

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЛИТЬЯ

На правах рукописи

УДК 621.74.045

Кандидат технических наук

СЕЛИВАНОВ ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ПРОЦЕССЫ ОБЪЕМНОЗАМКНУТОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРОВАННОГО КРЕМНЕЗЕМА

Специальность 05.16.04 -Литейное производство

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев - 1993

Диссертация на правах рукописи

Работа выполнена в Одесском политехническом университете

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

СЕМИК Аркадий Павлович

доктор технических наук, профессор

ЖУКОВСКИЙ Сергей Семенович

доктор технических наук, профессор

КОЛОТИЛО Даниил Макарович

Ведущее предприятие - НПО НИИСЛ военно-промышленного комплекса конверсии Украины, г. Одесса.

Защита состоится "26" ноября 1993 г. на заседании специализированного ученого совета Д 016.20.01 в Институте проблем литья АН Украины по адресу:

г. Киев, проспект Вернадского, 34/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем литья АН Украины.

Автореферат разослан "13" октября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета  В.Г. Афандиянц

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00810637 (P)

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Дальнейшее развитие литейного производства – основной заготовительной базы современного машиностроения связано с совершенствованием процессов формообразования. Эти процессы определяют не только уровень механизации и автоматизации производства, но и оказывают непосредственное влияние на условия труда в литейных цехах, на качество, точность и служебные свойства отливок.

В настоящее время в заготовительном производстве Украины преобладают традиционные методы формообразования и только порядка 17 – 19 % от общего выпуска отливок получают специальными методами литья. Поэтому разработка новых методов формообразования, позволяющих максимально приблизить литые заготовки по геометрической точности к готовым деталям и улучшить их эксплуатационные характеристики, является актуальной проблемой для литейного производства.

Необходимость сохранения экологического баланса процессов формообразования литых деталей с окружающей средой и обеспечения их конкурентоспособности в условиях рыночной экономики придают научным исследованиям принципиально новую направленность.

Среди разнообразных методов формообразования способы литья в силикатные формы с различными органическими связующими наиболее рациональны, однако не отвечают многим требованиям по охране окружающей среды и качеству отливок.

В этой связи решение проблемы получения отливок с минимальными припусками на обработку и высокими физико-механическими характеристиками литого металла на базе развития объемно-замкнутого формообразования отвечает целям настоящей работы по коренному улучшению качества выпускаемой продукции и экологии производства, при одновременном энерго- и ресурсосбережении.

Целью диссертации является создание экологически чистых процессов объемно-замкнутого формообразования на основе стабилизированного диоксида кремния, направленных на снижение энергетических и материальных затрат и получение высококачественных отливок, преимущественно тонкостенных, из черных сплавов.

Основные задачи для решения поставленной цели:

I. Изучение кинетики полиморфных превращений диоксида кремния и установление его оптимальных модификаций, улучшающих качество процессов объемно-замкнутого формообразования.

2. Разработка метода стабилизации модификационных превращений SiO_2 с помощью минерализаторов, формирующих у стабилизированного диоксида кремния связующие свойства.

3. Установление составов и условий получения шликерных композиций на основе стабилизированного диоксида кремния, обеспечивающих оболочковым формам химическую одноосновность и высокие физико-механические характеристики.

4. Разработка метода керамизации песчаных форм тонкими /2-3 мм/ облицовками, улучшающих качество поверхности и размерную точность отливок.

5. Разработка гидротермального метода получения керамических тонкостенных стержней на бессвязующей основе.

6. Разработка метода объемной высокоинтенсивной сушки оболочковых форм электрическими полями СВЧ.

7. Разработка технологии получения пенокерамических фильтров для очистки высокотемпературных расплавов от неметаллических включений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Процесс тридимитизации кварца с помощью минерализаторов - оксидов щелочных металлов, снижающих температуру и время перехода кварца в тридимит соответственно с 1470 °С до 1300 °С и с 8 час до 40 мин.

2. Механизм формирования связующих свойств стабилизированного кремнезема протонированием его поверхности, последующей конденсацией силанольных групп и образованием силоксановых связей " $Si-O-Si$ ".

3. Принципы объемно-замкнутого формообразования керамических оболочек на основе тридимитовых суспензий тиксотропного разжижения при ограничении жидкой составляющей до уровня 16-22 %, с использованием гидротермального отверждения и объемного упрочнения электрическими полями СВЧ.

