на нагрев компонентов формы и внутрипорового воздуха. Далее по мере охлаждения расплава, его теплопроводность уменьшается.

С использование программы PoligonSoft была определена скорость и рапределение температурных полей по объему отливки во времени (рисунок 2.5).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

в г

а – отливка, полученная на форме из ХТС 1 (с глиной 5%) через 15 сек после заливки; б) отливка, полученная на форме из ХТС 1 (с глиной 3,5%) через 30 секунд после заливки; в) отливка, полученная на форме из ХТС 1 (с глиной 5%) через 45 секунд сек после заливки; г) отливка, полученная на форме из ХТС 1 (с глиной 3,5%) через 60 секунд после заливки

Рисунок 2.5 – Изменение температурных градиентов при остывании, показанная программой PoligonSoft

В рисунке 2.5 отливка выделена несколькими полями – градиент температур по конфигурации отливки от красного (металл жидкий) до синего (метал охлажденный). Следует отметить, что температура расплава падает довольно быстро до температуры кристаллизации. Поэтому самая высокая интенсивность оплавления твердой корочки наблюдается в первые секунды процесса, затем она резко уменьшается.

После заливки металла на стенках формы по мере подъема металла начинает намораживаться твердая корочка. Одновременно, благодаря высоким скоростям движения металла, происходит разрушение затвердевавшего фронта. В остальной части детали находится жидкий металл, который кристаллизуется в отсутствии потока металла. Затвердевание средней части детали идет последовательной кристаллизацией от стенок формы и отсутствие питания нижних слоев за счет верхних (так как отливка тонкая) должны приводить к образованию усадочной пористости и другим литейным дефектам, что и объясняет наличие разброса в механических свойствах отливок.

Весьма распространённые дефекты при литье тонкостенных изделий – спаи, неслитины или незаполненные участки формы возникают в результате преждевременной остановки и затвердевания потока металла [45]. Следовательно, тепловые и гидравлические параметра литья должны быть выбраны с учетом того, чтобы необходимое время для заполнения формы было меньше времени затвердевания и остановки потока в тех же условиях, т.е. чтобы реальная длина пробега струи в полости формы была бы больше, чем длина или ширина отливки.

В первые моменты течения металла температура центра или, точнее, ядра потока остается постоянной, тогда как температура пристеночные слоев изменяется. Возникает перепад температур в сечении потока. Величина перепада целиком определяется условиями охлаждения потока и степенью его турбулизации [46]. При малой интенсивности охлаждения перепад температуры между центром потока и поверхностью ничтожно мал, при большой интенсивности охлаждения он может быть заметным. Течение перегретого металла в таких условиях происходит до тех пор, пока поверхность потока охладится до tлик  сплава (сечение Z1).

С этого момента на стенках формы начинает кристаллизоваться твердая фаза. Однако возможность образования выделяющимися твердыми частичками сплошной корочки на стенках канала зависит от интенсивности охлаждения, ширины интервала затвердевания сплава и количества сплава, кристаллизующегося в этом интервале [47]. Если учесть его заметный пробег сплавов в температурном интервале затвердевания при обычных давлениях, используемых в литейной практике, затруднителен, то температура центра потока при течении металла в тонком канале практический не может опуститься ниже tлик.

Практический остановка потока из-за накопления твердой фазы у кончика его может наблюдаться при литье сплавов, затвердевающих в интервале температуры, когда интенсивность теплового взаимодействия потока с формой мала. Величину жидкотекучести при литье в холоднотвердеющую форму можно оценить аналитически.

Пусть расплав заливается в форму без перегрева выше температуры ликвидуса; скорость и потока постоянна по времени и длине канала.

Холоднотвердеющая форма в любом месте, отстоящем от начала канала на расстоянии z, будет прогреваться расплавом столько времени, сколько он течет мимо этого места. Если к рассматриваемому моменту времени τ поток прошел путь Z, то форма будет прогреваться τ0= сек.

Сравнение охлаждения отливок в формах из ХТС с разным составом продемонстрированы с помощью PoligonSoft на рисунке 2.6.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |
|  |  |
| в | г |

а – литье в форму из ХТС с 5% глиной через 30 секунд; б – литье в ХТС с 3,5% глиной через 30 секунд; в – литье в форму из ХТС с 5% глиной через 60 секунд; г – литье в форму из ХТС с 3,5% глиной через 60 секунд

Рисунок 2.6 – Состояние отливки, полученные в формах ХТС 1 (5% глины) и ХТС 2 (3,5% глины) через одинаковое количество времени

Здесь можно отметить, что в форме, где содержание глины составляет 5% отливка охлаждается медленнее (рисунок 2.6а, 2.6в), чем при литье в формы из ХТС с 3,5% составом глины (рисунок 2.6б, 2.6г). Это связано с более медленной теплоотдачей форм из ХТС с комплексным связующим из-за содержания в нем огнеупорной глины. При литье в формы из ХТС с традиционным связующим наблюдается быстрое застывание тонких частей отливки, что в дальнейшем не позволяет их подпитывать жидким металлом.

**Вывод по разделу**

1. С помощью системы компьютерного моделирования литейного производства PoligonSoft была составлена матрица тонкостенной отливки, был выбран состав ХТС в базе программы и выполнен алгоритм литья (рисунок 2.1).
2. Получены результаты виртуального литья отливки «Муфты». Тонкая часть стены составляет 5 мм, материал сталь 30Л (выбран из базы). Смоделированы отливки, полученные в трех разных формах из следующих составов: первый состав - ХТС без глины, второй состав ХТС с добавлением 3,5% глины, третий состав – ХТС с добавлением глины 5%. Определено, что, как и во многих отливках, сначала охлаждается тонкая часть отливки. И в данной работе использование глины способствует более медленному остыванию тонких частей за счет снижения теплоотдачи и, следовательно, выравниванию температурных полей в отливках, имеющих тонкостенные части.
3. Определена скорость и распределение температурных полей по объему отливки во времени. Состояние отливок представлены на рисунке 2.6. Отливка, полученная литьем в форме из ХТС с добавлением 3,5% охлаждается на 30% быстрее, чем в форме из ХТС с добавление 5% глины.
4. Из следующего состава смеси (смола -1,2%, глина (огнеупорная) -3,5%, песок свежий - 100%, исходная плотность - 1565 кг/м3) программа рассчитала теплоемкость и теплопроводность холоднотвердеющей смеси. Данные выбраны в базе программы PoligonSoft и представлены на рисунке 2.3.
5. Выяснено, что наличие глины в составе формовочной смеси влияет на скорость охлаждения. Чем больше в составе смеси глины, тем отливка медленнее охлаждается, что в конечном итоге влияет на структуру и, следовательно, на свойства отливки.
6. **МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**3.1 Технологическое и исследовательское оборудование, применяемое для исследований**

В век информационной технологии существует многочисленные оборудования и программы, системы компьютерного моделирования для решения задач любой сложности. И Республика Казахстан располагает реальными условиями для выполнения научных работ и получения высотехнологических продукции на современном рынке. От общего комплекса выполненных работ 80% приходятся на научно-учебные заведения. И использую такую возможность, для выполнения данной диссертационной работы применялось ряд оборудований кафедры НТМ НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Международного центра материаловедения, Лаборатории инженерного профиля. Также были выполнены работы в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого, НАО «КазНИТУ имени К. Сатпаева», в Краковском политехническом университете имени Т. Костюшко.

В [48] предложен состав ХТС для изготовления форм, содержащий огнеупорный наполнитель, оксиды железа, ортофосфорную кислоту и боксит. Недостатком такой смеси является необходимость предварительной подготовки боксита перед использованием в ХТС, а именно измельчения и сушки. Кроме того, нестабильность бокситов по химическому составу существенно влияет на возможность и количество образования железофосфатных связок. В [49] приведен состав ХТС, включающий материал на основе оксида и оксида железа в виде отработанной пыли электросталеплавильного производства, ортофосфорной кислоты и хромового ангидрида. Главный недостаток этой смеси – наличие ядовитого и канцерогенного вещества – ангидрида хрома.

В качестве связующего предлагается использовать водные растворы фенольных веществ, реагирующих с альдегидами и газообразными ацеталями. В [48, с. 507-509] в качестве катализатора предлагается использовать смесь, содержащую эпоксидную смолу и фурфуриловый спирт.

Следует отметить, что вариации составов ХТС касаются не только вяжущих и технологических добавок, но и основного компонента – огнеупорного наполнителя. Например, в качестве огнеупорного наполнителя предлагается использовать материал, выделенный из рисовой шелухи, так как он содержит большое количество SiO2.

В качестве высокодисперсного материала предлагается использовать пыль газоочистки производства ферросилиция, средний состав которой приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Состав пыли газоочистки производства ферросилиция, %

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| SiO2 | Fe2O3 | Al2O3 | MgO | CaO |
| 80-95 | 0,2-4,5 | 1,8-8,6 | 1,3-1,5 | 0,4-2,6 |

Следует отметить, что пыль газоочистки имеет очень развитую поверхность по технологическим причинам. По разным оценкам удельная поверхность пыли газоочистки составляет от 8000 см2/г и выше. Такая развитая поверхность обеспечивает высокую степень контакта реагентов (диоксида кремния и ортофосфорной кислоты) с образованием соединения пирофосфата кремния и силикофосфата переменного состава типа x SiO2 \*YP2O5. Образование этого соединения вызывает затвердевание смеси, что обеспечивает формирование и свойства формы.

Все образцы форм из холоднотвердеющей смеси были получены в лабораториях кафедры НТМ. Работы по теплопроводности, выявлений физико-механических, технологических свойств были получены в Международном центре материаловедения.

Для получения кварцевого песка нужных размеров, и выявление гранулометрического состава песка применяли аналитическую просеивающую машину (рисунок 3.1а).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\User\Downloads\IMG_0502.jpg | C:\Users\User\Downloads\IMG_1999.jpg |  |
| а | б | в |

а – просеивающая машина: сито, для просеивания песка; б – прибор для получения образцов; в – твердомер для определения твердости сухих и влажных смесей

Рисунок 3.1 – Приборы для подготовки смеси.

Далее получение состава смеси и трамбовка выполнялись в лаборатории кафедры НТМ (рисунок 3.1б).

Работы по теплопроводности, исследования физико-механических и технологических свойств проводились в Международном центре материаловедения.

Твердость измеряли на твердомере для сухих и влажных формовочных смесей марки 4564654 (рисунок 3.1в). Согласно стандарту, твёрдость мерили с трех точек образца и вычислили средний.

Для получения данных об осыпаемости применяли прибор для измерения осыпаемости (рисунок 3.2а) Были получены показатели массы до и после отправления образца в барабан прибора. В конечном итоге разница массы определяет процент осыпаемости образца ХТС. На приборе для определения газопроницаемости компрессорного типа, без колокола 04315м выполнялась работа по определению газопроницаемости образцов из ХТС (рисунок 3.2б). Все работы проводились согласно техническим характеристикам и правилам ТБ.

Также нужно отметить, что для составов ХТС в измельченном виде проводился рентгенофазовый анализ (РФА) с пристроенной программой Match. Механическое измельчение порошка проводили до нанометров со скоростью 1000 об/мин в течение 30 мин на высокоскоростной шаровой мельнице Retsh.

Так как основной задачей работы является бездефектные отливки с применением формы из ХТС, полученные отливки не подвергались механической обработке. После получения отливок проводились работы по изучению макроструктуры. Отрезка металла, получение шлифов (шлифовка и полировка) проводились в Лаборатории инженерного профиля. На рисунке 3.2 представлен комплекс подготовки проб для дальнейшего металлографического анализа Struers.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\Downloads\IMG_0243.jpg | C:\Users\User\Downloads\IMG_0242.jpg |
| а | б |

а – прибор для проверки осыпаемости формы: прибор для определения газопроницаемости; б – прибор для выявления газопроницаемости образцов: прибор для определения осыпаемости формы

Рисунок 3.2 – Приборы для определения физико-механических свойства образца из ХТС

Далее работы по микроструктуре образцов из ХТС исследовали несколько раз на оптических микроскопах лаборатории кафедры НТМ, на оптическом микроскопе Альтами Международного центра материаловедения. Перед исследованием микроструктуры, полученные стальные образцы обрабатывались на шлифовально-полировочном станке (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Подготовка проб на шлифовально-полировочном станке

На полученные образцы отливок, изготовленные на формах ХТС с разным содержанием связующих материалов, проводился металлографический анализ, элементный анализ и рентгенофазовый анализ. Данные исследования проводились как на кафедре, так и на стажировке в Краковском политехническом университете и в НАО «КазНИТУ имени К. Сатпаева». Все рисунки и результаты анализов исследований приведены в главе «Производственная часть».

**3.2 Влияние связующих материалов на теплопроводность ХТС**

Для определения теплопроводности смеси использовался метод вероятностного детерминированного эксперимента [50, 51]. Для расчетов были приняты следующие факторы: содержание эпоксидной смолы от 1 до 3%; содержание глины (они предложены в процентах от массы наполнителя – кварцевого песка от 2 до 8 %); так же третий фактор – содержание влаги. За результат эксперимента приняли коэффициент теплопроводности.

В итоге, была использована шестифакторная матрица экспериментов на пяти уровнях, в которой три фактора – вакантные.

В таблице 3.2 приведены факторы эксперимента по содержанию связующих материалов и их численные значения.

Таблица 3.2 – Факторы эксперимента по содержанию связующих материалов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Факторы | | Уровни факторов | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| *X1* | Содержание эпоксидной смолы с отвердителем, мас., рэпок% | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| *X2* | Содержание глины, мас., рглина, % | 2 | 3,5 | 5 | 6,5 | 8 |
| *X3* | Содержание влаги, рвлаги, % | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| *X4* | Вакантный фактор | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| *X5* | Вакантный фактор | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| *X6* | Вакантный фактор | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Таблица 3.3 – План 6-факторного эксперимента в 5 уровнях

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | Результат эксперимента, Yэ |
| 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,493 |
| 1 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0,512 |
| 1 | 3,5 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0,512 |
| 1 | 8 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0,497 |
| 1 | 6,5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0,501 |
| 2 | 2 | 3 | 2 | 5 | 4 | 0,501 |
| 2 | 5 | 2 | 5 | 4 | 1 | 0,501 |
| 2 | 3,5 | 5 | 4 | 1 | 3 | 0,512 |
| 2 | 8 | 4 | 1 | 3 | 2 | 0,508 |
| 2 | 6,5 | 1 | 3 | 2 | 5 | 0,512 |
| 1,5 | 2 | 2 | 4 | 3 | 5 | 0,497 |
| 1,5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 4 | 0,512 |
| 1,5 | 3,5 | 4 | 3 | 5 | 1 | 0,512 |
| 1,5 | 8 | 1 | 2 | 4 | 3 | 0,508 |
| 1,5 | 6,5 | 3 | 5 | 1 | 2 | 0,508 |
| 3 | 2 | 5 | 3 | 4 | 2 | 0,508 |
| 3 | 5 | 4 | 2 | 1 | 5 | 0,501 |
| 3 | 3,5 | 1 | 5 | 3 | 4 | 0,501 |
| 3 | 8 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0,497 |
| 3 | 6,5 | 2 | 1 | 5 | 3 | 0,508 |
| 2,5 | 2 | 4 | 5 | 2 | 3 | 0,501 |
| 2,5 | 5 | 1 | 4 | 5 | 2 | 0,512 |
| 2,5 | 3,5 | 3 | 1 | 4 | 5 | 0,508 |
| 2,5 | 8 | 2 | 3 | 1 | 4 | 0,508 |
| 2,5 | 6,5 | 5 | 2 | 3 | 1 | 0,497 |

Методом наименьших квадратов обработали данные таблицы 3.3 и получили частные зависимости в виде линейных и полиномиальных функций типа:

Y (X) = a + bX, (3.1)

Y (X) = c0 + c1X1 + …+cnXm, (3.2)

где a, b, ci – фиксированные коэффициенты;

X - переменная (фактор).

1. от фактора X1 (pэпок, содержание смолы с отвердителем в ХТС, %) уравнение вида:

Y1 =0,015х2+0,061х+1,928 (3.3)

2) от фактора X2 (рглина, содержание глины, %):

Y2=0,0007x2 + 0,0073x + 0,4895 (3.4)

3) от фактора Х3 (рглина, содержание влаги, %):

Y3= 0,005x2 + 0,0004x + 0,5046 (3.5)

В таблице 3.4 приведены экспериментальные значения коэффициента теплопроводности формы из ХТС.

Таблица 3.4 – Расчётные значения частных функций

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Функция | Уровень | | | | | Среднее значение, Y ср. т. |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| y = 0,015х2+0,061х+1,928 | 0,503 | 0,507 | 0,507 | 0,505 | 0,503 | 0,505 |
| y =0,0007x2 + 0,0073x +0,4895 | 0,5 | 0,509 | 0,508 | 0,505 | 0,504 | 0,505 |
| y = 0,005x2 + 0,0004x + 0,5046 | 0,505 | 0,505 | 0,506 | 0,507 | 0,507 | 0,505 |

Как видно из таблицы 3.4, средние значения по каждой функции совпадают с общим средним значением, что является свидетельством отсутствия ошибки.

На рисунке 3.4 показаны графики полученных частных зависимостей, построенные по данным таблицы 3.4.

а

а – от содержания смолы с отвердителем, %

Рисунок 3.4 – Частные зависимости теплопроводности форм из ХТС, лист 1

б

в

б – от содержания глины, %; в – от содержания влаги, %

Рисунок 3.4, лист 2

Коэффициент корреляции для каждого уравнения составил R<1.

Коэффициент корреляции по сравнения с экспериментальными данными для первого уравнения составил R=0,9, для второго уравнения R=0,712 и для третьего уравнения R=0,866. Данные значения свидетельствует о влиянии фактора на результат.

Поскольку средние значения расчётных значений функций полностью совпали с экспериментальными данными, выборка частных зависимостей проведена правильно.

Yn=

(0,015х2+0,061х+1,928)(0,002х2+0,028х+1,919)(0,019х2+0,001х+1,978) (3.6)

λХТС=(0,015ρэпок2+0,061ρэпок+1,928)

(0,002ρглина2+0,028ρглина+1,919)(0,019ρвлага2+0,001ρвлага +1,978) (3.7)

Полученное обобщённое уравнение (3.7) для прогнозирования теплопроводности смеси из ХТС (λХТС), при содержании эпоксидной смолы с отвердителем от 1-3%, содержание глины было предложено в процентах от массы общей смеси от 2 -8% и при содержании влаги в смеси от 1-5% является адекватным.

Таблица 3.5 – Результаты по уравнению для прогнозирования теплопроводности

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Содержание смолы, Х1, (%) | Содержание глины, X2 (%) | | | | | |
|  | 2 | 3,5 | 5 | 6,5 | 8 |
| 1 | *0,505* | *0,501* | *0,512* | *0,497* | *0,508* |
| 1,5 | 0,493 | *0,505* | *0,503* | 0,493 | *0,512* |
| 2 | *0,512* | *0,508* | *0,505* | *0,503* | 0,493 |
| 2,5 | *0,501* | 0,493 | *0,508* | *0,505* | *0,508* |
| 3 | *0,508* | *0,497* | *0,512* | *0,512* | *0,505* |

По результатам проверки (таблица 3.5) уравнения можно отметить, что для большего употребления глины требуется пропорциональное соотношение смолы. Средние значения частных функции показали следующие соотношения глина-смола: 2-1; 3,5-1,5; 5-2; 6,5-2,5; 8-3.

Рост теплопроводности формовочной смеси по мере возрастания содержания в ней эпоксидной смолы происходит в виде параболы, то есть при содержании эпоксидной смолы от 1,5 до 2,5 % формовочные образцы имеют более высокую теплопроводность, которая равна ≈0,507 коэф.

Наибольший прирост теплопроводности [50] холоднотвердеющей формовочной смеси происходит при уровне расхода глина – 3,5% от общей массы смеси. Такое содержание глины фиксирует среднюю теплопроводность, так как лабораторные исследования показали, что большое содержание глины приводит к ухудшению охлаждения металла, потому что тепло не может выйти вовремя, что может привести к различным родам брака. Тем не менее, при большом содержании глины ухудшается газопроницаемость формы, что не дает газам, которые неизбежно присутствуют при заливе металла, выводиться сквозь форму, и тем самым ведет к образованию раковин на поверхности отливки, ухудшая качество поверхности. Меньшее количество содержание глины приводит к быстрому охлаждению, следовательно, к неоднородной структуре, что далее повлияет на эксплуатационные свойства детали.

Содержание влаги в смеси так же влияет на теплопроводность смеси, тем больше влаги в смеси, тем ниже будет теплопроводность. С точки зрения законов теплофизических свойств холоднотвердеющих смесей, влага в смеси не должна превышать 5%, так как она будет влиять на живучесть смеси.

Таким образом, наиболее рациональным, с точки зрения выявления оптимального уровня теплопроводности, предлагается расход эпоксидной смолы 1,5-3 % при содержании глины 3,5-5%, влажность смеси-2%.

**3.3 Связующие материалы, применяемые для получения холоднотвердеющей смеси**

Холодно-твердеющие смеси – это специальные смеси, которые после изготовления не требуют нагрева и других дополнительных воздействии. Благодаря связующим компонентам и отвердителям, они самозатвердевают на воздухе за короткое время. Эта технология очень похожа на традиционное литье в песчано-глинистые формы, только в виде связующего вещества применяют искусственные смолы. Для отверждения смол применяется разные катализаторы. Возможность получать отливки 7 класса точности по ГОСТ 26645-85 [52]. Холодно-твердеющие смеси крайне редко применяются в качестве общих формовочных материалов так, как компоненты смеси имеют высокую стоимость. И, в данной работе рассматривается подбор оптимального состава ХТС, что положительно скажется на экономике нашей страны. Технология литья в ХТС позволяет обеспечить высокое качество поверхности литья, отсутствие газовых дефектов и засоров в отливке.

Холоднотвердеющие смеси представляют собой многокомпонентные системы. Их свойства зависят не только от технологии приготовления, но и в значительной степени от свойства исходных формовочных материалов.

При выполнении данной диссертационной работы применяли следующие формовочные материалы:

1. Наполнитель – кварцевый песок марки 1К02А-75%, фракции песка 250 и 125 мкм.

2. Связующие вещества:

а) формовочные каолинитовые глины месторождения «Белое Глинище», «Карасор», «Алексеевское»;

б) эпоксидная смола марки ЭД-20;

3. Катализатор:

а) отвердитель марки 921 ОП

В состав холоднотвердеющих смесей входит песок кварцевый, смола (полимерная или органическая) и катализатор отверждения смолы. В данном исследовании применялись следующие компоненты: смола эпоксидная, а также кварцевый песок.

Для выполнения работы в виде наполнителя был выбран кварцевый песок марки 1К02А-75%. На базе НАО Карту с помощью экстренного определителя химического состава материалов был определен состав наполнителя. Данные приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Химический состав кварцевого песка 1К02А

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Название элемента | SiO2 | Fe2O3 | Al2O3 | CaO | MgO | Na2O | K2O |
| Содержание, % | 99,2 | 0,075 | 0,67 | 0,33 | 0,21 | 0,025 | 0,08 |

Как видно из таблицы 3.6, состав наполнителя полностью соответствует нормативным требованиям для формовки смеси.

На физико-механические и технологические свойства смесей большое влияние оказывает форма зерен песка. Пески с округлой формой зерен имеют максимальную текучесть, с остроугольной – наименьшую. Содержание кварца в песках для формовочных смесей должно быть не менее 97%, что соответствует пескам класса 1К (ГОСТ 2138-56) [53]. Влажность песка должна быть не выше 1%.

На технологические свойства смеси большое влияние оказывает и температура песка. При температуре выше 25ºС происходит быстрое отверждение смеси; при ее понижении (ниже 18ºС) твердение стержня замедляется, в этом случае необходим повышенный расход катализатора.

В связи с распространением в современной практике литейного производства процессов изготовления стержней и форм из смесей с синтетическими смолами регенерация отработанных смесей приобретает особое значение. С ростом объемов производства удовлетворять потребность в свежих песках становится все сложнее, одновременно возрастают трудности с вывозом больших количеств отработанной смеси в отвал [54].

При повторном использовании стержневых смесей возникают две задачи: восстановление зернового состава и снижение остаточного содержания органических продуктов твердения.

Гранулометрический состав кварцевого песка определялось ситовым анализом. Такой анализ проводилось согласно ГОСТ 18318-73 на устройстве для рассева порошков на фракции [55].

Для получения формы использовался песок марки 1К02А месторождения Карасор, получили две фракции песка: 250 мкм, 125 мкм.

Принципиальным отличием исследования является использование глины казахстанских месторождений, как связующий компонент в холодно-твердеющей смеси наряду со смолами, что существенно снизит себестоимость такой смеси, а, соответственно, и отливок. Стоимость такого материала будет ниже аналогов за счет низкой себестоимости. Кроме того, данный компонент на 95% может быть регенерирован, что положительно повлияет на санитарно-гигиеническую обстановку на рабочем месте формовщиков и заливщиков на производстве и на экологическую обстановку в стране в целом [56].

Формирование прочности смесей со смолами, как и вообще формовочных смесей, представляет собой сложный процесс, в котором можно выделить два основных элемента – физический и физико-химический. Первый состоит в распределении связующего по зернам при перемешивании и последующем образовании определенного числа контактов (мостов) между зернами при принудительном уплотнении или простой засыпке смеси. Очевидно, что здесь играют роль преимущественно физические характеристики наполнителя – гранулометрия, удельная поверхность. Второй заключается в отверждении связующей композиции, формировании когезионных и адгезионных сил; здесь наполнитель выступает как участник химического взаимодействия со связующим. В этом случае имеет значение наличие в наполнителе компонентов, химически активных к связующей композиции, физико-химическая природа поверхности зерен. Магнезитохромит имеет рассредоточенную почти равномерную структуру. Соответственно эти наполнители отличаются и по удельной поверхности. Тем не менее, смеси с этими резко различными по структуре материалами имеют удовлетворительные прочностные свойства.

При выборе наполнителей следует иметь в виду, что при уменьшении среднего размера зерен можно получить более высокую прочность смесей, если при этом увеличить расход связующего пропорционально росту удельной поверхности наполнителя. Тогда расход связующего на единицу поверхности наполнителя не изменится, а вероятное число контактов между зернами на единицу объема смеси возрастает.

Однако в большинстве случаев увеличение содержания связующего по экономическим и санитарно-гигиеническим соображениям нежелательно, поэтому лучшими являются среднезернистые пески групп 016, 02, 0315. Исследования, проведенные с песками различных карьеров, показали, что содержание мелких фракций на ситах 01-005 выше на 5-10% не желательно, так как при этом рост расхода связующей композиции опережает рост прочности.

Прочность увеличивается с повышением объемной массы наполнителя, так как объемный расход связующего на единицу поверхности и, следовательно, толщина пленок на зернах возрастает. В связи с этим, при переходе от кварцевого песка к циркону или дистен-силлиманиту содержание связующего в смесях может быть снижено с 2,0-2,5 до 1,5-1,8 м.ч. при одновременном повышении конечной прочности на 30-70%.

Наиболее резко снижают скорость отверждения и прочность, глинистые составляющие, и в частности, глина. В опытах, специально готовили наполнители, вводя в кварцевый песок 1К02А (0,4% глинистой составляющей) огнеупорную глину. При 2% глины прочность оказывается уже недостаточной, осыпаемость повышается с 0,2-0,4% (у исходного песка) до 1%. Вредное действие глины можно компенсировать введением силана или увеличением содержания связующего до 2,5-3,5 м.ч [57].

Содержание связующего в ХТС – основной показатель состава, определяющий уровень прочностных характеристик стержней и форм, качество отливок, санитарно-гигиенические характеристики процесса и его технико-экономическую эффективность.

Очевидно, что минимальный расход смолы с учетом получения необходимых технологических параметров позволит снизить себестоимость формы и литья в целом. Минимально возможный расход связующего определяется качеством применяемого песка. Также мы используем добавку 2-3 % глин казахстанских месторождений. Желательно применение обогащенных песков с содержанием глинистой составляющей не более 0,5% и с зернистостью не менее зерности песка марки 1К02А.

Чем выше прочность смесей со смолами, тем шире возможности их практического применения. Высокая прочность необходима для условий массового производства; в единичном и мелкосерийном производстве при наличии большого резерва по прочности можно сократить содержание в смеси связующего и катализатора, что служит наиболее эффективным способом уменьшения вредных газовыделений в окружающую среду и снижения стоимости материалов. Смеси с более высокой прочностью могут использоваться для более крупных и массивных отливок.

Анализируя процессы формирования прочности, следует обратить внимание на явление, хорошо известное из опыта - снижение прочности на поздних стадиях отверждения вследствие повышения скорости процесса на начальной стадии. Причина этого заключается в особенностях структуры и свойств самой связующей композиции, отверждаемой с разной скоростью. Это особенно важно для разработки процессов изготовления стержней и форм с коротким циклом холодного отверждения.

Значительные трудности представляет разработка или выбор экспериментальных методов изучения процессов формирования прочности. Если когезионную прочность полимеров можно косвенно оценивать по прочности на сжатие образцов отвержденных смол, то определение адгезии к кварцу применительно к формовочным смесям имеет принципиальные особенности. Из многих известных вариантов исследования адгезии был выбран метод определения прочности склейки кварцевого волокна со смолой холодного отверждения. К достоинствам метода относятся:

1. Соизмеримость площади склейки с площадью поверхности кварцевого зерна.
2. Высокое качество поверхности контакта и минимальная площадь склейки, что уменьшает возможность образования дефектов.
3. Хорошая чувствительность и воспроизводимость результатов.

Адгезию определяют по величине усилия, необходимого для вырывания кварцевого волокна из пленки связующего, заполимеризованного в ячейке подложки-стеклоткани [57].

Методику использовали традиционную, которая состоит в следующем: на специальное металлическое коромысло, наклеивают кусок стеклоткани. Испытуемую жидкую смолу наносят на ткань тонким слоем. При этом смола образует плёнки в капиллярных ячейках стеклоткани. Кварцевое волокно, предварительно обезжиренное ацетоном, промытое дистиллированной водой и высушенное, протягивают через одну из микроячеек и через отверстие в верхней части коромысла. В опытах применяли кварцевое волокно (98% SiO2) диаметром 30-50 мкм. Площадь склейки составляла 0,02-0,03 мм2. Исследуемую смолу перед нанесением смешивали с 35-40% раствором катализатора при соотношении смола-катализатор 1:0,5. Концентрация была занижена, чтобы замедлить отверждение смолы на начальном этапе и обеспечить равномерность пленки смолы в микроячейке подложки. Затем добавлялась глины трех месторождений. Образцы отверждались в течение 24 часов. Из образцов вырезали небольшой кусок стеклоткани, непосредственно прилегающий к кварцевому волокну с отвержденными в микроячейках пленками испытуемой смолы. Свободный край кварцевого волокна вклеивали в наждачную бумагу для зажима в нижнем держателе разрывной машины. Вырезанный кусочек стеклоткани с пленкой связующего укладывают в металлическую скобу, закрепленную в верхнем держателе.

Адгезионную прочность определяем из соотношения:

 (3.8)

где F – усилие отрыва, МПа;

S – площадь склейки, см2 [58].

В составах холоднотвердеющих смесей в качестве связующих применяют силикаты, специально обработанные масла и синтетические смолы.

Силикатные связующие нашли широкое применение как в отечественной, так и в зарубежной литейной практике. Из материалов этой группы в основном используют растворимый силикат натрия - жидкое стекло, для отверждения которого используют только неорганические вещества. Недостаток –- затрудненная выбиваемость стержней из отливок.

Смеси на основе масляных связующих обладают рядом преимуществ, одно из основных – возможность использования песков различной крупности и различного состава, более дешевых, имеющих щелочную реакцию. К недостаткам смесей, ограничивающим их распространение, относятся низкая термическая стойкость, из-за которой возможно появление поверхностных дефектов отливок; неблагоприятные санитарно-гигиенические характеристики смесей с изоцианатами (наиболее опасны пары изоцианатов, выделяющиеся на участках заливки и выбивки стержней).

Зарубежные фирмы и отечественные предприятия широко применяют в последнем десятилетии синтетические связующие, которые могут быть использованы для изготовления стержней и форм, отверждающихся в оснастке без нагрева. В качестве связующих для холоднотвердеющих смесей используют фенолформальдегидные, мочевиноформальдегидные и фурановые смолы.

Формальдегидные смолы давно используют в качестве связующих материалов в литейном производстве. Исходное сырье – фенолы, получающие из продуктов термической переработки твердого топлива и нефтяного сырья кумольным методом. Недостаток смолы – выделение вредных газов при приготовлении и использовании смеси.

Получение мочевиноформальдегидных (карбамидные) смол основано на процессе поликонденсации, сопровождаемом выделением побочных продуктов. Существенный недостаток карбамидных смол – наличие в них формальдегида, что приводит к ухудшению условий труда в цехах и ограничивает область их применения.

Фурановые смолы невозможно применять в смесях для изготовления стальных отливок из-за ситовидной пористости.

Для таких применений практические и экономические причины вынуждают использовать смолы «холодного отверждения», то есть эпоксидные системы, способные достичь подходящей степени отверждения и приемлемых механических свойств за разумное время отверждения при отверждении при температуре окружающей среды. В качестве отвердителей для этой цели обычно используют алифатические амины, так как они способны вступать в реакцию с эпоксидными смолами даже при низких температурах.

Однако для получения материала с удовлетворительной степенью сшивки необходимы многие недели отверждения по сравнению с несколькими часами отверждения, которое требуется эпоксидным смолам, отверждаемым с помощью источника тепла. Тем не менее, превращение эпоксидных групп никогда не бывает полным и достигается умеренная температура стеклования (Tg), которая обычно не превышает 60°C. В результате воздействие температуры, немного превышающей температуру окружающей среды, вероятно, вызовет перезапуск реакций сшивания с последующим увеличением Tg и, в свою очередь, усилением жесткости системы. С другой стороны, поглощение внешней воды, как в жидкой, так и в паровой форме, вызывает снижение начальной Tg смолы, что влияет на механические свойства и может обеспечить процесс постотверждения даже при таких низких температурах окружающей среды.

Эти термодинамически нестабильные системы также могут подвергаться физическому старению: это приводит к уменьшению свободного объема полимера с течением времени (а именно, процессу «уплотнения») с последующим изменением всех механических, зависящих от температуры свойств. Физическое старение в стеклообразном состоянии происходит очень медленно, тогда как оно происходит быстро при температурах, близких к T0. Последнее относится к смолам холодного отверждения, в которых T0 может быть легко достигнута и даже превышена из-за внешней температуры. Физическое старение – это термообратимое явление, которое можно стереть, когда полимер нагреется выше его T0. Когда рабочая температура превышает T0 состаренной эпоксидной смолы холодного отверждения, происходит «омоложение» смолы, то есть стирание физического старения с восстановлением исходных свойств. Эпоксидные смолы холодного отверждения, подвергающиеся воздействию естественных погодных условий, поэтому постоянно подвергаются процессам старения и разрушения, которые происходят в неизотермических условиях, в зависимости от фактических метеорологических погодных условий.

Материальным объектом исследования является эпоксидная смола, производимый и поставляемый ЭП-СМ-ПРО. Система представляет собой эпоксидную смолу, используемую в качестве матрицы для армированных волокном композитов (FRP) в процедурах восстановления, и она уже широко применяется в строительстве.

Эпоксидные смолы получают с помощью процесса синтеза полимеров из эпихлоргидрина и многоатомных фенолов в щелочной среде. Эпоксидные смолы отличаются высокой теплостойкостью, химической стойкостью, устойчивостью, диэлектрической прочностью. Применение эпоксидной смолы в литейном производстве обеспечивает высокое качество получаемой детали. Они отличаются поверхностной гладкостью и чистотой, и на деталях практический отсутствует пригар. Применение эпоксидной смолы можно использовать для литья всех видов сталей (легированная сталь, чугун, углеродиста сталь, цветные металлы и сплавы).

В данном случае работу выполняли с помощью эпоксидной смолы ЭП-СМ-ПРО. Смола этой марки является прозрачной модифицированной не отвержденной в начальном составе. Динамическая вязкость составляет 500-1500 Мпа. В комплект к ней обязательно идет отвердитель. Только в комплекте с отвердителем состав принимает твердое состояние. Соотношение смеси эпоксидной смолы и отвердителя идет 2:1.

Определенный состав данной эпоксидной смолы полностью соответствует требованиям для получения качественной формы для получения отливок. Так как данный вид эпоксидной смолы применятся во всех сферах строительства, машиностроения, спрос на данный вид материала большой. Кроме того, этот состав обладает следующими достоинствами:

– полная герметичность;

– отсутствие испарения вредных веществ после застывания;

– высокая жидкотекучесть;

– снижение себестоимости;

– высокая стойкость к истиранию.

Исходя из этих достоинств был выбран данный вид связующего, что всецело соответствует требованиям для получения качественной формы.

Плотность эпоксидных смол определяли с помощью набора денсиметров (ГОСТ 1300-74) [59] с пределами измерений от 700 до 1800 кг/м3 и ценой деления шкалы I кг/м3.

Гарантийный срок годности эпоксидных смол с момента производства составляет ровно 12 месяцев. При этом эпоксидную смолу надо хранить в специализированных тарах с закрытой крышкой при температуре от 18 до 25 ̊С. В составе с отвердителем эпоксидная смола имеет свою живучесть не более 3 месяцев.

Для использования эпоксидной смолы в качестве связующего материала для получения холодно-твердеющей смеси периодическим контролем (каждые 2 недели) вязкости смолы и прочностных свойств ХТС с 2,5 масс.ч смолы и 1,2 масс.ч катализатора. Срок годности ограничивался снижением прочностных свойств ХТС на 25% по сравнению с исходными и увеличением вязкости до 280...300 с.

**Вывод по разделу**

1. Для проведений исследований свойств холодно-твердеющих смесей было проведено математическое планирование экспериментов на теплопроводность смеси. Была использована шестифакторная матрица экспериментов на пяти уровнях, в которой три фактора – вакантные. Методом наименьших квадратов обработали данные и получили частные зависимости в виде линейных и полиномиальных функций.
2. Построена эмпирическая формула для расчета теплопроводности смеси ХТС:

λХТС=(0,015ρэпок2+0,061ρэпок+1,928)(0,002ρглина2+0,028ρглина+1,919) (0,019ρвлага2+0,001ρвлага+1,978)

Выбрано технологическое и исследовательское оборудование, прошедшее поверку и входящие в область аккредитации: станки для изготовления шлифов, оптические микроскопы, оборудование для определения газопроницаемости, осыпаемости, пределов прочности, твердости и т.д. Также задействовано оборудование из лабораторий других вузов (КазНИТУ им. К. Сатпаева, СПбПУ Петра Великого) для подтверждения достоверности результатов и расширения области исследований.