4. Технологические основы керамизации песчаных форм тонкими облицовками на основе водных суспензий стабилизированного кремнезема.

Научная новизна. Раскрыта кинетика полиморфных превращений диоксида кремния в присутствии минерализаторов: оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов. Установлено, что в отличие от классической диаграммы Феннера в равновесных условиях кварц превращается в тридимит через промежуточную фазу метакристаллита.

атионы K^+ и Na^+ облегчают ее перестройку в решетку тридимита в большей степени, чем катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} .

Экспериментально доказано, что связующие свойства высокодисперсного стабилизированного кремнезема /СК/ создаются модифицированием, протонированием и последующей полимеризацией его поверхности.

Предложены новые методы объемно-замкнутого формообразования. Уточнен механизм образования прочностных контактов при формировании керамической оболочки. Показано, что значения термодинамической, термостатической и остаточной прочности можно регулировать: а/ содержанием оксида натрия в СК; б/ методом сухого или мокрого помола СК и его дисперсностью; в/ природой и количеством содержания ПАВ в суспензии; г/ объемной сушкой оболочковых форм; д/ тиксотропным разжижением смеси при формировании монослойных оболочек.

Впервые рассмотрен механизм удаления влаги в формовочных материалах, находящихся в электрическом поле СВЧ, разработаны режимы объемной сушки оболочковых форм. На основе аналитического расчета получены параметры процесса тепломассопереноса с импульсным внутренним источником тепла при наличии внешнего теплоотвода, приведена кинетика процесса формирования и развития внутренних напряжений в оболочковой форме при дискретном и непрерывном воздействии СВЧ энергии.

Разработан новый гидротермальный метод получения тонкостенных стержней из тонкоизмельченного стабилизированного кремнезема. Рассмотрен процесс перехода дисперсной системы под воздействием перегретого пара из коагуляционного в конденсационное состояние.

Разработан новый метод керамизации песчаных форм тонкими облицовками /2-3 мм/, выполненными из шликера на основе стабилизированного кремнезема. Решены задачи теплопроводности для системы отливка-облицовка-песчаная основа с использованием ЭВМ, построены номограммы для управления тепловым режимом керамизированных форм.

Обоснованы теоретические положения и проведена практическая реализация двух принципов получения пенокерамических фильтров для высокотемпературных сплавов: осаждение паровой фазы кремния на высокопористый углерод и центробежная пропитка высокопористого углерода огнеупорным шликером с последующей термообработкой.

Практическая значимость и реализация результатов работы

На основании проведенных исследований процессов объемно-замкнутого формообразования разработаны:

- экологически чистые формовочные материалы, обладающие одновременно свойствами огнеупорного наполнителя и связующего. Прочность оболочковых форм, изготовленных из этих материалов, составляет 8-12 МПа, газопроницаемость 40-60 ед, коэффициент термического расширения равен $10,5 \pm 2,3 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;

- методы получения монослойных оболочковых форм и стержней, позволяющие в 2-3 раза увеличить производительность труда и уменьшить время тепловой обработки с 22-24 часов до 12-18 минут;

- метод керамизации песчаных форм, позволяющий получать тонкостенные отливки с высокой размерной точностью и шероховатостью поверхности равной $R_z = 15-30$ мкм; - технология изготовления пенокерамических фильтров для ЛВМ и метод очистки расплавов от неметаллических включений.

Разработанные новые технологические процессы, внедрены для получения отливок ответственного назначения на следующих предприятиях:жно-турбинном заводе "Заря", НПО "Сирius" /г. Николаев/, Мелитопольском заводе "Автоцветлит", Киевском заводе художественного стекла при получении точных литых прессформ и Одесском заводе "Центролит". Экономический эффект от внедрения этих разработок на 1993 год составил 80 млн. карбованцев в год. Разработанный технологический процесс объемно-замкнутого формообразования на Республиканском конкурсе /г. Киев/ ресурсосберегающих и экологически чистых технологий в 1989 г. отмечен дипломом и включен в перечень основных разработок Инженерной академии Украины.