1. Для выполнения ресурсосберегающей технологии по изготовлению литейной формы из ХТС были выбраны следующие формовочные и связующие материалы: наполнитель – кварцевый песок марки 1К02А-75%, фракции песка 250 и 125 мм.

Связующие вещества:

а) формовочные каолинитовые глины месторождения «Белое Глинище», «Карасор», «Алексеевское»;

б) эпоксидная смола марки ЭД-20;

Катализатор:

а) отвердитель марки 921 ОП.

Новый состав позволяет ликвидировать этап сушки.

**4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВОВ И РЕЖИМОВ НА СВОЙСТВА ФОРМ ИЗ ХТС**

**4.1 Выбор связующих материалов для получения ХТС**

Проблема получения качественных отливок в заданном количестве может быть решена только при комплексном анализе и управлении технологическим процессом и средствами его реализации на всех этапах производственного процесса. В этом случае возникает необходимость рассмотрения литейного технологического процесса как системы и системного подхода для решения возникающих проблем.

Наполнители являются основой огнеупорной частью формовочной и стержневой смеси и по объему составляют около 80-90% от всех исходных формовочных материалов. В зависимости от характера производства, марки металла и массы отливки используются наполнители различного типа.

Дефекты отливок, зависящие от стержней и форм, формируют дефекты отливок. Процесс взаимодействия смесей с металлом. Важнейшей характеристикой этого взаимодействия является теплообмен между отливкой и формой. Температурные поля в системе отливка - форма в различные моменты или периоды времени определяют условия протекания практически всех процессов на границе раздела металл - форма и в объеме формы [60].

Анализируя теплообмен с изложенных позиций, можно считать определяющими три параметра:

1. τ0 - продолжительность непосредственного контакта жидкого металла со смесью. В этот период образуются почти все виды поверхностных дефектов (пригар, просечки, ужимины и т.п.), поэтому свойства холоднотвердеющих смесей именно в период τ0 представляют особый интерес. Знание τ0 необходимо также для оценки вероятности протекания тех или иных физико-химических процессов на границе раздела.

2. Температурное поле в стержне или форме в заданный момент времени:

tx=f(τ,x), (4.1)

где tx – температура смеси на расстоянии x от поверхности раздела, °С;

τ – время.

По температурным полям можно изучать влияние смесей па затвердевание отливок, исследовать и анализировать температурные превращения в смесях в условиях, близких к реальным, характер газовыделений при нагреве, формирование свойств отработанных смесей, как объекта повторного использования или регенерации и т. д.

3. Скорость нагрева смеси в заданной точке стержня или формы υx, °С/мин. Этот параметр, определяемый из предыдущего, необходим для разработки методов исследований свойств смесей при высоких температурах, максимального приближения условий эксперимента к условиям реального взаимодействия. Для выполнения работы использовался кварцевый песок марки 1К02АА. Данный вид песка поставляется карьерами с влажностью от 6-12%. В данном песке влажность составляет 10%. Средняя огнеупорность составляет 1680-1750˚С. При изготовлении стержней все пески проходят сушку и просев. Для изготовления образцов был использованы пески разных фракции [61].

В данной работе рассматриваются связующие в виде смолы и глины. Введение в состав смесей различных глин позволяет использовать их самопроизвольные затвердевание для регулирования в широких пределах свойств (длительность индукционного периода твердения, прочность форм и стержней). В виде связующего материала применяются глины. Применяли глины трех месторождении: Карасор (Павлодарская область), Алексеевское (Акмолинская область), Белое Глинище (Карагандинская область) (рисунок 4.1). Данные глины отличаются по цвету, консистенции. Размер частиц составляет ˂ 0,022 мм. Применение глины в составе холоднотвердеющей смеси позволит обеспечить огнеупорность смеси при заливке металла, так же из-за дороговизны эпоксидной смолы, ее частично можно заменить глиной, что и положительно повлияет на себестоимость формы. Форму оставляем на 18-24 часа в комнатной температуре для полного отверждение.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.569\IMG_9575.jpg | C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.372\IMG_9577.jpg | C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.239\IMG_9578.jpg |
| а | б | в |

а – Глина месторождения Карасор - бентонитная; б – глина месторождения Белое Глинище - огнеупорная; в – глина месторождения Алексеевское - каолиновая

Рисунок 4.1 – Глины из разных месторождений

Для выполнения исследовательской части данной работы были подготовлены образцы ХТС с разными составляющими. Для получения состава холодно-твердеющей смеси нам понадобится различные тары, электронные весы, формы для образца, оборудование для трамбовки.

Данные образцы ХТС делаются следующим образом: сначала в тару 100 г помещается кварцевый песок, затем заливаем эпоксидная смола+ отвердитель (общая масса 15 г). А следующих двух образцах в состав включали белые глины. Образцы с белой глиной значительно отличается твердостью. Время перемешивания в первом случае составляет 2-3 минуты. А при использовании порошкообразного отвердителя, то есть, это глина, последний перемешивается в течение 2-4 мин с песком, затем вводится смола с отвердителем. Состав смеси для холоднотвердеющей формы показан в таблице 8. Данная марка эпоксидной смолы ЭД-20 состоит из эпихлоргидрина, дифенилолпропана, едкий натр. Данные составляющие соединятся и перемешиваются в течение 2 часов, затем 5-6 раз промывают водой при 40ºС.

В этот момент происходит разделение слоев, убирается слой поваренной соли. Далее полученную смесь, то есть готовую эпоксидную смолу разливают по алюминиевым тарам.

Данные составляющие смолы по химической природе являются малоопасными реагентами. Поэтому смола марки ЭД-20 не является токсичным веществом, не имеет запаха.

Естественно, что эпоксидная смола применятся в комплекте с отвердителем. Данный вид отвердителя (ПЭПА) способствует формированию прочной смеси.

Таблица 4.1 – Содержание образцов из ХТС.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Название | Глина | Состав глины, % | Эпоксидная смола ЭП-20 с катализатором  ОП-921 (2:1), % | Процентное содержание кварцевого песка марки 1К02А |
| ХТС 1 | Карасор | 2 | 1,5 | 96,5 |
| ХТС 2 | Карасор | 3,5 | 95 |
| ХТС 3 | Карасор | 5 | 93,5 |
| ХТС 4 | Алексеевское | 2 | 1,5 | 96,5 |
| ХТС 5 | Алексеевское | 3,5 | 95 |
| ХТС 6 | Алексеевское | 5 | 93,5 |
| ХТС 7 | Белое глинище | 2 | 1,5 | 96,5 |
| ХТС 8 | Белое глинище | 3,5 | 95 |
| ХТС 9 | Белое глинище | 5 | 93,5 |
| ХТС 10 | Без глины | - | 1,5 | 98,5 |
| Примечание. Процентное содержание в данной таблице рассчитывалась от общей массы смеси | | | | |

Из данной смеси готовили образцы и уплотняли пуансоном на ручном прессе. После выдержки в течение заданного времени затвердевший образец выталкивали из гильзы металлическим стержнем (рисунок 4.2).

Также предпринята попытка с помощью современных методов исследования изучить механизм взаимодействия эпоксидной смолы с песком и глиной.

В данной технологии песок – это основа, эпоксидная смола и глина – связующие вещества. Эпоксидную смолу обязательно смешиваем с отвердителем.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| ХТС 1 | ХТС 2 | ХТС 3 |
|  |  |  |
| ХТС 4 | ХТС 5 | ХТС 6 |
|  |  |  |
| ХТС 7 | ХТС 8 | ХТС 9 |
|  |  |  |
|  | ХТС 10 |  |

– ХТС 1: глина месторождения Карасор- 2%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 96,5; – ХТС 2 - глина месторождения Карасор - 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А – 95%; – ХТС 3 - глина месторождения Карасор- 5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 93,5; – ХТС 4 - глина месторождения Алексеевское- 2%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 96,5; – ХТС 5 - глина месторождения Алексеевское - 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А – 95%; – ХТС 6 - глина месторождения Алексеевское - 5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 93,5; – ХТС 7 - глина месторождения Белое Глинище - 2%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 96,5; – ХТС 8 - глина месторождения Белое Глинище - 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А – 95%; – ХТС 9 - глина месторождения Белое Глинище - 5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 93,5; – ХТС 10 - эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А - 98,5

Рисунок 4.2 – Образцы, полученные с применением комплексных связующих

После получения образцов ХТС, по макроанализу можно сделать вывод, что в ХТС 10, где глина не используется, форма не получилась, она моментально разрушилась. Структуру смесей исследовали на световом микроскопе «Альтами». Из смеси готовили образцы и уплотняли пуансоном на ручном прессе. После выдержки в течение заданного времени затвердевший образец выталкивали из гильзы металлическим стержнем.

Для исследования прочности и макроструктуры полимеров с высокоактивными катализаторами (при высоких скоростях отверждения) перемешивали смолу и катализатор, охлажденные до 2-4ºС, при соотношении от 10:1 до 2,5:1. При этом катализаторы имели максимальную концентрацию. Время перемешивания составляло 4-5с. Готовую композицию выливали в 4-местный блок и получали после отверждения цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой 24 мм. Прочность полимеров определяли на универсальной испытательной машине «Instron» через заданные промежутки времени. Для исследования микроструктуры образцы надпиливали в среднем сечении, разламывали, шлифовали и фотографировали излом при увеличении ×100раз.

Исследования образцов на оптическом микроскопе показали (рисунок 1), что наличие глины (использовалась глина месторождения Белое Глинище) повышает соединение зерновой основы. Расстояние между частицами песка при использовании только смолы значительно больше (рисунок 4.3а), чем в случае применения добавки глины (рисунок 4.3б, 4.3в) [57].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 п+жс | 2 п+жс+3гл | 3 п+жс+10гл |
| а | б | в |

а – 0% глины; б – 2% глины; в – 3,5%

Рисунок 4.3 – Структура образцов из ХТС с различным содержанием глины:

**4.2 Исследование физических, механических и технологических свойств образцов из ХТС**

Качество готовой отливки во многом определяется качеством формы. При изготовлении отливок из сплавов с высокой твердостью особое значение имеют такие параметры качества отливок, как чистота поверхности и соблюдение геометрических размеров, поскольку высокая твердость, износостойкость и относительная хрупкость этих сплавов усложняют механическую обработку готового литья. Соответственно при изготовлении отливок из этих сплавов необходимо стремиться к максимально возможной чистоте поверхности и точности геометрических размеров.

Литье в песчано-глинистые формы (ПГФ) [62] не обеспечивает этих показателей качества, применение других технологий литья (выплавка по выплавляемым моделям, литье по газифицируемым моделям, литье из кокильных форм) ограничено в силу разных причин: сложность процесса, дороговизна, и др. В этом случае хорошей альтернативой этим методам является производство литья в формы, изготовленные с использованием холоднотвердеющих смесей (ХТС).

Суть метода ХТС заключается в утверждении песчано-смоляной смеси под действием катализатора. Основными преимуществами этого метода являются высокая чистота поверхности и точность геометрических размеров получаемых отливок; минимальное количество образовавшихся дефектов литья; возможность регенерации формовочной смеси. Кроме того, полностью исключается этап сушки и нагрева формы, что приводит к значительному сокращению времени процесса изготовления формы.

Основным недостатком использования метода ХТС является токсичность некоторых компонентов смеси и, в связи с этим, необходимость специальных условий их хранения и применения.

В настоящее время существует большое количество вариаций состава ХТС, различающихся как по природе основного компонента, так и по характеру и соотношению вяжущих и других технологических добавок.

Например, в работе ХТС [63] предлагается смесь, содержащая синтетические смолы и неорганические вяжущие: жидкое стекло, цемент, железную окалину, железорудный концентрат, магнезит и хромомагнезит. В состав этого ХТС входят огнеупорный наполнитель на основе диоксида кремния, материал на основе оксидов железа и ортофосфорной кислоты. Его особенность в том, что для уменьшения крошения в состав смеси входит такая технологическая добавка, как аминопропилтриэтоксилан. Однако стоимость этой добавки довольно высока, кроме того, эта смесь имеет достаточно низкую живучесть (3 - 15 мин) и низкую прочность на сжатие (0,1-0,49 МПа).

На основании краткого анализа информации можно сделать вывод, что состав КГМ следует подбирать исходя из оптимального соотношения цена-качество. В свою очередь, это соотношение будет определяться наличием и доступностью доступного сырья.

В данной работе в качестве ХТС предлагается использовать смесь, состоящую из огнеупорного наполнителя на основе SiO2, высокодисперсного компонента и ортофосфорной кислоты в качестве связующих и воды. Целью введения высокодисперсного материала в состав ХТС является увеличение поверхности взаимодействия между реагентами, что должно обеспечить быстрое протекание реакции и сократить время отверждения.

4.2.1 Исследование влияния состава ХТС на твердость

На твердость холоднотвердеющих смесей влияет не только свойства связующего, но и структура смеси. Поэтому могут быть характерны изломы, трещины формы. Но в основном разрушение несет адгезионный характер. Твердость данных образцов измеряли на твердомере для сухих и влажных форм. Данные приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Данные о твердости образцов форм из ХТС

|  |  |
| --- | --- |
| Название формы | Твёрдость образца, ед. |
| ХТС 1 Карасор | 67 |
| ХТС 2 Карасор | 70 |
| ХТС 3 Карасор | 68 |
| ХТС 4 Алексеевское | 65 |
| ХТС 5 Алексеевское | 66 |
| ХТС 6 Алексеевское | 68 |
| ХТС 7 Белое Глинище | 65 |
| ХТС 8 Белое Глинище | 64 |
| ХТС 9 Белое Глинище | 64 |
| ХТС 10 без глины | Форма разрушена |

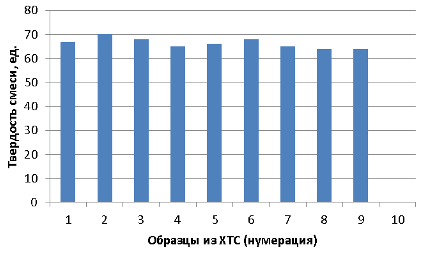


Рисунок 4.4 – Сравнение твердости образцов с разным содержанием глины трех месторождений

На рисунке 4.4 приведена гистограмма по твердости каждого месторождения. Были рассчитаны среднеарифметический твердость по отдельным месторождениям. Как видно высокая твердость присуще образцам с применением глины Карасор.

В зависимости от минералогического состава определяю каолиновые, бентонитные, полименеральные и каолиногидрослюдистые [64]. Для получения формы в литейном производстве используют каолиновые и бентонитные глины. Термостойкость бентонитных равна 1750°С, каолиновый 1500°С.

Представленные глины в работе относятся к бентонитовым. Бентонитовые глины имиеют ряд преимуществ, такие как пластичность, огнеупорность.

Изменение свойств холоднотвердеющей смеси при варьировании различными параметрами представлены на гистограмме 4.4. При приведенных зависимостей следует отметить, что оптимальным для холоднотвердеющих смесей является содержание глины в пределах от 2 до 8%. При этом отмечается максимальная прочность смеси. По мере увеличения времени твердения влажность смеси уменьшается и приближается к допустимой для заливки формы. Существенное влияние на свойства смеси оказывает температура окружающей среды. При уменьшении ее от 20 до 0°С скорость нарастания прочности резко замедляется. Для полноправного отвердевания холоднотвердеющих смесей нужно сохранять температуру 20-24°С.

Эпоксидные смолы получают с помощью процесса синтеза полимеров из эпихлоргидрина и многоатомных фенолов в щелочной среде. Эпоксидные смолы отличаются высокой теплостойкостью. В данном случае работу выполняли с помощью эпоксидной смолы ЭП-СМ-ПРО. Смола этой марки является прозрачной модифицированной не отвержденной в начальном составе. Динамическая вязкость составляет 500-1500 Мпа. В комплект к ней обязательно идет отвердитель. Только в комплекте с отвердителем состав принимает твердое состояние. Соотношение смеси эпоксидной смолы и отвердителя идет 2:1.

Отвердитель – это жидкое химическое вещество или же катализатор. После соединения с эпоксидной смолой, состав обретает твердое состояние. Отвердители бывают двух типов: кислые и аминные. Для отверждения эпоксидных смол с кислыми отвердителями требуется высокая температура, поэтому их называют горячими отвердителями. А в данной работе использовались аминные отвердители 921 ОП (ПЭПА), или по-другому их называют холодными отвердителями. Отвердитель 921 ОП (ПЭПА) является низковязким средством. Они затвердевают при комнатной температуре. После отверждения они переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. Изделия из аминных отвердителей обладают высокой стойкостью к повреждению и УФ-излучению.

Этот состав обладает следующими достоинствами:

– полная герметичность;

– отсутствие испарения вредных веществ после застывания;

– высокая жидкотекучесть;

– снижение себестоимости;

– высокая стойкость к истиранию.

Эпоксидная смола широко применяется в быту, в строительстве. Из данного состава делают наливные полы, эпоксидные клеи, стеклопластиковые детали. Изготавливают декорации из дерева, металла, бетона, а также их можно использовать как антикоррозионные покрытие для разных конструкции.

* + 1. Исследование влияния состава ХТС на прочность

Масса отливок изменяется от десятков килограмм до нескольких десятков тонн при толщине стенок от 20-30 мм до 500-600 мм, поэтому вопросы взаимодействия смесей с металлом должны рассматриваться с такой степенью обобщения, которая, хотя бы в первом приближении, отвечала фактическому многообразию литых деталей. При такой постановке задачи наиболее надежным является сочетание теоретических и экспериментальных методов. Фундаментальные работы в области теории теплопроводности и теплопередачи в литейной форме позволяют решить поставленную задачу следующим образом [65].

Формирование прочности в смесях с синтетическими смолами, подчиняясь общим закономерностям, вместе с тем имеет и специфические особенности. Связующие фенольного и фенолофуранового классов в сочетании с высокоактивными катализаторами дают возможность получать смеси, достигающие манипуляторной прочности через 40-60с. Мочевинофурановые связующие не обладают такими свойствами, однако на более поздних стадиях их прочность оказывается более высокой (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Кинетика отверждения смесей с глинами разных классов

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Связующее | Прочность на сжатие, МПа | | | | | |
| 30с | 40с | 50с | 1мин | 1ч | 24ч |
| Алексеевское | 0,22 | 0,45 | 0,66 | 0,70 | 2,41 | 2,80 |
| Карасор | 0,24 | 0,58 | 0,69 | 0,81 | 3,17 | 4,02 |
| Белое Глинище | - | - | - | 0,19 | 2,52 | 7,13 |

Разная кинетика роста прочности в смесях обусловлена разным соотношением адгезионного и когезионного взаимодействия. На ранних стадиях прочность связующего месторождения Карасор значительно выше, чем глин месторождения Алексеевское и Белое Глинище. Аналогичное явление наблюдается при измерении прочности смесей. Однако при упрочнении смесей с глиной месторождения Белое Глинище их прочность становится выше и через сутки достигает нескольких МПа [57].

Таким образом, исследована прочность адгезионного взаимодействия связующих композиций с кварцем, когезионная прочность образующихся при затвердевании смолы.