Апробация работы. Основные материалы диссертации доложены на Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы технологичности конструкций и изделий в машиностроении" /Брянск, 1974/, Всесоюзной н.-т. конференции "Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей" /Москва, 1975/, Респуб. н.-т. конф. "Неметаллические включения и газы в литейных сплавах" /Запорожье, 1976/, Республ. н.-т. сем. "Прогрессивные технологические процессы производства отливок" /Саратов, 1977/, Международном н.-т. сем. "Новые направления в получении высококачественных отливок специальными способами литья" /Одесса, 1982/, н.-т. конф. "Прогрессивные технологические процессы литейного производства" /Омск, 1986/, н.-т. конф. "Пути сбережения ресурсов" /Одесса, 1986/, Республ. н.-т. сем. "Прогрессивные формовочные смеси и технологические процессы" /Минск, 1987/, н.-т. конф. "Совершенствование технологических процессов при производстве отливок" /Омск, 1987/, н.-т. конф. "Интенсификация технологических процессов в литейном производстве"

/Барнаул, 1988/, Республ. н.-т. конф. "Пути повышения качества и экономичности литейных процессов" /Одесса, 1988/, н.-т. сем. "Перспективы применения регенерации песков при малоотходной технологии получения отливок" /Челябинск, 1988/, н.-т. конф. "Современные направления повышения качества литых заготовок" /Ростов-на-Дону, 1989/, н.-т. сем. "Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям" /Москва, 1989/, н.-т. сем. "Повышение эффективности литейного производства" /Омск, 1989/, н.-т. сем. "Повышение эффективности литейного производства" /Ленинград, 1990/, Всесоюз. симпозиум "Научно-методические основы биосферосовместимых технологий" /Одесса, 1990/, н.-т. сем. "Современные направления повышения качества литых заготовок при литье в песчаные формы" /Москва, 1990/, Республ. н.-т. конф. "Пути повышения качества и экономичности литейных процессов" /Одесса, 1990/, Всесоюзная н.-т. конф. "Прогрессивные методы повышения качества отливок" /Минск, 1991/, н.-т. семинар "Теория и практика литья по газифицируемым моделям" /Киев, 1991/, н.-т. семинар "Методы контроля и исследований в производстве отливок по выплавляемым моделям" /Москва, 1992/, Республ. н.-т. конф. "Литейное производство и окружающая среда" /Минск, 1992/, Республ. н.-т. конф. "Пути повышения качества и экономичности литейных процессов" /Одесса, 1993/ и др. Ряд технологических разработок экспонировался на Всесоюзных и республиканских выставках, отмечены медалями ВДНХ и дипломами.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 48 печатных работ, получено 17 авторских свидетельств на изобретения.

Объем работы: Диссертация изложена на 285 страницах машинописного текста, состоит из шести глав, общих выводов, содержит 78 рисунков, 18 таблиц и список литературы из 212 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Модификационные превращения диоксида кремния и метод его стабилизации. Полиморфизм SiO_2 объясняется особенностями кристаллического строения различных модификаций и сопровождается изменениями их плотности и объема. Практический интерес для процессов объемно-замкнутого формообразования представляет тридимит /стабилизированный кремнезем/, характеризующийся термостойкостью до $1650^\circ C$ и коэффициентом термического расширения, равным $1/2, 1+2, 3/ \times 10^{-6} 1/^\circ C$. Процессы превращения чистого кварца в тридимит протекают крайне медленно /3 час/, вплоть до $1470^\circ C$. Интенсифициро-

вать процесс перехода кварца в стабилизированный кремнезем и придать ему связующие свойства предложено введением минерализаторов на основе оксидов щелочных металлов.

Методами рентгенографии и ДТА установлено, что модификационный переход SiO_2 реализуется через аморфную фазу, изменение количества которой характеризуется кривой нормального распределения. Этот механизм соответствует реакции растворения-отложения: из эвтектического состояния системы $SiO_2 - Na_2O$ выделяется при температуре $870 \pm 1050^\circ C$ кристаллическая фаза, для которой выявлена изотропность, не соответствующая тетрагональной симметрии кристобалита. Поэтому образующаяся фаза - метакристобалит. При дальнейшем нагревании $1050 \pm 1300^\circ C$ превращение метастабильного кристобалита в тридимит происходит перекристаллизацией через расплав. Минерализатор при нагревании образует равновесный расплав, в котором растворяется метакристобалит как неравновесная в данных условиях кристаллическая фаза, пересыщая расплав кремнеземом. Благодаря этому в расплаве возникают центры кристаллизации стабильной модификации - α -тридимита. Высокое содержание кремнезема в расплаве, образуемого введением катионов K^+ , Na^+ , обуславливает весьма интенсивную его тридимитизацию. Экспериментально доказано, что специфическое действие щелочных катионов $[K^+, Na^+]$ определяется их внедрением в пустоты решетки диоксида кремния, вследствие чего решетка деформируется и энергия активации превращения снижается. Деформирующее действие катионов минерализующих добавок на решетку диоксида кремния тем больше, чем больше размеры имеет внедряющийся катион. Внедрение в его кристаллическую решетку больших катионов K^+ , Na^+ , облегчает ее перестройку в значительно большей степени, чем внедрение малых катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} . Модификационные превращения кварца в тридимит под влиянием щелочноземельных оксидов CaO , MgO протекают при более высоких температурах $1380-1420^\circ C$ и за более длительное время $3-4$ часа, чем под влиянием щелочных оксидов K_2O , Na_2O соответственно при $1280-1320^\circ C$ и за 1 час. В строении кварца и тридимита наблюдается большое сходство, заключающееся в одинаковом расположении атомов в плоскостях 1011 и 0001 соответствующих структур. Однако, изучение проекций структур на эти плоскости показывает значительное различие в сочленениях их тетраэдров. Сходство структур этих модификаций способствует непрерывному переходу кварца в тридимит, в то время как обратный переход затруднен. Применение рентгено- и термографических методов исследования позволило раскрыть механизм изменения

фазового состава исследуемых материалов в зависимости от условий их обжига и количества минерализаторов в обжигаемой шихте, состоящей из кварцевого песка /ГОСТ 2133-74/ и технической соды /ГОСТ 5100-73/. Шихта обжигалась при температуре структурного превращения кварца в тридимит /1300 °С/. Дифрактограммы исследуемых образцов при содержании 2,0 мас. %, Na_2O характеризуются набором рефлексов, которым соответствуют межплоскостные расстояния $d/n = 4,34; 4,30; 3,83; 2,97 \text{ \AA}$ /рис. 1, в/. Отражение слабой интенсивности $d/n = 3,34$ и $2,38 \text{ \AA}$ /показывает на небольшое содержание /следы/ кварца.

В случае уменьшения количества оксида натрия /до 0,5 мас. %, Na_2O / полного преобразования кварца в тридимит не происходит, при этом $d/n = 4,24; 3,36 \text{ \AA}$ /рис. 1, а/. При увеличении доли минерализатора /с 2,0 мас. %, %/ до 6,0 мас. %, /в продукте обжига наблюдается рост количества образовавшегося тридимита с 55-65 % до 85-90 %.

Полученные результаты на рентгенограммах подтверждаются дополнительно снятыми термограммами исследуемого СК /рис. 2/. При содержании 0,5 мас. %, Na_2O в продукте обжига обнаружено до 8 % остаточного кварца, что подтверждается дополнительно экзотермическим эффектом при температуре 573 °С.

Полученный материал обладает кремнеземистым модулем 16...50, плотностью 2,2-2,3 г/см³, водородным показателем pH = 10,2...11,6 температурой замерзания +1 °С, термостойкостью 1600-1650 °С. При дисперсности $\geq 3,5$ тыс. см²/г стабилизированный кремнезем применяют для приготовления водной суспензии одновременно в качестве связующего и наполнителя; при дисперсности СК $\leq 1,0$ тыс. см²/г - в качестве обсыпного материала.

На основе проведенных исследований стабилизированных форм диоксида кремния, установлено, что аморфный SiO_2 в виде природного высокопористого диатомита является, также как и тридимит, перспективным формовочным материалом для процессов объемно-замкнутого формообразования, обладает низким КТР /0,4 x 10⁻⁶ I/°С/ и теплопроводностью / $\lambda_{\text{ф}} = 0,113$ Вт/м·К/, высокой термостойкостью /1600 °С/.

2. Принципы создания процессов объемно-замкнутого формообразования на основе стабилизированного кремнезема. В процессе гидроксидирования, при взаимодействии воды с частицами стабилизированного кремнезема, его поверхность покрывается OH-группами, образуя гидратный слой. Соли кремниевых кислот, кроме силикатов калия и натрия, не растворяются в воде. Растворение СК в воде реа-