Разработанный способ использования глины месторождения Карасор увеличивает прочность ХТС, а также значительно снижает себестоимость таких литейных форм.

Продолжительность контакта жидкого металла со смесью для широкого интервала толщин стенок при определенных допущениях может быть определена аналитически для системы плита - полубесконечная форма, при наличии данных о теплофизических свойствах металла и смесей.

Теория и, в частности, принцип стабильности теплового потока дает методы перехода от плит к телам более сложной формы и соответствующего приближения к практическим условиям. Также аналитически можно выполнить анализ температурных полей в стержнях для плит с заданным интервалом толщин.

Если теперь на реальных отливках с широким диапазоном геометрических параметров [66-67] провести экспериментальные температурные замеры, то представляется возможным, во-первых, проверить результаты теоретических расчетов, во-вторых, уточнить расчетные методы и в-третьих, определить границы их применения с учетом сделанных допущений.

Термостойкость формовочных смесей со смолами при изготовлении крупных отливок - одна из наиболее сложных и мало изученных проблем в технологии литейной формы. Однако существует определенная аналогия между термостойкостью смесей и термо­стойкостью полимеров, которой посвящен специальный раздел полимерной химии.

В химии полимеров термостойкостью называется предельная температура, при которой происходит химическое измене­ние полимера, отражающееся на его свойствах. Более точным, по-видимому, является определение термостойкости как предельной температуры, при которой начинается термическая или термохимическая деструкция полимера [68].

Для формовочной смеси со смолами определения термостойкости, принятые в химии полимеров, должны быть существенно расширены. Традиционные полимеры, как правило, длительное время эксплуатируются при невысоких (до 300 °С) температурах, и по условиям их эксплуатации не допускаются существенные химические изменения материала. Именно это обстоятельство и отражено в определении термостойкости. Формовочная смесь, напротив, эксплуатируется короткое время при весьма высоких температурах и ее термостойкость как физическое по­нятие должна быть отражением этих условий.

Аналогичная проблема решается и в области химии полимеров. Так, например, при оценке термостойкости высокомолекулярных соединений необходимо учитывать не только максимальную температур, при которой существенно не ухудшаются определенные свойства материала, по и время выдержки при этой температуре, а также кинетику нагрева полимера.

В принципе аналогичными свойствами обладают синтетические смолы, применяемые в литейном производстве для стержней и форм крупного литья. Все они в отвержденном состоянии представляют собой термореактивные полимеры, неплавкие и нерастворимые. Как уже указано, это свойство необходимо, так как оно обеспечивает общую устойчивость смеси против давления металла. Термореактивные свойства литейных смол обусловлены наличием у них трехмерной, пространственно сшитой структуры. С химической точки зрения высокая термостойкость объясняется наличием в структуре смол шестичленных или пятичленных (фурановые смолы) циклов с высокой концентрацией углеродных атомов в каждом структурном звене полимера.

Проведённые исследования подтверждают наличие прямой связи строения и термостойкости смол. Наименее термостойки смолы, не содержащие в своем звене ароматических циклов; повышение термостойкости связано с ростом концентрации атомов в структуре. С другой стороны, сравнение коксовых чисел позволяет дать предварительный прогноз о возможности применения тех или иных классов полимеров как литейных связующих.

Важная роль кокса в сопротивлении формы воздействию жидкого металла определяется тем, что он в отличие от исходного полимера может существовать некоторое время при температурах до 3000 °С. Таким образом, имеет место принципиальное соответствие между условиями нагрева формовочной смеси и свойствами связующего.

В работах по термостойкости полимеров исследованы общие закономерности термического распада и карбонизации циклических, пространственно сшитых полимеров горячего отверждения и показано, что кинетика деструкции, состав газообразных продуктов, количество образующегося кокса и его свойства зависят от свойств исходных полимеров - степени сшивки молекулярных цепей, химического строения, наличия примесей катализаторов и других условий отверждения, а так­же от условий нагрева - скорости и температуры [69].

Исследование изменения плотности во времени в зависимости от приложенной нагрузки изучали в серии экспериментов. Каждые тридцать секунд в течение всего времени формирования дисперсной среды определялась плотность смеси. Эти эксперименты показали, что вначале формирования оболочки ее плотность значительно повышается. Это связано с удалением внутрипорового воздуха из объема смеси и более компактной упаковкой песчинок и частиц нерасплавленной смолы под действием приложенного статического давления. Дальнейшее увеличение плотности происходит незначительно и связано с расплавлением и твердением смолы, заполняющей оставшиеся поры между песчинками. Длительное термическое воздействие на ППС приведет к выгоранию смолы и, как следствие, к разуплотнению. Подобное распределение плотности во времени наблюдается при любой степени уплотнения, использованной при экспериментах.

Образцы были исследованы на прочность на сжатие после полного отверждения. Время отверждения составляет 24 часа. Прочность смеси на сжатие через 24часа составил 3.2 МПа.

Проведена серия экспериментов по определению влияния высоты засыпки смеси в наполнительную рамку (опоку) на прочностные свойства оболочки (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Зависимость плотности от величины прилагаемой нагрузки

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № опытов | Плотность, кг/м3 | Прилагаемая нагрузка, МПа | Начальная плотность |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1  2  3  4  5 | 1420  1560  1690  1740  1790 | 0  0,1  0,2  0,3  0,4 | Насыпная плотность 1400 кг/см3 |
| Продолжение таблицы 4.4 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6  7  8  9  10 | 1520  1630  1780  1790  1805 | 0  0,1  0,2  0,3  0,4 | Насыпная плотность 1500 кг/см3 |
| 11  12  13  14  15 | 1310  1530  1705  1880  1900 | 0  0,1  0,2  0,3  0,4 | Насыпная плотность 1300 кг/см3 |

Эксперименты показали, что в пределах наполнительной рамки высота засыпки не оказывает существенного влияния на свойства оболочковой формы вследствие небольшой высоты столба ХТС (таблица 4.5). За исключением высоты засыпки, близкой к толщине оболочки. Высоту заполнения смесью определяли по самой высокой точке модельной плиты. Давление, при котором происходило образование оболочки – 0,30 МПа.

Таблица 4.5 – Экспериментальные данные

|  |  |
| --- | --- |
| Высота засыпки ХТС в опоку, мм | Прочность на разрыв оболочки, МПа |
| 20 | 4,3; 4,2; 4,1 |
| 40 | 4,9; 4,8; 4,3 |
| 60 | 5,3; 4,6; 4,4 |
| 80 | 5,4; 4,9; 4,5 |
| 100 | 5,4; 4,9; 4,6 |

Таким образом, содержание связующего в ХТС – основной показатель состава, определяющий уровень прочностных характеристик стержней и форм, качество отливок, санитарно-гигиенические характеристики процесса и его технико-экономическую эффективность [61].

В данном разделе обосновывается результаты исследования формы на физико-механические и технологические свойства.

Допустим, при заливке металла форма не должна разрушаться, также она должна противостоять давлению и тепловому воздействию заливаемого металла. Так же при эксплуатационных действиях форма должна сохранить свои геометрические параметры.

В соответствии литературными данными, прочность при сжатии форм обычно составляет σ=2,1-5,5 МПа [70]. Для проверки прочности форм были исследованы 10 образцов (рисунок 4.5) форм из ХТС (таблица 4.6).

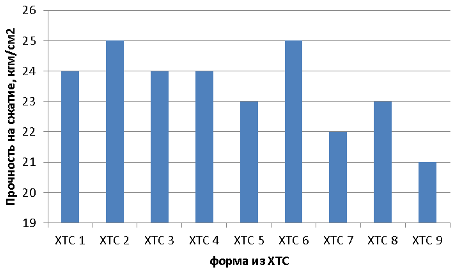


Рисунок 4.5 – Сравнение прочности на сжатие разных образцов из ХТС

Таблица 4.6 – Прочность на сжатие форм из ХТС

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название формы | Прочность на сжатие через 18 ч, МПа | Прочность на сжатие через 24 ч, МПа |
| ХТС 1 | 4,1 | 4,3 |
| ХТС 2 | 4,2 | 4,5 |
| ХТС 3 | 4,2 | 4,5 |
| ХТС 4 | 3,9 | 4,4 |
| ХТС 5 | 4,0 | 4,5 |
| ХТС 6 | 4,1 | 4,5 |
| ХТС 7 | 3,9 | 4,3 |
| ХТС 8 | 4,1 | 4,4 |
| ХТС 9 | 4,1 | 4,5 |
| ХТС 10 | - | - |

Надо отметить, что разработанный оптимальный состав холоднотвердеющей смеси используется только в сухом виде. Для сушки в комнатной температуре (20-25°С) требуется 18-24 ч.

По графику можно отметить, что высокая прочность из предложенных форм свойственно форме из ХТС. ХТС в сыром виде не применяют в работе, так как в составе имеются химические вещества как отвердитель, что может вызвать реакцию с заливаемым металлом. По сравнению с остальными видами форм холодно-твердеющие формы гарантирует сохранность геометрических параметров формы, и ее можно использовать повторно. Кроме того, для получения форм из ХТС не требуется отдельного помещения, и снизит трудоемкость на 50%. Данные приведены в экономической части.

4.2.3 Исследование влияния состава ХТС на осыпаемость

Осыпаемость – это склонность разрушения поверхностного слоя формы. Исследования на осыпаемость проводились лабораторной барабанной машине. Подготовлены три образца диаметром 50 мм. И в течение 1 мин каждый образец по отдельности был расположен на барабан машины диаметром 100\*100 мм для проверки осыпаемости. Барабан покрыта сеточными ячейками 2,5\*2,5 мм. Оборот барабанной машины составляет 60 об/мин. Измеряли массу образца до и после выкрутки в барабане. И в разнице массы можно увидеть, чему равна осыпаемость образцов. Изначальная масса форм разная, так как применялись разные связующие. Например, в ПГС связующим является вода, которая при сушке может испариться. Та же вода в меньшем количестве использовалась в ЖСС, но в контакте с жидким стеклом она приобретает другую формы. Образец их ХТС является легким, так как смола с отвердителем после сушки становится легкой. Все образцы были в сухом виде. Данные приведены на таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Показатели осыпаемости образцов из ХТС

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Название формы, D=50 мм | Масса образца до выкрутки в барабане, г | Масса образца после выкрутки в барабане, г | Единица потерянной массы, г | % показатель осыпаемости |
| ХТС 1 | 90 | 80 | 10 | 12 |
| ХТС 2 | 90 | 82 | 8 | 9 |
| ХТС 3 | 90 | 82 | 8 | 9 |
| ХТС 4 | 90 | 80 | 10 | 12 |
| ХТС 5 | 90 | 80 | 10 | 12 |
| ХТС 6 | 90 | 81 | 9 | 10 |
| ХТС 7 | 90 | 81 | 9 | 10 |
| ХТС 8 | 90 | 79 | 11 | 13 |
| ХТС 9 | 90 | 80 | 10 | 12 |

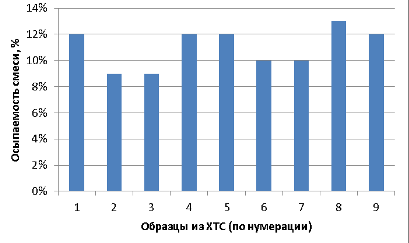


Рисунок 4.6 – Сравнение осыпаемости разных образцов из ХТС

Судя по результатам анализа (рисунок 4.6), можно сделать вывод, что образцу №2 и № 3 из ХТС свойственно наименьшая осыпаемость. Данные образцы были получены с добавлением глины Месторождения Карасор, содержание глины в образце №2 составляет 3,5%, а в образце №3 – 5%. Это качество положительно влияет при производственной работе по получению отливок, то есть готовой отливке не понадобятся большие механическо-корректировочные работы для отделения остатков формы от отливки.

Наибольшую потерю массы формы показал ХТС-8, что свойственно данной форме. Также при выбивке она может легко разрушится. Поэтому в производстве в основном используют одноразовые сырые формы из ПГС.

4.2.4 Исследование технологических свойств форм из ХТС

В этом разделе рассматривается газопроницаемость песчано-глинистых форм и форм из холодно-твердеющих смесей. По литературным данным газопроницаемость обозначается буквой К, и для песчано-глинистых форма она равна от 0 до 120 единиц.

В расплавленных металлах всегда имеются растворенные газы, и во время его отвердевания нужно, чтобы эти газы вышли наружу. В противном случае отливка выйдет некачественным, ей будут свойственны разные браки, как газовые усадки, поры и т.д.

Газопроницаемость напрямую зависит от фракции песка и давления на форму, на прилагаемую силу при трамбовке. Были подготовлены четыре образца. Два образца из песчано-глинистой смеси с разной фракцией песка (125 и 250 мм), остальные два образца из холодно-твердеющей смеси с фракцией песка 125 и 250 мм. Имеющиеся готовые образцы поочередно исследовались на специальном «приборе для определения газопроницаемости компрессорного типа (таблица 4.8), без колокола 04315М (Россия) и были получены следующие результаты.

Таблица 4.8 – Газопроницаемость форм из ХТС

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Название формы, Д=50 | Давление, МПа | Газопроницаемость, ед. | Среднее газопроницаемость формы, ед. |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| ХТС 1 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 80  82  82  80  80 | 80,8 |
| ХТС 2 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 81  82  82  83  83 | 82,2 |
| ХТС 3 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 82  82  81  80  80 | 81 |
| ХТС 4 | 0,1  0,2  0,3  0,4 | 80  81  81  79 | 80 |
| Продолжение таблицы 4.8 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
|  | 0,5 | 79 |  |
| ХТС 5 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 79  81  81  80  80 | 80,2 |
| ХТС 6 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 79  81  81  79  79 | 79,8 |
| ХТС 7 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 80  81  81  79  79 | 80 |
| ХТС 8 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 79  78  78  79  79 | 78,6 |
| ХТС 9 | 0,1  0,2  0,3  0,4  0,5 | 79  78  78  77  78 | 78 |

По принципу действия прибора, то есть он основан на измерении давления, который создается компрессором, а он в свою очередь связан с прохождением воздуха через образец. Можно сделать вывод, что тем меньше фракция песка, тем ниже газопроницаемость у образца. Также чем больше содержание глины, тем ниже газопроницаемость смеси. Поэтому газопроницаемость ХТС незначительно отличается, а именно ниже, чем в образцах ПГФ. Это объясняется тем, что, связующие материалы как эпоксидная смола с отвердителем, способствуют на непрохождение газов. Для этого в формах ХТС специально делают лишние несколько отверстии.

Согласно полученным образцам, оптимальным составом был выбран содержание глины от 8-10%. Для проверки этого предположения были проведены исследования влияния состава смеси с использованием ХТС на некоторые ее свойства.

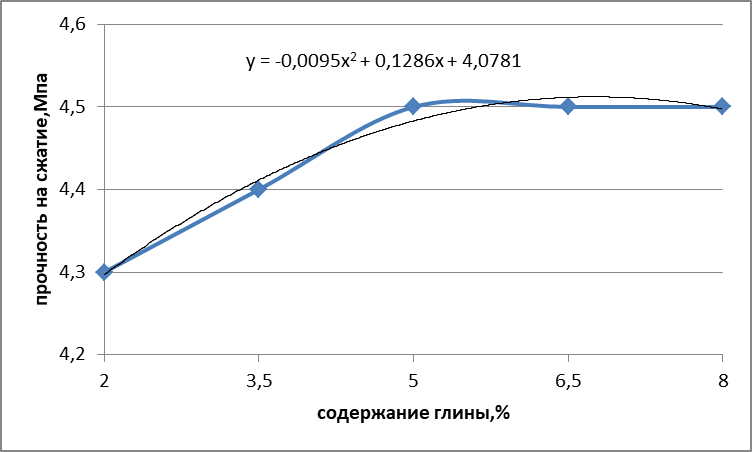
Смесь готовили следующим образом. В лопастной смеситель загружали огнеупорный наполнитель (кварцевый песок) и высокодисперсный наполнитель (глина) и перемешивали в течение 5-10 минут. Затем добавляли ортофосфорную кислоту, предварительно разбавленную водой до плотности 1,5-1,6 г/см3, и перемешивали еще 5-10 минут. При изготовлении смеси количество компонентов варьировалось, составы смесей приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Состав исследуемых смесей, %

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Номер смеси | Эпоксидная смола ЭД-20+ ОП 921 | Глина месторождения Карасор | Кварцевый песок, (70 %- 250 мкм +30%-125 мкм) |
| 1 | 1,5 | 2 | 98,5 |
| 2 | 1,5 | 3,5 | 95 |
| 3 | 1,5 | 5 | 93,5 |

Из готовой смеси готовили образцы для определения прочности на сжатие, живучести, газопроницаемости и осыпаемости. Прочность на сжатие определяли на приборе ИНСТРОН, на осыпаемость - на приборе ПП-1100 (02212), газопроницаемость - на приборе Р04315-М по общепринятым методикам. Живучесть смеси определяли каждые 30 минут в течение 3 часов. При этом под живучестью понималось минимальное время, в течение которого падение прочности составляет более 30%. Результаты исследования представлены на рисунке 4.7.

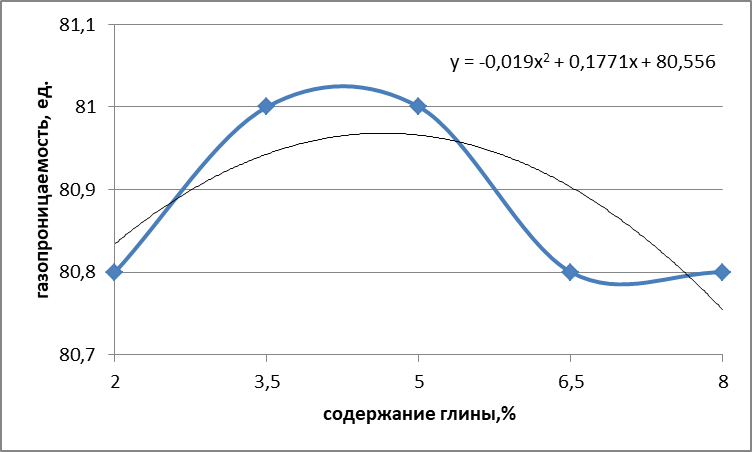
Как видно из приведенного ниже рисунк4.7, увеличение количества глины в пределах 2-5% положительно сказывается на таком показателе, как прочность смеси, но увеличение количества глины свыше 5% практически не влияет на прочность. При этом падают такие показатели, как осыпаемость и газопроницаемость смеси, живучесть. По требованиям к заданным параметрам прочность на сжатие должна быть не менее 4,5 МПа после 18-часовой выдержки; газопроницаемость более 75 единиц (рисунок 4.7б); осыпание менее 15 % (рисунок 4.7в), живучесть - не менее 10 часов (рисунок 4.7г).