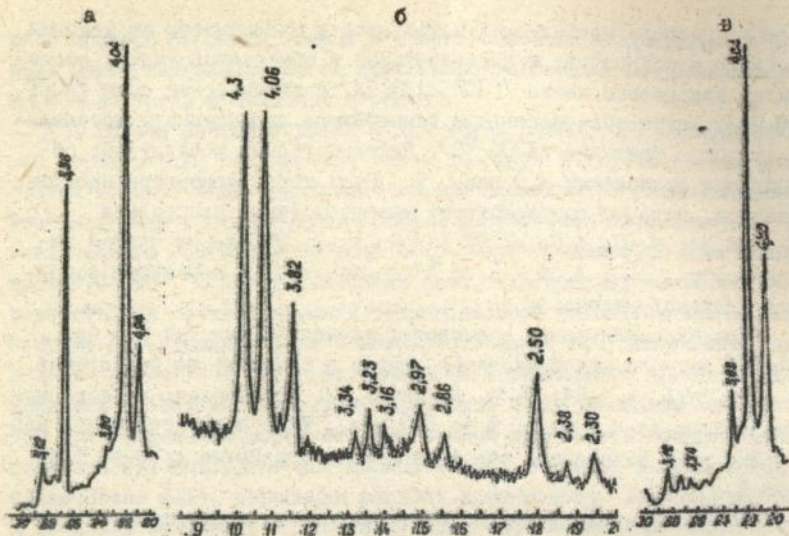


Рис. 1. Дифрактограммы обожженного кремнеземистого материала с содержанием Na_2O мас. % :

а - 0,5; б - 1,0; в - 2,0

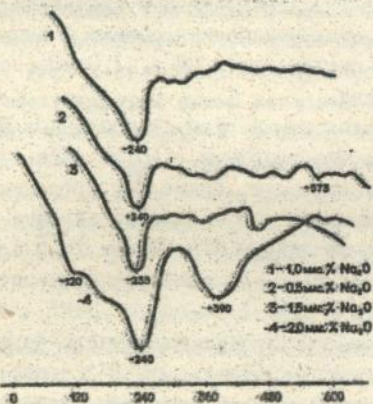


Рис. 2. Термограммы продуктов обжига содокарцевой шихты с различным содержанием минерализатора

лизуется в присутствии катализатора - гидроксид-ионов, которые хемосорбируются на поверхности СК, повышая его координационное число. Такая поверхность несет ионный заряд, постоянно обмениваясь кремнеземом с раствором, происходит адсорбция ионов OH^- , а затем атом кремния с поверхности переходит в раствор в виде силикат-иона.

Представлена физико-химическая модель изменения поверхности диоксида кремния в процессе формообразования /рис.3/. При прокаливании содокварцевой шихты происходит модифицирование поверхности кремнезема натрием за счет разрыва при температуре 1300°C поверхностных кислородных мостиков " $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ "; при этом удаляется CO_2 и на поверхности кремнезема образуются силикаты $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_3$ и дисиликаты $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ натрия.

При взаимодействии стабилизированного кремнезема с водой происходит разрыв ионных связей $-\text{O}-\text{Na}$ и образование более прочных ковалентных связей $-\text{O}-\text{H}$. Процесс сопровождается возникновением в дисперсной среде свободных ионов гидроксида OH^- и натрия, о чем свидетельствует увеличение водородного показателя pH с 9,2 до 12,3 и образование силанольных групп.

Протонированная таким образом поверхность кремнезема при нагревании /сушке/ приводит к конденсации силанольных групп и образованию на смежных поверхностях радикалов типа >Si и $\text{>Si}-\text{O}$, которые замыкаются друг на друга, образуя силоксановую связь $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$. Связывание высокодисперсных частиц в разветвленные цепочки, а затем в сетки, распространяется на весь объем материала, превращая его в высокопрочную термостойкую оболочку.

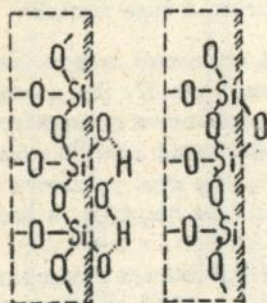
Получение стабилизированных суспензий достигается двумя способами: коллоидно-химическим и механическим. К первому способу относится введение экспериментально подобранных ионогенных ПАВ. Анионоактивные ПАВ /сульфанол, метаупон, диталан/ рассматриваются как технологически приемлемые для обеспечения смачиваемости водными суспензиями моделей, повышения их агрегативной устойчивости и снижения содержания дисперсионной среды в суспензии.

Второй способ характеризуется совместным действием на суспензию длительного механического перемешивания и вибрации.

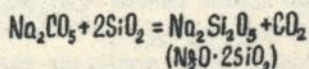
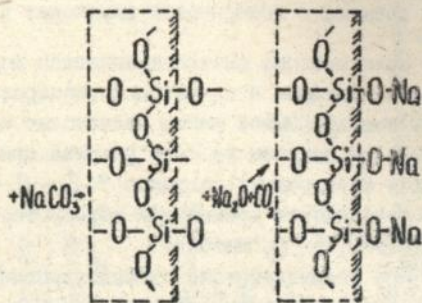
Мокрый помол СК, так же как первый и второй метод получения стабилизированных суспензий, способствует повышению степени растворения SiO_2 в системе /35-40%/ и позволяет использовать тридмит с минимальным /1,5-2,5%/ содержанием Na_2O .

Установлено, что в процессе изготовления кермических оболочек и покрытий суспензия из стабилизированного кремнезема проходит че-

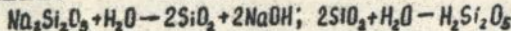
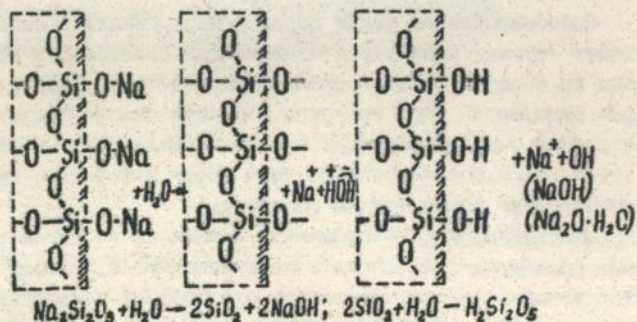
1. Гидроксилированное (исходное) состояние поверхности SiO_2



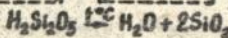
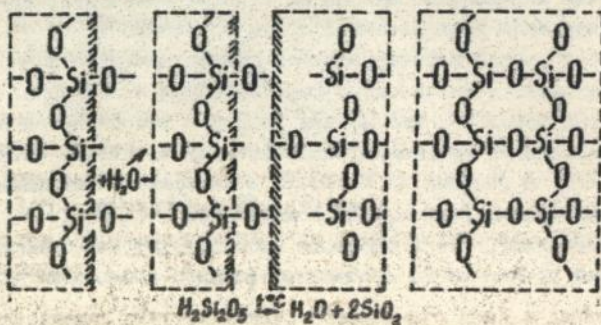
2. Модификация поверхности SiO_2 в процессе прокаливания содо-кварцевой шихты при $t = 4500^\circ\text{C}$



3. Активация модифицированной поверхности SiO_2 и ее протонирование



4. Полимеризация протонированной поверхности SiO_2 при тепловой обработке и образовании межповерхностных силикановых связей



рез пять агрегатных состояний: жидкое, вязкое, вязкопластичное, упруго-пластичное, упругое.

Проведенные исследования реологических свойств каждого из пяти состояний раскрывают не только механизм процессов структурообразования при химическом или тепловом отверждении суспензии, но и позволяют управлять этим процессом в желаемом направлении.

Полученные характеристики реологических свойств исследуемой суспензии в процессе ее структурирования в виде пластической прочности $/P_m/$, модуля Юнга $/E/$, модуля сдвига $/G/$, коэффициента Пуассона $/\mu/$ показывают, что этот процесс может быть разделен на два периода: формирование и упрочнение структуры.

Период формирования характеризуется коагуляционной, а затем коагуляционно-кристаллизационной структурой, что сопровождается повышением пластической прочности суспензии до 0,5-0,6 МПа.

Периоду упрочнения соответствует большая скорость нарастания прочности затвердевающей суспензии и переход ее из вязко-пластичного в упруго-пластичное состояние. Этот период характеризуется кристаллизационно-коагуляционной структурой и ему соответствует изменение модуля Юнга $/E/$ с 1,6-1,7 МПа до 2,6-2,7 МПа, модуля сдвига $/G/$ с 0,7-0,8 МПа до 1,1-1,2 МПа и коэффициента Пуассона с 0,06 до 0,18. Соотношение прочности кристаллизационной и коагуляционной структур непрерывно увеличивается и керамика переходит в упругое состояние.