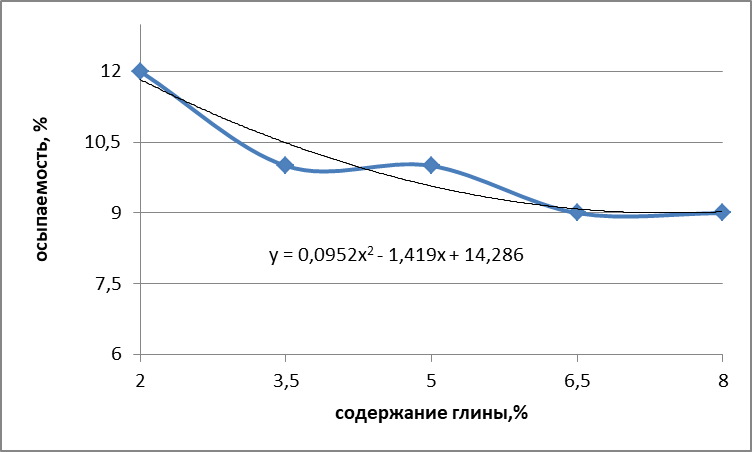
а

a – изменение прочности на сжатие

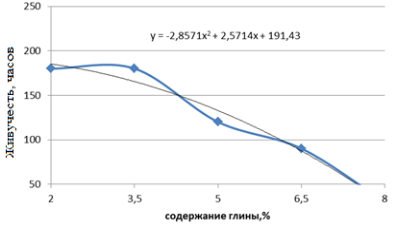
Рисунок 4.7 – Изменение свойств в зависимости от содержания глины, лист 1



б



в



г

б – изменение газопроницаемости; в – изменение осыпаемости; г – изменение живучести

Рисунок 4.7, лист 2

Сравнительный анализ полученных результатов при минимальных требованиях к свойствам, предъявляемым к ХТС, позволяет сделать следующий вывод. Содержание глины в составе ХТС в пределах 2-8% обеспечивает необходимые показатели смеси в пределах нормы [71].

Дальнейшее увеличение количества глины в смеси нецелесообразно, так как увеличение более 7-8% практически не влияет на прочность, но при этом значительно снижает такие показатели, как газопроницаемость и осыпаемость, что приводит к удорожанию смеси и экономически нецелесообразно. Уменьшение количества глины ниже нижнего предела (3,0%) также нежелательно, так как создаваемой контактной поверхности будет недостаточно для активного взаимодействия реагентов, что приводит к ухудшению прочностных показателей.

**4.3 Исследование теплопроводности форм из ХТС**

Перед выполнением исследований по определению теплопроводности представим теплопроводность каждого составляющего холоднотвердеющей смеси (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Данные о теплопроводности связующих материалов ХТС

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Состав | % содержание | Коэффициент теплопроводности | % содержание | Коэффициент теплопроводности |
| Песок | 97 | 0,796 | 95 | 0,796 |
| Глина | - | - | 3,5 | 1,3-1,5 |
| Смола эпоксидная | 3 | 0,20 | 1.5 | 0,20 |

Одним из важных необходимых качеств формовочного песка или глины является их огнеупорность. При недостаточной огнеупорности материала зёрна его, соприкасаясь с жидким металлом, размягчаются и привариваются к отливке, образуя термический пригар. Понижение огнеупорности формовочной смеси может быть вызвано, например, влиянием примесей, сплавляющихся с песком или глиной. При заливке металла в сырую песчаную форму часть тепла расходуется на испарение влаги формы, что ускоряет теплоотдачу и увеличивает скорость затвердевания отливки. С целью регулирования скорости охлаждения отливки в формовочную смесь добавляют специальные компоненты с повышенной или пониженной теплопроводностью.

**Теплофизические свойства** смесей определяют теплообмен отливки и формы, от которого зависит скорость затвердевания, а, следовательно, и структура отливок, и их механические свойства, а также время выбивки отливок. Кроме того, от теплообмена отливки с формой зависит глубина прогрева формы, от которой, в свою очередь, зависит потеря активности компонентами смеси и необходимое их освежение (восстановление технологических свойств).

Фенолформальдегидные смолы из-за отсутствия в них соединений серы и фосфора не провоцируют зависимого от них брака по горячим и холодным трещинам.

Примерами теплопередачи могут служить: передача теплоты от греющей воды к воздуху помещения через стенки нагревательных батарей центрального отопления, передача теплоты от дымовых газов к воде через стенки кипятильных труб в паровых котлах и т.д. Во всех рассматриваемых случаях стенка служит проводником теплоты и изготавливается из материала с высокой теплопроводностью. В других случаях, когда требуется уменьшить потери теплоты, стенка должна быть изолятором и изготавливаться из материала с хорошими теплоизоляционными свойствами [72].

Далее по формуле Ньютона-Рихмана [73] количество теплоты, передающееся горячим теплоносителем к стенке на образце получения струбцины:

Q=α1F (t1-tcт) (4.2)

где α1 - коэффициент теплоотдачи от горячего носителя, то есть от заливаемого металла,

t1 – постоянная температура горячего носителя, то есть температура металла равна 1600 °С.

F - расчетная поверхность плоской стенки, м2 (расчетная поверхность плоской стенки полости модели):

α= (4.3)

где λ - теплопроводность материала, то есть стали, она равна 47 Вт/м\*град

δ – толщина стенки формы, в данной работе составляет 10 см.

Для уменьшения расхода смолы целесообразно предварительно перемешивать песок с глиной, затем высушивать до влажности 0,2-0,4% и после этого вводить смолу с отвердителем.

Коэффициент теплопроводности смеси при влажности 2% -0,512 Вт/м Со;

– при влажности 10% - 0,629 Вт/м Со;

Поэтому для хорошей теплопроводности данной экспериментальной смеси влажность должна быть 0,3% - 0,25 Вт/м Со.

В лабораторных условиях были проведены исследования по определению теплопроводности (рисунок 4.8а). Для исследований были применены 6 образцов из ХТС с разным соотношением глины, один образец из ПГС (рисунок 4.8б). Образцы подогревали до определенного градуса и с помощью термометра измеряли температуру нагревания в определенном времени.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.016\IMG_9769.jpg | C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.340\IMG_9773.jpg |
| а | б |

а – процесс подогревание образцов; б – образцы после подогревания

Рисунок 4.8 – Лабораторные исследования по определению теплофизических свойств образцов из ХТС

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.536\IMG_9776.jpg | C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.188\IMG_9775.jpg |
| а | б |
| C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.495\IMG_9778.jpg | C:\Users\User\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.495\IMG_9778.jpg |
| в | г |

а – образец без глины; б – образец с 2 % глиной; в – образец ХТС с 3,5% глиной; г – образец ХТС с 5% глиной

Рисунок 4.9 – Образцы ХТС с разным количеством глины после подогревания

Данные по другим образцам из ХТС приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Результаты исследования теплопроводности форм из ХТС в лабораторных условиях на базе НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Образец | Достижение определенной температуры по времени | | | | | |
| 2 мин | 4 мин | 8 мин | 10 мин | 12 мин | Более 12 мин |
| ХТС 1 (без глины) | 100°С | - | - | - | - | Полное разупрочнение формы |
| ХТС 2 (2% глины) | 100°С | 200°С | - | - | - | Полное разупрочнение формы |
| ХТС 3 (3,5% глины) | 100°С | 200°С | 300°С | 400°С | 500°С | Форма держит твер дость, температура повы шается |
| ХТС 4 (5% глины) | 100°С | 200°С | 300°С | 300°С | 400°С | Форма твердая, темпер тура не меняется (про держали 13 мин) |
| ХТС 5 (2% глины, фракция песка 250 мкм) | 100°С | 200°С | 300°С | 300°С | 300°С | Форма твердая, темпера тура не меняется (про держали 16 мин) |
| ХТС 6 (3,5% глины, фракция песка 250 мкм) | 100°С | 200°С | 300°С | 300°С | 300°С | Форма твердая, темпера тура не меняется (про держали 17 минут) |

**4.4 Рентгенофазовый анализа форм из ХТС**

Для исследования фазового состава образцов был выбран метод РФА. В данном методе используются дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке порошка.

Для проведения исследование один из образцов был измельчен на наномельнице Emax (Retsch, Германия), 2015 г.

Измельчение проводилось в течение 5 минут при амплитуде 1000.

Метод РФА был проведен на дифрактометре Empyrean (PANalytical, Голландия), 2015 г. п. Данный вид оборудования дает возможность получит качественный и количественный состав образца.

Далее с помощью программы HighScore Plus были выявлены фазы.

При заливке и затвердевания сплава форма должна обладать высокими качествами как, прочность, газопроницаемость, жидкотекучесть. На жидкотекучесть формы определенное влияние оказывает отсутствие засоров, осыпаемости смеси, которые в свою очередь определяются твердостью формы. В данной таблице рассмотрены несколько образцов с разными составляющими. Как мы видим, твердость во многих образцах очень низкая, так как твердость по стандарту должна превышать 80 единиц. Определение твердости проводилось твердомером для сырых форм, стержней модель 04421 № 295. Качество поверхности формы также влияет на низкую шероховатость поверхности. Шероховатость поверхности формы показан на рисунке 4.10.

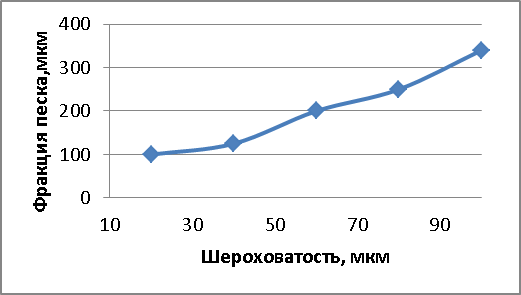


Рисунок 4.10 – Шероховатость поверхности образца из ХТС

в зависимости от фракции песка

Поэтому для проведения дальнейших работ был выбран следующий состав: кварцевый песок – 93,5%, фракция песка – 250/125 (70:30) мм, глина каолинитовая – 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5% (образец №3).

Образец сушился при комнатной температуре в течение 18-24 часа. При таком режиме зернистая основа смеси получает наиболее прочное и равномерное соединение посредством связующего. Это в свою очередь обеспечивает ровную поверхность формы. Форма с низкой шероховатостью способствует повышенной жидкотекучести заливаемого в нее сплава, поскольку поток жидкого металла в таком случае при условии равномерной заливки в литниковую чашу не имеет завихрений и носит характер ламинарного движения. Так как, мы рассматриваем литье тонкостенных отливок, такое свойство, как жидкотекучесть играет большую роль в данном виде литья.

Измельчение проводилось в течение 5 минут при скорости 1000 об/мин.

Для проведения фазового состава образцов ХТС был выбран метод рентгенофазового анализа. Метод РФА был реализован на дифрактометре Empyrean (PANalytical, Голландия). Используемый метод дает возможность выявить качественный и количественный состав образцов. В дифрактометре применяется метод томографического сканирования, что позволяет исследовать образцы в любой плоскости и отображает внутреннюю структуру в трехмерном диапазоне. Измерение проводилось при комнатной температуре с пошаговым сканированием.

Далее при обработке результатов с помощью программы HighScore Plus в образце №3 (кварцевый песок – 93,5%, фракция песка – 250/125 (70:30) мкм, глина каолинитовая – 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем -1,5%) были выявлены 400 фаз (рисунки 4.11, 4.12).

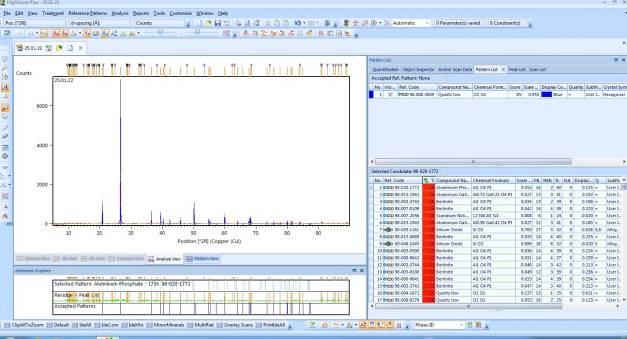


Рисунок 4.11 – Результаты РФА, программа HighScore Plus (образец №3)

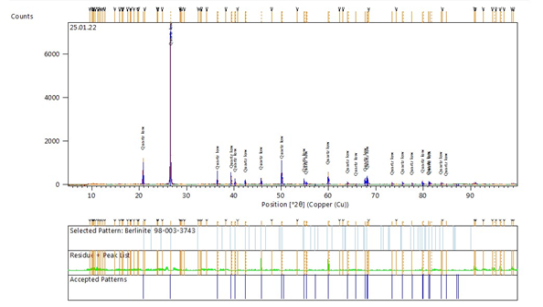


Рисунок 4.12 – Спектр рентгеновских лучей в порошкообразном виде образца ХТС (показаны пики фаз, образец №3)

Примечание – Пики кварцевого песка

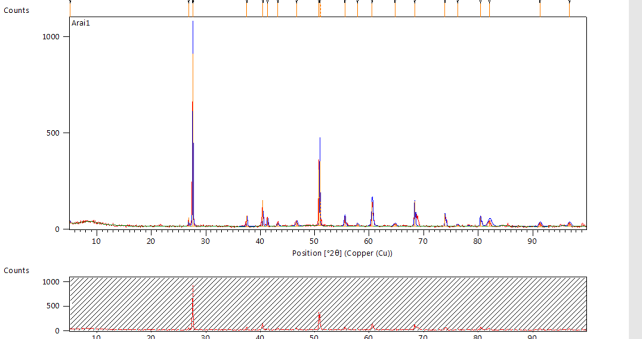


Рисунок 4.13 – Спектр рентгеновских лучей в порошкообразном виде образца ХТС после подогревания

В соответствии с рисунком 4.13, как показывает анализ дифрактограммы моносоставов и комплексных минеральных композиций, наиболее распространенными составляющими песка являются кремнезем (SiO2), обычно в виде кварца, который из-за его химическая инертности и значительной твердости, устойчив к выветриванию. Состав песка очень разнообразен в зависимости от местных источников горных пород и условий. В результате РФА анализа показывает 85% с химической формулой SiO2, что и соответсвует стандартному обозначению кварцевого песка (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Фаза Quartz low

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Compound Name | Chemical formula | Score | Scale |
| Quartz Low | O2Si | 85 | 0.955 |

Таблица 4.13 – Результаты РФА на программе HighScore Plus (образец №1)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Compound Name | Chemical formula | Score | Scale |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Aluminium Phosphide | Al1 O4 P1 | 16 | 0.05316 |
| Aluminium Gallium | Al0,75 Ga0,25 O4 P1 | 16 | 0.027 |
| Berlinite | Al1 O4 P1 | 16 | 0.034 |
| Scandium Nickel | C2 Ni0,83 Sc1 | 14 | 0.008 |
| Aluminium Gallium | Al0,58 Ga0,42 O4 P1 | 13 | 0.027 |
| Berlinite | Al1 O4 P1 | 12 | 0.036 |
| Sodium Dioxoco | Co1 Na0,75 O2 | 5 | 0.016 |
| Holmium Manganese | Ga1 Ho1 Mn1 | 2 | 0.323 |
| Terbium Gallium | Ga1,17 Si0,83 Tb1 | 2 | 0.026 |
| Продолжение таблицы 4.13 | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Manganese Germfn | Ge1 Mn1 10.250 | 2 | 10.250 |
| Erbium Tris | H3 Er1 O12 S3 | 1 | 0.018 |
| Ytterbium Silver | Ag0,28 Si1,72 Yb1 | 1 | 0.025 |
| Jeremejevite | H3 Al6 B5 O18 | 1 | 0.015 |
| Hydrodresserite | C2 H10 Al2 Ba1 O13 | 1 | 0.023 |
| Jeremejevite | H3 Al6 B5 O18 | 1 | 0.015 |

Следующий компонент в составе смеси – эпоксидная смола с отвердителем. В исследуемом образце этот вид связующего составляет 5%. Формовочная смесь, в составе которого применялась эпоксидная смола, обладает высокими диэлектрическими свойствами после отверждения, химической стойкостью механической прочностью. Она подверждается в программе также множеством разных элементов (таблица 19). Из основных можно отметить позиция 56, 57, 61 (C12H32Li2O2Pt1, C2Y13Cu2N1J11S2, C8H32Co1N2J32) и тд. Данные элементы соответсвуют составляющим эпоксидной смолы согласно стандарту.

Так же авторы исследовали другой образец. В составе следующего образца (образец №2) добавили каолнитовую глину казахстанского месторождения. Выявленные позиции фаз приведены в рисунке 5.

Глина из месторождения Карасор представляет собой коалинитовую глину. Так как глина является связующим материалом, она должна равномерно распределяться по смеси. Состав глины в смеси составляет 5 %. В составе содержится оксид кремния, оксид алюминия, что и подверждается результатом РФА (таблица 4.14).

Таблица 4.14 – Результаты РФА на программе HighScore Plus (образец №2)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № образца | Compound Name | Chemical formula | Score | Scale |
| 56 | Dilithium Tetram | C12 H32 Li2 O2 Pt1 | 1 | 0.898 |
| 57 | Tetrakis(dimethyl oxide) | C2 H13 Cu2 N1 O11 S2 | 1 | 0.217 |
| 58 | Cordierite | Al4 Mg2 O18,45 | 1 | 0.391 |
| 59 | Dilithium Tungsten | Li2 O4 W1 | 1 | 0.084 |
| 60 | Dioxonium hexacyanidoferrate | H14 Br14 O6 W6 | 1 | 0.041 |
| 61 | Bis-tetramethyl hydroxypiperidinyl | C8 H32 Co1 N2 O32 | 1 | 0.545 |

В позиции 2 и 6 образовались новые фазы Al 0,75Ga0,25O4P1. Галий в составе фазы не встречается в природе в чистом виде. Эти элементы образовались при контакте глины и эпоксидной смолы. Данное соединение относится к группе алюминийорганических соединений. Количество составляет 0,027% от общего состава. При достижении необходимой концентрации реагирующих веществ на поверхности галлия появляется явление поверхностного натяжения, от чего из-за постоянной смены количества полученных веществ капля жидкого металла приобретает способность к «пульсации» [74].

Анализы РФА были получены путем исследования двух образцов в течение 1 часа.

Обнаруженные в результате РФА образца №2 новые фазы в соответсвии с литературными данными и проведенными лабораторными экспериментами [64] имели положительную оценку на прочность. В результате обеспечения высокой прочности и низкой осыпаемости смеси достигается низкая шероховатость поверхности формы, что в свою очередь положительно влияет на жидкотекучесть, как было отмечено выше.

Как показывает анализ дифрактограммы моносоставов и комплексных минеральных композиций, можно сделать выводы. Как мы видим из рисунка- 2, 3 программа автоматический выявил фазу кварцевого песка содержанием в 85% или в масштабе 0,955 с химической формулой SiO2, что и соответсвует стандартному обозначению кварцевого песка.

Далее в составе образца были выявлены около 400 фазовых превращии, что в итоге выдало и 100%.

После проведения исследовательских работ можно сделать следующие выводы по применению комплексного связующего в формах из ХТС:

1. Обеспечивается высокая размерная точность отливки вследствие равномерной повышенной прочности и низкой осыпаемости формы ХТС.

2. Потребность на механическую обработку отливок снижается, так как формы обеспечивают высокую размерную и геометрическую точность.

3. Энергозатраты на чистку и окончательную обработку отливок так же уменьшаются, так как форма обеспечивает низкую шероховатость отливок и отсутствие пригара на ее поверхности.

После исследования образцов с помощию РФА анализа были изготовлены формы из ХТС (смола+глина) согласно составу образца №3. Также для сравнения была подготовлена форма из ПГС и ХТС только со смолой. Для заливки была выбрана сталь Ст30.

После приготовления смеси определяли ее технологические и физико-механические свойства: прочность на сжатие (сырая смесь), прочность на разрыв (сухая смесь), газопроницаемость и влажность. Для определения работы выбивки была разработана специальная технологическая проба. Формы использовались для получения отливок с толщиной стенки 5, 10, 15, 20 мм. В таблицах 4.15, 4.16 приведены результаты проведенных экспериментов.

Таблица 4.15 – Удельная работа на выбивку

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Толщина стенки отливки, мм | Удельная работа, затраченная на выбивку (Ауд’=Ai/Mст), Дж/г | |
| базовая смесь (ХТС только со смолой) | исследуемая смесь (ХТС смола+глина3,5 %) |
| 5 | 0,54 | 0,19 |
| 10 | 0,51 | 0,14 |
| 15 | 0,50 | 0,11 |
| 20 | 0,49 | 0,09 |

Таблица 4.16 – Технологические свойства исследуемых смесей

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Свойства смеси | Базовая смесь (ХТС только со смолой) | Исследуемая смесь (ХТС смола+глина) |
| Прочность на сжатие (сырая), МПа 10-1 | 0,18 | 0,26 |
| Прочность на разрыв (сухая), МПа | 2,9 | 3,4 |
| Газопроницаемость, ед | 140 | 250 |
| Влажность, % | 5 | 5 |

В результате проведенных исследований установлена принципиальная целесообразность использования комплексных добавок, улучшающие свойства ХТС. Сочетание глины и эпоксидной смолы в ХТС существенно улучшает ее прочность и ровную поверхность.

Создавая на поверхности частичек песка термостойкую адгезивную оболочку, способную деформироваться с увеличением температуры, повышается податливость формы, что в свою очередь, снижает вероятность образования литейных дефектов. Наиболее эффективное снижение работы выбивки формы наблюдается при содержании глины 5%, что объясняется оптимальным соотношением количества глины и связующего (эпоксидной смолы). В зависимости от толщины стенки экспериментальной отливки, работа выбивки сокращается в 3-4 раза.

Таким образом, применение связующих как смола и глина в комплекте в ХТС обеспечивает повышение технологических свойств литейной формы и снижают энергозатраты на ее дальнейшую выбивку.

Сталь марки СТ35Л является литейной сталью, имеет невысокие прочностные качества. Температура плавления 1280°С, по литературным данным температура заливки для тонкостенных деталей должна превышать 80 градусов от температуры плавления. Так как отливка является маленькой и весит 10 кг в одну опоку были помещены 4 деталя. Была изготовлена отливка детали «труба», имеющая толщину стенки 3 мм, то есть являеющаяся тонкостенной отливкой (рисунки 24, 25).



Рисунок 4.13 – Изготовление тонкостенных отливок в формах из ХТС



Рисунок 4.14 – Труба после очистки в барабанной решетке

Примечание – Диаметр - 15 мм, высота -50 см, толщина стены - 3 мм

Производственные работы проводились в литейном цеху ТОО «КМЗ им. Пархоменко» (Караганда).

Как было отмечено ранее, шероховатость является важным показателем в тонкостенных деталях, так как работа по очистке поверхности вызывает повышенную себестоимость. Для оценки качества отливок было выполнено размер шероховатости, результаты приведены ниже.

Замеры шероховатости были получены на приборе TR220. Исследования показали, что разница между шероховатостью поверхностей формы и отливки составляет 40 мкм (рисунок 23). Очевидно, что увеличение шероховатости полости формы приводит к снижению чистоты поверхности отливки. Большая шероховатость в полости литниковой системы обусловлена наличием в ней шлаков.

**4.5 Исследование микроструктуры опытных образцов**

В результате лабораторных испытаний получили несколько образцов ХТС (рисунок 4.15). Структура образцов были исследованы на оптическом микроскопе Altami с увеличением х100.

По результатам научных исследований были получены несколько образцов ХТС. В 6 образцах были применены эпоксидная смола. Исследования данных образцов ХТС на оптическом микроскопе показывают, что наличие глины повышает соединение зерновой основы. Расстояние между частицами кварцевого песка (зерен) при использовании только смолы значительно больше, чем в случае применения добавки глины.

В образце 2 и 3, что меньший диаметр песка дает более уплотненную конфигурация, а это в свою очередь влияет на чистоту поверхности. Как известно, шероховатость поверхностей отливок зависит от шероховатости стенок литейных форм, величины зерен формовочной смеси, плотности ее набивки и других факторов [75].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а | б | в |
|  |  |  |
| г | д | е |

а –- Образец №1. Фракция песка – 125 мм; 1,5% эпоксидная смола с отвердителем; б – образец №2. Фракция песка - 250 мм; 5% глина; 1,5% эпоксидная смола с отвердителем; в – образец №3. Фракция песка - 125 мм; 5% глина; 1,5% эпоксидная смола с отвердителем; г – образец №4. Фракция песка - 125 мм, глина - 3,5%; 1,5% эпоксидная смола с отвердителем; д – образец №5. Фракция песка - 250 мм; 3,5% глина; 1,5% эпоксидная смола с отвердителем; е – образец №6. Фракция песка -250/125 мм; 3,5% глины; 1,5% эпоксидная смола с отвердителем

Рисунок 4.15 – Структура образцов из ХТС

Исследования образцов на оптическом микроскопе показали, что наличие глины повышает соединение зерновой основы. Расстояние между частицами песка при использовании только смолы значительно больше, чем в случае применения добавки глины. Меньший диаметр песка дает более уплотненную конфигурация, а это в свою очередь влияет на чистоту поверхности.

Для дальнейшей работы в производстве предлагается применять фракции песка 250/125 мкм (70:30), как на образце 6, в зерновые основы очень хорошо соединены. Это в свою очередь обеспечивает ровную поверхность формы. Форма с низкой шероховатостью пропорционально высокой жидкотекучести сплава. Так как, мы рассматриваем литье тонкостенных изделий, такое свойство, как жидкотекучесть играет большую роль в данном виде литья.

**Вывод по разделу**

1. Определено, что ХТС с менее, чем 3,5% глины не отверждается самостоятельно при комнатной температуре. Для этого требуется использование углекислого газа. Использование более 3,5% приводит к увеличению времени на затвердевание на воздухе, что не рентабельно в условиях производства из-за снижения производительности. Следовательно, наиболее оптимальным с точки зрения времени достижения отверждения является состав ХТС с 3,5% глины.
2. Для получения образцов из ХТС применяли глины трех месторождении: Карасор (Павлодарская область), Алексеевское (Акмолинская область), Белое Глинище (Карагандинская область) (рисунок 13). Данные глины отличаются по цвету, консистенции. Размер частиц составляет ˂ 0,022 мм.
3. Изготовлено 10 образцов с разным соотношением связующих материалов: ХТС 1: глина месторождения Карасор - 2%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 96,5; ХТС 2: исследования проводимые глина месторождения Карасор - 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А – 95%; ХТС 3 - глина месторождения Карасор - 5%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 93,5; ХТС 4 глина месторождения Алексеевское - 2%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 96,5; ХТС 5 глина месторождения Алексеевское - 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5%, кварцевый песок 1К02А – 95%; ХТС 6 - глина месторождения Алексеевское - 5 %, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 93,5; ХТС 7 глина месторождения Белое Глинище - 2%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 96,5; ХТС 8 глина месторождения Белое Глинище - 3,5%, эпоксидная смола с отвердителем-1,5 %, кварцевый песок 1К02А – 95%; ХТС 9 - глина месторождения Белое Глинище - 5%, эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 93,5; ХТС 10 - эпоксидная смола с отвердителем - 1,5%, кварцевый песок 1К02А - 98,5.
4. Исследования по влиянию состава твердость показали, что глина месторождения Карасор дает высокие показатели образцов по твердости (68-70 ед.).
5. Разная кинетика роста прочности в смесях обусловлена разным соотношением адгезионного и когезионного взаимодействия глины и смолы с частицами песка. На ранних стадиях затвердевания (первые 3 часа) прочность смеси со связующим месторождения Алексеевское значительно выше, чем глин месторождении Карасор и Белое Глинище. Аналогичное явление наблюдается при измерении пределов прочности смесей. Однако при упрочнении смесей с глиной месторождения Карасор их прочность становится выше и через сутки достигает нескольких МПа.
6. Увеличение количества глины в пределах 2-5% положительно сказывается на таком показателе, как прочность смеси, но увеличение количества глины свыше 5% практически не влияет на прочность. При этом падают такие показатели, как осыпаемость и газопроницаемость смеси, живучесть. По требованиям к заданным параметрам прочность на сжатие должна быть не менее 4,5 МПа после 18-часовой выдержки; газопроницаемость более 75 единиц; осыпание менее 15%, живучесть - не менее 10 часов.

**5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК**

**5.1 Расчет литниковой системы для отливки «Струбцина»**

Технологический процесс получения отливок в ПГФ и ХТФ очень схожи, то есть они состоят из трех частей: подготовительная часть, основная и заключительная часть [76].

К подготовительной части относятся выполнения работ по подготовке наполнителя, связующих материалов, опоки и модели. Выделим последовательно все работы по подготовительной части:

– для литья была выбрана деревянная модель струбцины для прижима крышки элеватора;

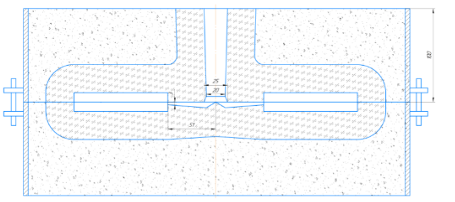
– были подготовлены стандартные металлические опоки габаритом 400\*400\*100 мм. В одной опоке расположили 2 модели с литниковой системой

– был подготовлен состав песчано-глинистой формы: песок кварцевый, глина бентонитная (соотношение глина-песок – 1/20), вода.

– был подготовлен состав ХТС формы согласно разработанному оптимальному составу: песок кварцевый месторождения Карасор, глина бентонитная месторождения Карасор -3,5% от общей массы смеси и эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем ПЭПА – 1,5% от общей массы смеси.

– были подготовлены шихтовые материалы для выплавки: отходы листового металла (Ст3), возврат стального лома, трубы, металлоконструкции из углового проката и т.д.

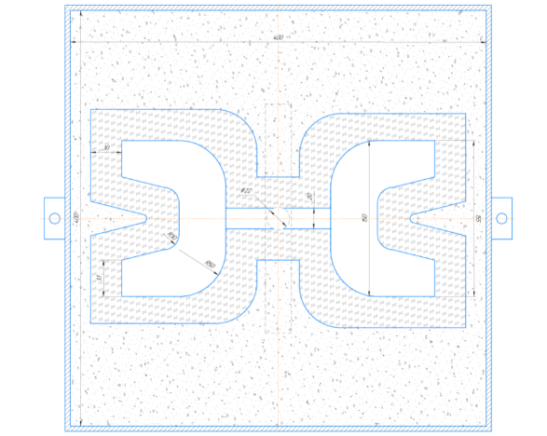
К основной части относятся работы по получению отливок. Для выплавки была подобрана конструкционная среднеуглеродистая литейная сталь 35Л. Сталь выплавляли в дуговой сталеплавильной печи ДСП -1,0. Основными элементами ДСП является рабочее пространство, образованное огнеупорной футеровкой. Температура плавления металла составила 1550ºС. Схема технологии получения отливок с применением формы из ХТС представлены на рисунке 5.1.



а – схема расположения модели в опоке, вид с боку

Рисунок 5.1 – Схема технология получения отливок

с применением формы из ХТС, лист 1



б

б – Схема расположения модели в опоке, вид сверху

Рисунок 5.1, лист 1

**5.2** **Проведение опытно-промышленных работ по получению тонкостенной отливки в ТОО «КМЗ имени Пархоменко»**

Для эксперимента, были использованы формы, имеющие различные характер материалов и связующих для ее изготовления: форма из ХТС (холодно - твердеющая смесь) (рисунок 5.2). В формы, производилась заливка металла с температурой 1600ºС.

Заключительная часть состояла в получении тонкостенных отливок из стали 35Л, отливка – струбцина, которая должна была обладать повышенным качеством поверхности и улучшенной микроструктуры. Условия и время затвердевания соответствовала стандарту от 40 до 60 минут при нормальных условиях (рисунок 5.2а, 2.5б).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |

а – вид сверху; б – вид с боку

Рисунок 5.2 – Форма из ХТС



а – полученная с применением смеси ХТС (3,5 % глины); б – полученная с применением смеси ХТС (5 % глины)

Рисунок 5.3 – Готовые отливки - струбцина

Для исследования микроструктур образцов были выполнены все этапы получения шлифов, то есть получения ровной поверхности, полировка и шлифовка. Шлифы обрабатовались на шлифовально-полировочном станке Laboforce (рисунок 5.4).



а – полученная с применением смеси ХТС (3,5 глины); б – полученная с применением смеси ХТС (5% глины)

Рисунок 5.4 – Струбцины механически очищенные в галтовочном барабане

Тонкостенные отливки полученные на ХТС (5%) имели поверхностную газовую пористость, во внутренних слоях образцов обнаружены несплошности в виде мелких газовых пустот (рисунок 5.5).



Рисунок 5.5 – Шлифы из стали 35Л, полученняе на формах

ХТС (3,5 %) и ХТС (5%)

Также на образцах, представленных на рисунке 5,6а можно наблюдать, грубую шероховатую поверхность отливки, вследствии спекания частиц формы с металлом при затвердевании, что является устранимым дефектом, но дополнительно повышают себестоимость литых изделий, за счет дополнительной механической обработки.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |

а – на поверхности - мелкие многочисленные газовые поры; б – газовые раковины, находящиеся в полости токостенной отливки

Рисунок 5.6 – Тонкостенные отливки полученные на формах

из ХТС (5% глиной)

На рисунке 5.7а, в продольном разрезе образца выявлены усадочные раковины, образовашиеся вследствие усадки при затвердевании металла, что подтверждает повышенное газообразование литейных форм из песчано-глинистых смесей [76].



а



б

а – отливка, изготовленная на форме из ХТС (глина 5 %) в разрезе; б – отливка, изготовленная в форме из ХТС (глина 3,5 %) в разрезе

Рисунок 5.7 – Тонкостенные отливки

В представленных рисунках, можно увидеть разницу в разрезе двух отливок, изготовленных в формах из разных смесей. На рисунке 5.8а видно, что при выплавке образовалаись большое количество глубоких газовых раковин, в на отливке, изготовленной в форме из ХТС (5% глиной) (рисунок 5.8б) их практический нет. Данные газовые раковины сидят очень глубоко, в некотырх местах даже в доль стенки отливки, что отрицательно влият на качество всей отливки в целом. Именно эти места могут подвергаться ломке при их эксплуатации. Данный вид дефекта является грубой ошибкой, который недопустимы в производстве отливок.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |

а – отливка, полученная с применением смеси ХТС (3,5% глиной) – на поверхности отливки не обнаружена грубо затвердевшая корка, газовые поры визуально не обнаруживаются; б – отливка, полученная с применением смеси ХТС (5% глиной) – характерная грубодисперсная корковая поверхность, с незначительной частью мелких газовых пор

Рисунок 5.8 – Поверхность отливок

В данном разделе уделяется внимание тонкостенным отливкам, (толщина стенок составляет 4 мм), так как особую роль в точности размеров и качестве поверхности тонких стенок играет качество формы и свойства компонентов входящих в форму. Состав ХТС в значительной степени влияет на шероховатость отливок, а точнее - размер зерен песка. По вышепредставленным рисункам 5.6, 5.7, 5.8, можно отметить, что определенный, оптимально выбранный состав ХТС1, положительно отразился на качестве поверхности – шероховатость поверхности отливки составила Rz=60 по сравнению с ХТС2, которая составила Rz=15. Предположительно этот факт объясняется тем, что смола в составе ХТС1, находящаяся в определенном процентом ее содержании, заполняет пустоты, которые всегда будут присутствать при получении формы ХТС и которая в последствии сыграет роль в получении хорошей чистоты поверхности и качества (рисунок 5.8).

Процентное содержание связующего и отвердителя в ХТС – основной показатель состава, определяющий уровень прочностных характеристик форм и стержней, а также качество отливок, санитарно-гигиенические характеристики процесса и его технико-экономическую эффективность.

Очевидно, что минимальный расход смолы с учетом получения необходимых технологических параметров позволит снизить себестоимость формы и литья в целом. Минимально возможный расход связующего определяется качеством применяемого песка. В эксперименте использовалась добавка с 2-3 % глин казахстанских месторождений. Желательно применение обогащенных песков с содержанием глинистой составляющей не более 0,5% и с зернистостью не менее зернистости песка марки 1К02А.

Микротвердость шлифов была проверена на твердомере Виккерса согласно ГОСТ 2999-75 и ISO 6507 Металлы и сплавы [77]. Измерение твердости по Виккерсу. Параметры при измерении твердости соответствовали стандарту - нагрузка составляла - 20 кГс, время выдержки 15 секунд.

Микротвёрдость образцов, полученная в холодно-твердеющей форме (предлагаемый состав формы – 3,5% эпоксидной смолы, 5% глины) составила 192,2 HV, в то время как отливка, полученная в песчано-глинистой форме, микротвердость образца составила 175,3 HV (рисунок 5.9).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а | б |

Рисунок 5.9 – Отпечаток на приборе Виккерс

Микротвердость отливки соответствует стандарту ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007, пункт 7.2. Металлы и сплавы.

Сравнения измерений микротвёрдости двух образцов показывает, что состав смеси также вносит изменения в показатели механических свойств, ранее были отмечены различия в микроструктуре образцов, т.е. дисперсности фаз была различной.

**5.3 Исследование микроструктуры стальных образцов**

Согласно ГОСТ 2789-84 обозначение классов чистоты поверхностей, типом направлений неровностей поверхности устанавливается - «произвольное» [78].

Образцы из стали 35Л, полученные в формах с добавкой смолы, были исследованы до травления и после травления на оптическом микроскопе Altami (Германия). Поверхности образцов были протравлены спиртовым раствором 3% азотной кислоты HNO3 (рисунок 5.10). Неметаллические включения в стали сравнивались с использованием эталонной шкалы ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79) «Металлографические методы определения неметаллических включений» [79].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а | б | в |

а – образец, полученный в форме с добавлением эпоксидной смолы до травления – отсутствие микропор, локализованные в назначительном количесве неметаллические включения сульфидного характера; б – микроструктура образца полученного в форме с добавлением эпоксидной смолы после травления – мелкоигольчатое строение феррита, равномерно распеределенного, отсутствие грубовыделившихся избыточных пластин феррита; в – микроструктура образца полученного в песчано-глинистой форме; ферритная фаза проявляется в виде грубых выделившихся пластин (видманштеттова структура), а также игольчатого строения феррит

Рисунок 5.10 – Микроструктура в разрезе поверхности образцов из литой стали 35Л, полученной с добавлением эпоксидной смолы (увеличение х500)

В результате проведенных исследований (рисунок 5.10), образцов тонкостенной отливки из стали 35Л, полученных в ХТС формах с определенным процентным соотношении компонентов и добавок формы, входящих в ее состав, можно сделать следующие выводы:

1. Шероховатость поверхности образца, полученного с ХТС, с добавлением глины имела Rz = 60 мкм; шероховатость в ХТС без глины имеет Rz =15 мкм.

2. Форма ХТС обеспечивает достаточно высокое качество поверхности отливки, исключает образование газовых раковин, пустот и образование пригара из-за медленного охлаждения расплава.