При химическом отверждении суспензии рост кристаллов обуславливает с одной стороны - упрочнение этой структуры, а с другой - является причиной появления внутренних напряжений, вызывающих частичные разрушения структуры и снижение ее прочности. Двойственный характер этого процесса приводит к появлению второго перегиба на S -образной кривой нарастания прочности. Так, вслед за резким увеличением упругих характеристик наблюдается их спад и происходит он тем интенсивнее, чем больше $/\geq 6\%$ содержания в системе отвердителя $/Na_2SiF_6/$. Это объясняется релаксацией напряжений по наиболее слабым участкам в структуре керамики, приводящей к ее разрушению. Исследования напряженно-деформационного состояния оболочковых форм показали, что устранение трещинообразования керамики возможно за счет 16-18 % добавки природного пористого диатомита, выполняющего роль демпфера-гасителя напряжений.

В случае малого количества отвердителя возникновение каркаса кристаллизационной структуры происходит более длительное время, а возникающие напряжения практически не влияют на снижение качества

и прочности керамики. Такой же характер структурирования наблюдается и при тепловом отверждении суспензии. Влияние pH-среды на стабилизацию СК-суспензии определялось методом электроосмоса. Установлено, что с повышением содержания N_2O от 1 до 5 % /по массе СК/ растет заряд твердых частиц от 23 мВ до 81 мВ, последнее и является показателем стабилизации дисперсных систем. СК-суспензия смачивает гидрофобную модель, не вступая с ней в химическое взаимодействие, обладает высокой седиментационной устойчивостью и текучестью, обеспечивая получение равномерного слоя покрытия. Прочность оболочковых форм, изготавливаемых из СК, зависит от трех основных факторов: содержания в нем оксида натрия, от степени дисперсности СК и длительности его взаимодействия с водой. Их газопроницаемость изменяется с 20–30 ед. /для тридимита/ до 60–80 ед. /для диатомита/. Теплоаккумулирующее свойство керамической оболочки, характеризующее коэффициентом аккумуляции теплоты β_{Φ} , составляет для диатомита 320–360 Вт/с¹/2·м²·°С и, соответственно, тридимита – 790–810 Вт/с¹/2·м²·°С.

Разработано три варианта получения монослойной оболочки по удаляемым моделям.

Вариант I. Блок выплавляемых моделей устанавливается в разъемный манжет. Образовавшийся зазор между блоком и манжетом заполняется формовочной смесью вязкостью 12–14 с по ВЗ–10. В момент заполнения включается вибратор. После снятия вибрации смесь под действием отвердителя затвердевает. Применение диатомита усиливает тиксотропно-структурирующие связи и оказывает на смесь армирующее воздействие, увеличивая прочность формы. Волокнистые частицы диатомита устраняют зарождение и развитие трещин, несущее прогрессирующий лавинообразный характер в обычной кварцевой оболочке. Выплавление моделей осуществляется в среде сухого перегретого пара, где прогрев и расплавление модельного состава происходит в зазоре между оболочкой и моделью, образованным при сушке оболочки энергией СВЧ. При этом снижается силовое взаимодействие оболочки с моделью. Возврат модельного состава составляет 85–90 %. Температура прокатки оболочек снижается на 150–200 °С, т.е. до 750–800 °С.

Вариант II. Блок выплавляемых моделей погружают в тиксотропную суспензию на 5–7 с и извлекают из ванны. Тиксотропная суспензия, удаляясь из зоны вибрации, переходит в структурированное состояние, что исключает стекание суспензии с поверхности блока. В результате фиксируется утолщенный слой /2–4 мм/ огнеупорного покрытия. После сушки оболочки энергией СВЧ операции вытопки модельного состава,

прокалки и заливки такие же, как и при варианте I.

Вариант III. Основан на усовершенствовании *Policaste* - процесса, т.е. получении отливок в оболочковых формах, пенополистироловые модели из которых перед заливкой формы металлом полностью удаляются. Метод используется при изготовлении тонкостенных отливок из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, где необходима полная нейтрализация продуктов разрушения пенополистирола при их контакте с жидким металлом.

Согласно этому методу пенополистироловая модель устанавливается в виброконтейнер, который заполняется смесью на основе стабилизированного кремнезема и воды. В момент заполнения на смесь воздействуют вибрацией. При этом смесь разжижается, превращаясь в высококонцентрируемую суспензию, качественно воспроизводит тонкорельефные поверхности модели. При извлечении модели из тиксотропной суспензии, на ней фиксируется утолщенный слой огнеупорной обмазки.