3. Исходя из пунктов 1 и 2 получение отливок с добавлением смолы (ХТС) позволяет снизить припуски на механическую обработку до 0,15 мм, а это 7-8 класс точности согласно ГОСТ 26645-85 [80].

4. Микроструктура образцов из литой стали 35Л также имеет отличительный характер: образец, полученных в ХТС форме имеет феррито-перлитную структуру с неявно выраженным видманштеттовым распределением избыточных пластин феррита, в сравнении с образцом, полученным в ХТС без глины форме. В ХТС без глины форме ферритная фаза проявляется в виде грубых выделившихся пластин (видманштеттова структура), а также игольчатого строения феррит.

5. Ферритная сетка в обоих образцах обнаруживается и расположена по границам бывших аустенитных зерен. Такое различие в строении образовавшихся фаз литой стали после ее затвердевания исключает необходимость использования высокотемпературной нормализации (950-9700С) в образце, полученным в ХТС форме.

6. Образование видманштеттовой структуры связано, прежде всего, со скоростью охлаждения жидкого металла и величиной переохлаждения в момент распада аустенита, можно утверждать, что структура образца, полученная с применением глины 3,5% (ХТС1), обладает более однородной и дисперсной структурой. Дисперсное строение фаз объясняется, тем, что отвод тепла из формы ХТС происходит медленнее и соответственно кристаллизация металла идет также более медленно (низкая степень переохлаждения, и как следствие, более дисперсные продукты распада аустенита) [76].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| а | б | в |

а – ХТС 1- 3,5% глины, 1,5% ЭС+ОП 80% кварцевый песок (увеличено 100Х); б – ХТС 2 - 5% глины, 1,5% ЭС+ОП 93,5% кварцевый песок (увеличено 100Х); в – ХТС 3 – 1,5% ЭС+ОП 98,5 % кварцевый песок (увеличено 100Х)

Рисунок 5.11 – Структуры отливок, полученных с применением ХТС

Структура образца, представленная на рисунке 5.11а более мелкое зерно и более однородную микроструктуру с равномерным распределение ферритных и перлитных составляющих по сравнению со структурой тест-образцов, представленных на рисунке 5.11б, 5.11в. Металл образца на рисунке 5.5а имеет Ф+П структуру с элементами видманштеттовой структуры. Микроструктура образца на рисунке 5.5б с обеих поверхностей на глубину примерно 4-5 мм имеет мелкозернистую структуру, характерную для стали после отжига. Размер зерна соответствует группе G 7-9 (шкала ГОСТ 5639-82) [81] со средним условным диаметром зерна 0, 0268 мм для G «7», 0,0195 мм для группы G «8» и 0,0137 мм для группы G «9».

Дисперсность перлита проводилась на ПО Thixomet. В образце на рисунке 5.11, а, дисперсность (измельченность пластинчатого перлита) по ГОСТу 8233-84 [82] балл 3, что подтверждает мелкую дисперсность, в образце на рисунке 5.11б дисперсность понизилась балл 5, в образце на рисунке 5.5в – грубые пластины феррито-цементитной смеси - 8 балл.

В центральной части образца рисунке 5.11а – также имеется неявно выраженная видманштеттова структура с наличием ферритных зерен, имеющих неправильную оскольчатую форму, (балл 1, шкала 4, ряд А по ГОСТ 5640-68) [83].

В центральной части образца рисунке 5.11б – ярко выраженная видманштеттова структура с грубыми пластинами избыточной фазы – феррита (балл 5, шкала 4, ряд Б по ГОСТ 5640-68), в образце рисунка 5.5в – ярко выраженная видманштеттова структура с массивными пластинами и иглами избыточной фазы – феррита, причем феррит выделился в виде изолированной, отдельной фазы, так и с иглами, отходящими от грубой ферритной сетки и расположенными внутри зерен (балл 5, шкала 4, ряд Б).

**5.4 Точность и чистота поверхности тонкостенных отливок, 3D моделирование**

Геометрическая точность отливки характеризуется соответствием ее чертежным размерам, точностью конфигурации, чистоты поверхности. Улучшение любого из перечисленных факторов повышает геометрическую точность отливок, однако они играют различную роль при определении качества деталей. Так, если для обычного машиностроительного литья главным является размерная точность детали. То для ряда других специальных отливок, испытывающие при работе значительные динамические нагрузки, большое значение имеет качество литой поверхности, непосредственно влияющее на прочность. Особенно тонкостенных отливок. Для отливок типа винтов, лопастных колес не менее важным является точность конфигурации, особенно в случаях, когда теоретический контур не подвергается в дальнейшей механической обработке.

Также имеются тонкостенные панельные отливки, как типы дверцы автомобиля, панелей холодильников и т.д., для которых вполне достаточно сохранить размерную точность. Наряду с этим к целому ряду панельных отливок (например, в авиастроении) предъявляются серьезные требования по точности размеров, особенно в связи с жесткими допусками на массу, и по чистоте поверхности и точности расчетных профилей.

Следует подчеркнуть, что повышенная геометрическая точность не только улучшает качество отливки, оцениваемое конкретными эксплуатационными свойствами, но и во многих случаях определяет стоимость литья. Некоторое удорожание технологического процесса литья для повышения геометрической точности часто с лихвой окупается за счет уменьшения припусков на механическую обработку, причем величина припуска на обработку лимитируется не только возможностью обеспечить ту или иную размерную точность при разных технологических процессах литейного производства, но и погрешностями, возникающими в дальнейшем при механической обработке деталей с искаженной геометрией. Например, точность установки заготовки на металлорежущем станке, при базировании от черной поверхности, для отливки, полученной литьем под давлением, в 5-6 раз выше, чем для отливки, изготовленной в песчаной форме даже при условии машинной формовки.

Аналогично этому и чистота поверхности (шероховатость), с одной стороны, может влиять на механические свойства тонкостенных отливок, с другой - определять внешний вид изделия.

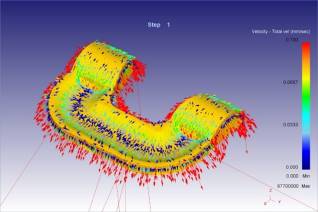
Существуют также и определенные требования [84] к поверхности с точки зрения нанесения качественного лакокрасочного покрытия на необрабатываемые части детали.

Геометрическая точность зависит от большого числа разнообразных факторов, начиная от точности изготовления модели, выбора материала формы до параметров заливки жидкого металла в форму.

Следует иметь ввиду, что к различным поверхностям одной и той же панельной отливки могут быть предъявлены различные требования по чистоте. Например, часто лицевая сторона отливки должна иметь достаточно чистую (в пределах 4 5-го класса чистоты) поверхность, в то время как внутренняя сторона может не иметь допуска на чистоту поверхности. Однако часто и к наружным и к внутренним поверхностям отливки предъявляются высокие требования по чистоте. Следует отметить, что чистота поверхности тонкостенных деталей определяет во многих случаях не только товарный вид, но и влияет на механические свойства и на прочность отливки в целом.

Практически заданная чистота поверхности панельных отливок достигается соответствующим выбором формовочной или стержневой смеси, окраской песчаной или металлической формы, плотностью набивки, температурой заливки расплава в форму.

При небольшой доводке чистота поверхности может быть улучшена до 4, а на отдельных участках отливки до 5-го класса чистоты.



а

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\Downloads\PHOTO-2023-01-13-14-31-21.jpg | C:\Users\User\Downloads\PHOTO-2023-01-13-14-36-05.jpg |
| б | в |

Рисунок 5.12 – Результаты моделирования отливки на ПО ProCast

В соответствии с рисунком 5.12, после получения отливки «Струбцина», она была проверена на прочность с помощью программы «ProCast».

В целом, конструкция остается достаточно жесткой (рисунок 38). Максимальное движение составляет около 0,1 мм, что не особо критично, по напряжениям. Нагружаются в большей степени внешние ребра, но незначительно для данного материала (4-5МПа) [6].

Данная отливка работает в обычной среде при температуре 15-20°С. Работает при напряжении 200 Н/м. Так как струбцина предназначена для прижима крышки элеватора.

**Выводы по разделу**

В результате проведенных исследований, образцов тонкостенной отливки из стали 35Л, полученных в ХТС формах с определенным процентным соотношении компонентов и добавок формы, входящих в ее состав, можно сделать следующие выводы:

1. Шероховатость поверхности образца, полученного в ХТС, с добавлением глины 3,5% имела Rz = 65 мкм; шероховатость в ХТС без глины имеет Rz =14 мкм.

2. Форма ХТС обеспечивает достаточно высокое качество поверхности отливки, исключает образование газовых раковин, пустот и образование пригара.

3. Исходя из пунктов 1 и 2 получение отливок с добавлением смолы (ХТС) позволяет снизить припуски на механическую обработку до 0,15 мм, что соответствует 7-8 классу точности отливок согласно ГОСТ 26645-85.

3. Микроструктура образцов из литой стали 35Л также имеет отличительный характер: в ХТС с добавлением 3,5-5% глины форме ферритная фаза проявляется в виде грубых выделившихся пластин (видманштеттова структура), игольчатого строения феррит, а образец, полученный в ХТС форме имеет феррито-перлитную структуру без выраженного видманштетта (избыточных пластин феррита не просматривается).

4. Ферритная сетка в обоих образцах обнаруживается и расположена по границам бывших аустенитных зерен. Такое различие в строении образовавшихся фаз литой стали после ее затвердевания исключает использование высокотемпературной нормализации (950-970°С) в образце, полученным в ХТС форме.

1. Образование видманштеттовой структуры связано, прежде всего, со скоростью охлаждения жидкого металла и величиной (степенью) переохлаждения в момент распада аустенита, можно утверждать, что структура образца, полученная с применением смолы (ХТС), обладает более однородной и дисперсной структурой. Дисперсное строение фаз объясняется, тем что, форма ХТС с добавлением глины 3,5-5% имеет в сравнении с формой ХТС без глины меньшую степень переохлаждения, скорость роста кристаллов проходит медленнее, и как следствие это ведет к образованию более мелкого строения продуктов распада аустенита.
2. По результатам моделирования с помощью программы ProCast структура полученной отливки соответствует данному виду работы, так как «Струбцина» предназначена для работы в постоянном напряжений. Конструкция остается достаточно жесткой. Максимальное движение составляет около 0,1 мм, что не особо критично, под напряжением. Нагружаются в большей степени внешние ребра, но незначительно для данного материала (4-5МПа).

**6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ ХТС**

В данном разделе диссертации произведен расчет для сравнения экономических показателей отливок, полученные на формах ХТС базового и нового состава. Для этого приведены следующие показатели: в одной опоке будут расположены 2 струбцины, 1 формовщик может сформовать 4-5 опок в час. А время от подготовки печи, т.е. загрузки шихты, проверки механизмов до разливки занимает 1,5 часа. Емкость печи 1 тонна. Данные механизмы одинаковы для всех форм. Разница следует в расходе материалов.

Таблица 6.1 – Расход материалов для формы из ХТС 1

|  |  |
| --- | --- |
| Наименования материалов | Масса в %/опока |
| Песок кварцевый марки К120316 | 95 |
| Глина бентонитная, месторождения Карасор | 3,5 |
| Смола ЭП-20 | 1 |
| Отвердитель ПЭПА/ОП-920 | 0,5 |

Таблица 6.2 – Расход материалов для формы из ХТС 2

|  |  |
| --- | --- |
| Наименования материалов | Масса в %/опока |
| Песок кварцевый марки К120316 | 93,5 |
| Глина бентонитная, месторождения Карасор | 5 |
| Смола ЭП-20 | 1 |
| Отвердитель ПЭПА/ОП-920 | 0,5 |

Таблица 6.3 – Материальные расходы

|  |  |
| --- | --- |
| Наименования материалов | Цена тг/единицу |
| Песок кварцевый | 450 тг/кг |
| Глина бентонитная | 280 тг/кг |
| Смола эпоксидная | 1000 тг/литр |
| Отвердитель (ОП) | 700 тг/литр |

Таблица 6.4 – Расходные данные в час для форм из ХТС

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название материалов | ХТС 1 | ХТС 2 |
| Песок кварцевый марки 1К02А | 45000 | 45000 |
| Глина бентонитная, месторождения Карасор | 2800 | 4200 |
| Смола ЭП-20 | 7000 | 10500 |
| Отвердитель ПЭПА/ОП-920 | 1400 | 3150 |
| Итого: | 56 200 | 62 850 |

Использую данные в таблицах 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 можно рассчитать материальные расходы для изготовления тонкостенной отливки «струбцина».

Берем как основу, что в 1 час можно сформировать 5 опок. На одну опоку (для формирования струбцины) понадобится 20 кг песка. И далее рассчитаем материальные расходы для всех типов форм.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\User\Desktop\отливка\41545213.jpg | C:\Users\User\Desktop\отливка\PHOTO-2022-10-27-10-09-12.jpg |
| а | б |

а – ХТС-1 (3,5% глины); б – ХТС-2 (5 )

Рисунок 6.1 – Отливки после затвердевания

В соответствии с рисунком 6.1 как показали исследования, отливки полученные в формах из ХТС 2 больше подвергается механической обработки, также имеют значительное количество браков, что может вызвать обратное формирование опок, а следовательно дополнительные расходы на материалы.

В случае получения отливок из ХТС 1 очистка от смеси не требуется, так как практика доказала, что отливки выходят с глянцевой поверхностью, без лишних пригоревших участков. Виды брака указаны на таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Сравнение видов брака в отливках, полученных на формах ХТС с разным содержанием связующих

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Вид брака | Литьё в ХТС 1  (глина 3,5%), % | Литьё в ХТС 2  (глина 5%), % | Литье в ХТС 3  (без глины), % |
| Уход металла в разъём формы | 1,1 | 1,4 | 1,7 |
| Разностенность | - | 1,0 | 1,3 |
| Обвал (формы) | 0,2 | 0,7 | 0,5 |
| Засор | 0,1 | 0,3 | - |
| Вскип | 0,1 | 0,2 | - |
| Газовые поры | 1,0 | 1,4 | - |
| Газовые раковины | 1,0 | 1,4 | - |

Изготовление одной отливки по параметрам ХТС-1, 2 составляет ≈ 526 тенге. Данная стоимость рассчитана без других дополнительных затрат, как вспомогательные материалы, налоги, тарифы на электроэнергию, оплата труда работников, и дополнительной механической обработки.

Полная себестоимость товара [85] рассчитывают следующим образом:

С= С + Э +А+ПР (6.1)

где С - сырье, в данной работа расходные материалы, связующие;

Э - услуги электроэнергии;

А – амортизация.

ПР – прочие расходы, в данном случае могут быть дополнительные механические работы по очистке отливок от формовочной смеси, от отпечаток литниковой системы

Себестоимость данной отливки составляет:

526+105,6+ 311,2+105,6=1154 тенге (6.2)

Данная сумма указана на одну отливку с учетом работы одного работника в течение 1 часа работы (таблица 6.4).

Таблица 6.4 – Себестоимость отливок

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название формы | Себестоимость отливки, тенге | Получение качественной отливки в процентах |
| ХТС - 1 | 1154 | 95% |
| ХТС - 2 | 1256 | 85% |

Изготовление данных отливок с применением фурановых или формальдегидных смол в разы повышает затрату, так как требуется отдельное помещение для формовки, усиленная вентиляция в силу токсичного запаха, и дополнительные затраты на покупку углекислого газа и его применения, что приведет к большей потребности энергии, не говоря об оборудовании, выполняющие данные функции.

Так как в данный момент в Казахстане высоко поднят вопрос об экологии для производств, необходимо соблюдать санитарно-гигиенические нормы, так же оборудовать предприятия современными комплексами приборов, например вентиляционных, оборудования для регенерации использованной формовочной смеси для уменьшения выброса загрязнений в окружающую среду. Использование до настоящего времени фурановые и формальдегидные смолы имеют высокие классы токсичности, то заменяется эпоксидной смолой в данной работе.

Тем не менее импорт тонкостенных отливок существенно влияет на экономику страну, чем собственное производство. Например, по данным коммерческих предложений иностранных предприятий стоимость 1 штуки струбцины составляет от 17 до 26 тысяч тенге. Тогда как собственное производство одной струбцины с применением ХТС составило в среднем 1200 тенге (без учета ЗП и налога работников) (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Сравнение материальных расходов импорта и собственного производства

**Выводы по разделу**

Применение 3,5% глины и 1,5% смолы является экономический выгодным. Большее количество связующих материалов имеет не только высокие цены, но и не даст качественную продукцию, следовательно, производство уйдет в убыток по причине непригодных отливок.

1. Замена фурановых и формальдегидных смол по результатам экономических анализов так же является выгодным, так как формы из данных видов смол готовятся с помощью продувки углекислым газом, что требует дополнительные затраты, как электроэнергия, фильтрационные аппараты, оборудования или помещения для продувки. Несмотря на это при производстве отливок должны соблюдаться все санитарно-гигиенические нормы, техника безопасности и т.д.
2. Использованные формы подвергаются регенерации, для этого требуются дополнительные механические процессы и оборудования, что позволит данному процессу иметь ресурсберегающую характеристику. Регенированную смесь можно использовать для изготовления строительных материалов, так как при выплавке эпоксидная смола полностью испаряется.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основании проведенного исследования сделаны следующие **выводы:**

* проведен анализ состояния вопроса в области применения составов и способов для производства тонкостенных отливок с использованием ХТС. В настоящее время в странах СНГ применяют фурановые и формальдегидные смолы для получения холодно-твердеющих смесей. Также данные составы имеют продувку углекислым газам. В литературных данных встречается использование смол аминных групп, к которой и относится эпоксидная смола. Выбор отвердителей для определенных смол в 80-90-х годах исследовался. А в настоящее время при покупке смолы отвердитель идет в комплекте. То есть подходящие отвердители уже выбраны. В работе применяется эпоксидная смола (диановая) марки ЭД-20 и отвердитель ПЭПА ОП-921. Кроме того, в современном мире эпоксидная смола имеет большую потребность не только в промышленных условиях, но и в строительстве, и в быту. Поэтому цены на эпоксидную смолу является приемлемы. С другой стороны, эпоксидная смола имеет низкий уровень токсичности в сравнении с фурановыми, формальдегидными и т.д., также не требует дополнительных процессов для сушки, как продувка углекислым газом. Отверждается она в комнатной температуре в течение 18-24 часов;
* исследованы составы и свойства казахстанских глин различного минерального состава для выбора добавки в комплексное связующего. Для работы были выбраны три вида глины такие как, бентонитная (Карасор), огнеупорная (Белое Глинище) и каолиновая (Алексеевское) из трех месторождении Республики Казахстан. По себестоимости данные глины особо не отличаются, но по характеру по-разному влияют на состав смеси. Из всех глин по разным содержаниям были получены образцы в лабораторных условиях, и для дальнейшей работы был выбран бентонитная глина месторождения Карасор, так как в производство поставка уже имеется (налажено), кроме того, как показали исследования, данная глина имеет высокую связующую способность, и огнеупорность составляет до 1700°С. Предел прочности на сжатие 24 кгс/см2, твердость - 80 единиц, осыпаемость не более 8%;
* определен технологический режим, влияющих на свойства холодно-твердеющих форм и отливок. Получение ХТС похож на формовку формы из ПГС. То есть наполнителем является песок кварцевый марки 1К02А, первым связующим является глина месторождения Карасор. Глину заранее перемешиваем с водой для набухания (на 100% глины добавляем 2 % воды). В последнюю очередь добавляем жидкую часть связующего: эпоксидная смола ЭД-20 и отвердитель ОП-921. Данные связующие заранее перемешиваются 2:1. Полученную смесь перемешиваем вручную в лабораторных условия, в производстве это происходило в специальных смесителях. Далее процесс идет как в формовке в ПГС.;
* определен состав ХТС, для изготовления бездефектных тонкостенных отливок, с положительными физико-механическими свойствами: песок кварцевый марки 1К02А -95 %, глина бентонитная месторождения Карасор - 3,5%, Эпоксидная смола марки ЭД+ отвердитель ОП-1,5%. Все образцы были исследованы на твердость – 80 единиц, осыпаемость -8%, предел прочности на сжатие- 81 единиц, газопроницаемость – 81 единиц, живучесть – до 250 часов после отверждения. Были составлены зависимости для сравнения физико-механических качеств, прочность: y=-0,0095х2 +0,1286х+4,07; газопроницаемость: у=-0,0019х2+0,17х+80,5; осыпаемость: у=0,0952х2-1,419х+14,28; живучесть: у=-2,8571х2+2,517х+1,91;
* исследованы влияния различных факторов на свойства форм в лабораторных условиях; проведены расчеты и исследования в лабораторных условиях, расчеты в програме PoligonSoft на теплопроводность смеси. Были проведены расчеты методом вероятностного детерминированного эксперимента для опреления коэффициента теплопроводности. Была использована шестифакторная матрица экспериментов на пяти уровнях, в которой три фактора – вакантные. Установлено эмпирическое уравнение для определения коэффициента теплопроводности : λХТС=(0,015ρэпок2+0,061ρэпок+1,928)(0,002ρглина2+0,028ρглина+1,919)(0,019ρвлага2+0,001ρвлага +1,978);
* получена опытная партия образцов отливок в ТОО «КМЗ им. Пархоменко», исследованы свойства опытных образцов. Так как конечным итогом процесса является отливка, в формах из предложенных трех составов были получены тонкостенная отливка «струбцина». Далее были исследованы макроструктура и микроструктура отливок. Данные приведены в главе 5. Структура отливок также были анализированы с помощью программы Thixomet. По данным структурам и проведенным исследованиям на физико-химические свойства можно сделать вывод, что состав ХТС1 -3,5% глины, 1,5% ЭС+ОП, 95 % кварцевый песок является оптимальным, так как в отливках полученных в формах ХТС-2 и ХТС-3 имеюся большое колическво браков визуально, кроме того структура является неоднородным, что повлияет на эксплауатационные свойства детали. Полученная отливка прошла испытание в ТОО «Сантехпром», также был виртуально испытан в программе ProCast. Все испытания дали положительные результаты;
* по итогам проделанной работы была разработана технологическая карта по получению ресурсосберегающей технологии получения тонкостенных стальных отливок с применением холодно-твердеющей смеси с комплексными связующими (Приложение Е).

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1 Президент Республики Казахстан К.-Ж. Токаев. Справедливое государство. Единая нация. Благополучное общество: послание народу Казахстана от 1 сентября 2022 года // <https://adilet.zan.kz/rus/docs>. 10.02.2023.

2 Исагулов А.З., Ибатов М.К., Куликов В.Ю. и др. Органические связующие композиции холодного отверждения под действием жидких катализаторов и отвердителей // Тр. КарТУ. – 2020. – №4. – С. 37-41.

3 Жуковский С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справоч. – М., 2010. – 256 с.

4 Жданова Е.Н. Проблемы экологической безопасности предприятий металлургии // Интеграция науки и производства. – 2019. – №6. – С. 184-189.

5 Крутилин А.Н., Гуминский Ю.Ю., Русевич О.А. и др. Повышение эффективности использования жидкостекольных смесей // Литье и металлургия. – 2018. – №4, ч. 4. – С. 38-44.

6 Алина А.А., Ковалев В.П. Точность и чистота поверхности тонкостенных отливок // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации (Сагиновские чтения №15): тр. междунар. науч.-практ. конф. – Караганды, 2023. – Ч. 3. – С. 16-18.

7 Мельников А.П., Кукуй Д.М., Черапович А.В. Производство крупных стальных тонкостенных отливок для грузовых железнодорожных вагонов с использованием современных литейных технологий // Литье и металлургия. – 2008. – №4(48). – С. 71-77.

8 Мартыненко С.В., Огородникова О.М., Грузман В.М. Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок // Литейное производство. – 2009. – №11. – С. 21-26.

9 Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М., 2005. – 327 с.

10 Левчук В.В., Трапезников А.В., Пентюхин С.И. и др. Способы литья тонкостенной детали из алюминиевого сплава типа силумин // Тр. ВИАМ. – 2018. – №6(66). – С. 30-38.

11 Леушин И.О., Грачев А.Н., Леушина Л.И. и др. Модельное представление о поведении жидкоподвижной самотвердеющей смеси при производстве тонкостенного стального литья // Теория и технология металлургического производства. – 2021. – №4(39). – С. 13-18.

12 Постановление Правительства Республики Казахстан. О проекте Указа Президента Республики Казахстан "Об утверждении Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015-2019 годы": утв. 9 июня 2014 года, №627 // <https://adilet.zan.kz>. 10.05.2021.

13 Статистика целей устойчивого развития в Казахстане, 2022 год // <https://stat.gov.kz/ru/sustainable-development-goals/publications/>. 20.090.2023.

14 Круглов Е.П., Галимов Э.Р., Аблясова А.Г. и др. Выбор и способы изготовления заготовок для деталей машиностроения. – Казань, 2016. – 265 с.

15 Еремейкин П., Жаргалова А., Гаврюшин С. Проблема технологических деформаций при фрезерной обработке тонкостенных заготовок // Обработка металлов. – 2019. – Т. 21, №3. – С. 17-25.

16 Водолазская Н.В., Шарая О.А., Корнев О.С. Исследование процесса упрочнения поверхностного слоя элементов конструкций машин // Агроинженерия в XXI веке: проблемы и перспективы: матер. нац. (всерос.) науч.-практ. конф. – Майский, 2020. – С. 108-112.

17 Бакиров Р.Б., Сон И.А., Жумат Р.А.Ы. Термодинамические методы управления составами холоднотвердеющих формовочных смесей // Технические науки - от теории к практике. – 2014. – №39. – С. 72-78.

18 Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Ковалева А.А. и др. Исследование глубины проникновения самовысыхающих противопригарных покрытий в холоднотвердеющие смеси // Черные металлы. – 2019. – №1. – С. 21-25.

19 Шатульский А.А., Изотов В.А. Экспериментальное определение некоторых параметров литья по выплавляемым моделям при изготовлении тонкостенных протяженных отливок // Вестник РГАТА имени П. А. Соловьева. – 2005. – №1-2. – С. 53-60.

20 Безпалько В.И., Батышев А.И., Батышев К.А. и др. Разработка технологии литья с кристаллизацией под давлением (ЛКД) тонкостенных отливок из силуминов // Наука, образование и производство - ведущие факторы Стратегии "Казахстан - 2050" (Сагиновские чтения №6): тр. междунар. науч.-практ. конф. – Караганда, 2014. – С. 314-316.

21 Мартыненко С.В., Огородникова О.М., Грузман В.М. Использование компьютерных методов для повышения качества крупногабаритных тонкостенных стальных отливок // Литейное производство. – 2009. – №11. – С. 21-26.

22 Пат. RU 2351449 C2. Способ исправления дефектов на деталях / Поклад В.А., Крюков М.А., Борисов М.Т. и др.; опубл. 19.02.07, Бюл. №24.

23 Лившиц В.Б., Кушнир А.П. Получение тонкостенных корпусных отливок повышенной герметичности методом литья с кристаллизацией под давлением // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – №3(240). – С. 11-13.

24 Мухоморов И.А. Об образовании трещин в отливках // Литейное производство. – 2016. – №2. – С. 10-13.

25 Петренко В.И., Недосекин М.Ю., Земцова Я.С. Металлургия // Проблемы научной мысли. – 2019. – Т. 2, №2. – С. 042-044.

26 Булитко Е.В. Исследование состава холоднотвердеющей смеси на основе фосфатного связующего // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2018. – №17. – С. 65-70.

27 Садоха МА., Ровин С.Л. Повышение эффективности производства отливок в условиях мелкосерийного и единичного производства // Литейное производсьво. – 2020. – №3. – С. 10-12.

28 Алина А.А., Куликов В.Ю. Оптимизация процесса получения холоднотвердеющих смесей с использованием комплексных связующих казахстанского месторождения // Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовки в машиностроении: матер. междунар. науч.-техн. конф. – М., 2022. – С. 198-206.

29 Wu Z., Yang S., Liu W. et al. Permeability analysis of gas hydrate-bearing sand/clay mixed sediments using effective stress laws // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – Vol. 97. – P. 533-542.

30 Куликов В.Ю., Исагулов А.З., Щербакова Е.П. и др. Определение ядра ползучести при формообразовании песчано-смоляной формы // Вестник ВКГТУ. – 2017. – №4. – С. 58-62.

31 Булитко Е.В. Исследование состава холоднотвердеющей смеси на основе фосфатного связующего // Технологии металлургии, машиностроения и материалообработки. – 2018. – №17. – С. 65-70.

32 Al-Mahbashi A.M., Dafalla M. Shear strength prediction for an unsaturated Sand Clay Liner // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2022. – Vol. 16, Issue 3. – C. 282-292.

33 Филиппов С.Ф., Семенов К.Г., Сорокина Е.А. и др. Свойства холоднотвердеющей смеси со связующим М-3 // Литейное производство. – 2014. – №1. – С. 19-20.

34 Дуюнова В.А., Козлов И.А. Холоднотвердеющие формовочные смеси: перспективы использования при литье магниевых сплавов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2011. – №1. – С. 41-43.

35 Каминир О.Н. К вопросу о применении математического моделирования в технологических процессах // Наука. Новое поколение. Успех: матер. 2-й междунар. науч.-практ. конф. – Краснодар, 2021. – С. 284-286.

36 Илларионов И.Е., Гильманшина Т.Р., Ковалева А.А. и др. Исследование глубины проникновения самовысыхающих противопригарных покрытий в холоднотвердеющие смеси // Черные металлы. – 2019. – №1. – С. 21-25.

37 Печенкина Л.С. Системы автоматизированного проектирования при оптимизации литниково-питающей системы отливки // Информационные системы и технологии: достижения и перспективы: матер. междунар. науч. конф. – Сумгаит, 2018. – С. 358-360.

38 Зубкова О.С., Яцун Е.И., Болотов С.С. и др. Исследование проливаемости литейной формы при проектировании литниковой системы отливки корпуса // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 11, №4. – С. 68-77.

39 Баженов В.Е., Плисецкая И.В., Санников А.В. и др. Исследование газотворности при термодеструкции холодно-твердеющих формовочных смесей // Литейное производство. – 2021. – №4. – С. 5-11.

40 Мизюряев С.А., Малахов Е.А., Тимченко В.С. Применение программных продуктов для обработки результатов испытания технологических свойств глин // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сб. ст. – Самара, 2020. – С. 118-122.

41 Бакиров Р.Б., Сон И.А., Жумат Р.А.Ы. Термодинамические методы управления составами холоднотвердеющих формовочных смесей // Технические науки - от теории к практике. – 2014. – №39. – С. 72-78.

42 Лукашик К.А., Бурцев Д.С., Пономарев А.А. и др. Развитие представлений о формировании точности отливок, получаемых литьем в формы из холоднотвердеющих смесей // Заготовительные производства в машиностроении. – 2019. – Т. 17, №9. – С. 387-389.

43 Резчиков Е.А. Моделирование процесса уплотнения формовочной смеси // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – №3. – С. 6-10.

44 Яковлева Л.В. Практикум по гидравлике. – М.: Агропромиздат, 1990. – 141 с.

45 Сушко Т.И., Щербаков Е.А., Пашнева Т.В. и др. Диагностика литейных дефектов, возникающих при использовании ХТС, посредством СКМ LVM FLOW // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7, №9. – С. 134-136.

46 Евлампиев А.А., Чернышов Е.А. Связь живучести и кинетики отверждения холоднотвердеющих смесей, приготовленных на различных связующих // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – №5. – С. 3-5.

47 Сорочкина М.А., Кутовой Н.Л. Инновационные методы изготовления литейных форм и жидкостекольных смесей // Материалы и технологии XXI века: сб. ст. 14-междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2016. – С. 118-122.

48 Kulikov V.Y., Issagulov А.Z., Ibatov М.K. et al. Studying the properties of sand-resin molds made using a variable load // Metalurgija. – 2020. – Vol. 59, Issue 4. – P. 547-550.

49 Болдин А.Н., Власов А.А. Современные методы изготовления стержней и форм в машиностроении // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – №1. – С. 8-13.

50 Малышев В.П. Математическое описание результатов многофакторного эксперимента, проверенного по методу Зейделя-Гаусса // Вестник АН КазССР. – 1978. – №4. – С. 31-38.

51 Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б. Планирование численного и физического эксперимента при моделировании технологических процессов // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2018. – Т. 61, №9. – С. 737-742.

50 Смирнова М.В. Теоретические основы теплотехники. – Волгоград, 2010. – 270 с.

52 ГОСТ 26645-85. Отливки из металлов и сплавов. – Введ. 1987-07-01. – М., 1985. – 56 с.

53 ГОСТ 2138-56. Пески формовочные // [http://delta-grup.ru/bibliot/13/9. htm?ysclid=lpgtph14jm337682864](http://delta-grup.ru/bibliot/13/9.%20htm?ysclid=lpgtph14jm337682864). 10.05.2021.

54 Куликов В.Ю., Ерёмин Е.Н., Ковалёва Т.В. и др. Математическое моделирование процесса формообразования песчано-смоляных смесей // Журнал Сибирского федерального университета. – 2019. – №7. – С. 810-817.

55 ГОСТ 18318-73. Порошки металлические. Определение размера частиц сухим просеиванием. – Введ. 1997-01-01. – Минск, 1996. – 11 с.

56 Аникеев В.В. Технология, экология и качество стальных заготовок при литье под теплоизолирующей смесью // Высокие технологии в машиностроении: матер. 8-й всеросс. науч.-технич. конф. с междунар. участ. – Самара, 2021. – С. 189-192.

57 Исагулов А.З., Ибатов М.К., Алина А.А. Исследование прочности холоднотвердеющих смесей // Литейное производство. – 2021. – №5. – С. 12-16.

58 Алина А.А., Куликов В.Ю.. Исследование состава холоднотвердеющих смесей с целью изготовления тонкостенных отливок // Матер. 74-й всерос. науч.-техн. конф. студ., магистр. и аспир. высш. учеб. завед. с междунар. уч. – Ярославль, 2021. – С. 515-521.

59 ГОСТ 1300-74 Ареометры общего назначения стеклянные для измерения плотности жидкостей в пределах от 700 до 2000 кг/куб. м. – Введ. 1980-01-01.

60 Конунникова С.Г., Жукебаева Т.Ж., Айтбаев Н.Б. и др. Формовочные смеси на карбамидфурановых смолах повышенной живучести и термостойкости // Литейное производство. – 2014. – №3. – С. 8-9.

61 Kulikov V.Y., Alina A.A., Kovalev P.V. et al. Study of thermal resistance of cold mixtures with clay addition // Комплексное использование минерального сырья. – 2021. – №1. – С. 82-97.

62 Илларионов И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей // Известия академии наук Чувашской Республики. – 2008. – №1. – С. 10-33.

63 Панасюгин А.С., Долгий Л.П., Кулинич И.Л. и др. Тенденции использования бентонитовых глин // Литье и металлургия. – 2020. – №4. – С. 78-89.

64 Савинов А.С., Тубольцева А.С., Осипова О.А и др. Применение разностных схем расчета температурного поля сырой песчано-глинистой формы // Литейные процессы. – 2010. – Т. 9. – С. 102-106.

65 Филиппов А.И. Явление генерации потока тепла при встречных течениях // Инженерная физика. – 2022. – №2. – С. 16-21.

66 Куликов В.Ю., Квон Св.С., Алина А.А. Определение оптимальных технологических параметров литейной формы // Литейное производство. – 2022. – №6. – С. 18-21.

67 Пат. 6413. Способ получения холоднотвердеющей смеси / Куликов В.Ю., Квон С.С., Алина А.А. и т.д.; опубл. 10.09.2021.

68 Kuryn M.G. Synthesis of cold-hardening mixtures with given set of properties and optimization of technological regimes of their manufacturing // Technology Audit and Production Reserves. – 2012. – Vol. 1, Issue 3. – P. 25-29.

69 Озерова Е.С., Романов М.С., Коротченко А.Ю. Факторы, влияющие на процесс выгорания глин в разовых песчано-глинистых формах // Будущее машиностроения России: сб. докл. 8-й всерос. конф. молод. учен. и спец. – М., 2015. – С. 166-168.

70 Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Дерябин Д.А. и др. Исследование свойств огнеупорного наполнителя холоднотвердеющих смесей // Теория и технология металлургического производства. – 2016. – №1(18). – С. 47-51.

71 Issagulov A.Z., Кulikov V. Yu., Alina A.A. et al. Studies of the influence of the composition of the CHM on the properties of the casting // Комплексное использование минерального сырья. – 2023. – №324(1). – С. 12-17.

72 Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Высшая Школа, 1975. – 496 с.

73 Королев В.Н., Островская А.В. Теоретические основы теплотехники. Теплоперенос. – Екатеринбург, 2021. – 206 с.

74 Alina A.A., Кulikov V.Yu., Omarova A.E. et al. X-RAY phase analysis (XPA) of a cold-hardening mixture (CHM) and the effect of the mixture properties on the casting // Metalurgija (Zagreb, Croatia). – 2023. – Vol. 63, Issue 2. – P. 271-274.

75 Ковалев В.П., Куликов В.Ю., Алина А.А. Разработка процесса получения холодно-твердеющих смесей с использованием комплексных связующих казахстанского месторождения // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации (Сагиновские чтения №14): тр. междунар. науч.-практ. конф. – Караганды, 2022. – Ч. 2. – С. 167-169.

76 Алина А.А., Куликов В.Ю., Достаева А.М. и др. Разработка и исследование технологии получения стальной отливки с применением холодно-твердеющей смеси // Тр. КарТУ. – 2023. – №3. – С. 38-43.

77 ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Введ. 1993-07-01. – М., 1987. – 31 с.

78 ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – Введ. 1975-01-01. – М., 1974. – 7 с.

79 ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79). Металлографические методы определения неметаллических включений. – Введ. 1972-01-01. – М., 2011. – 32 с.

80 ГОСТ 26645-85. Отливки из металлов и сплавов. – Введ. 1987-07-01. – М., 1994. – 56 с.

81 ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – Введ. 1983-01-01. – М., 1983. – 21 с.

82 ГОСТ 8233-56. Эталоны микроструктуры. – Введ. 1957-07-01. – М., 2004. – 12 с.

83 ГОСТ 5640-68. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. – Введ. 1970-01-01. – М., 1988. – 18 с.

84 Гадолина И.В., Пугачев М.С. Новые подходы к задаче обеспечения качества поверхности // Трибология – Машиностроению: тр. 14-й междунар. науч.-техн. конф., посв. 100-летию А.П. Семёнова. – М., 2022. С. 87-90.

85 Минаев А.А. Современные представления о закономерностях раз вития технологии литейного производства // Литейщик России. – 2006. – №8. – С. 28-34.