Удаление пенополистироловых моделей проводится при температуре 950-1050 °C. Для увеличения скорости испарения материала модели и уменьшения сажевыделения предусматривается введение в материал модели нитроклетчатки, сгорающей быстрее основного материала и увеличивающей его скорость удаления.

Другой метод заключается в введении в материал модели добавок, разрушающих структуру полимерной цепи пенопласта, т.е. ускоряющих деполимеризацию. Поскольку процесс испарения полимеров при температуре разрушения лимитируется скоростью распада полимерной цепи в объеме материала, то последний путь более технологичен.

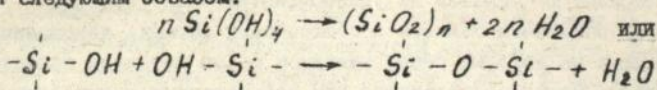
Полученные таким образом оболочковые формы заливаются металлом в засыпке кварцевым песком.

Гидротермальный метод изготовления тонкостенных стержней заключается в заполнении рабочей полости стержневого ящика сухим тонкоизмельченным СК.

Смесь подвергается вибрации при частоте колебаний 50 Гц /3150 колебаний в минуту/. Рабочая амплитуда для качественного воспроизведения тонкорельефных поверхностей и уплотнения тридимитовой или диатомитовой смеси составляет 0,3...0,4 мм.

Гидротермальную обработку дисперсионной системы перегретым паром при температуре 130-140 °C можно трактовать как нуклеофильную коррозию, т.е. протонирование поверхности H^+ с образованием ковалентной связи O-H за короткий период времени /8-12 мин/. Последующую поликонденсацию в общем виде можно представить как объе-

динение n полимерных молекул в одну со средней степенью полимеризации следующим образом:



Структурообразование такой системы при ее гидротермальной обработке проходит через три основных стадии структурного состояния.

На первой стадии после обработки тонкоизмельченного тридими-та насыщенным паром, он по своим свойствам аналогичен квазигелю. Дальнейшая обработка коагуляционной структуры перегретым паром приводит к ее прогреву $\gg 80^\circ\text{C}$, удалению из системы влаги, уменьшению толщины сольватных прослоек между зернами и образованию первичной структуры.

Вторая стадия характеризуется переходом системы из коагуляционного состояния к конденсационному /переходная структура/, где происходит интенсивное формирование капиллярной пористости, обусловленное контактным взаимодействием частиц и дегидратацией материала.

На третьей стадии процесса, сушке стержней при $180-220^\circ\text{C}$, наблюдается лишь количественные изменения в их структуре, т.е. ее упрочнение за счет увеличения межзернового числа контактов. Прочность стержней при этом возрастает на 15-18 % и составляет

$$\sigma_{\text{т.к.}} = 14-16 \text{ МПа.}$$

3. Разработка основных принципов применения СВЧ-энергии в процессах объемнозамкнутого формообразования. Впервые в отечественной практике литейного производства рассмотрен механизм объемной сушки влажных оболочковых форм в электрическом поле СВЧ и возможность создания внутри таких материалов условий, способствующих ее интенсификации. Проникновение СВЧ-поля по всему сечению формы позволяет генерировать одновременно теплоту во всем объеме материала.

Создана единая классификация применения СВЧ-энергии в процессах формообразования, состоящая из трех подклассификаций: 1/ способ связи генератора с обрабатываемым изделием; 2/ выполняемый процесс; 3/ результирующий эффект.

Мощность, передаваемая единице объема материала, рассчитывается по формуле:

$$N = E^2 f \epsilon \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

где E - напряжение электрического переменного поля в данном веществе; f - частота волны; ϵ - диэлектрическая постоянная; $\operatorname{tg} \delta$ -

угол диэлектрических потерь.

Из (I) видно, что выгоднее работать на возможно более высоких частотах, но с ростом частоты глубина проникновения S волны в обрабатываемую среду уменьшается по закону:

$$S = \frac{1}{f\sqrt{\epsilon}tg\delta} \quad (2)$$

Установлена рабочая частота СВЧ-установок для сушки оболочковых форм - 2450 МГц.

Выбор оптимального режима сушки оболочковых форм энергией СВЧ проводился с помощью аналитического расчета и экспериментальных исследований. В известной системе дифференциальных уравнений, предложенной А.В. Лыковым, сделано дополнение в виде функции Π_i , характеризующей внутренний источник тепла при наложении электрических СВЧ-полей. В безразмерном виде система уравнений запишется следующим образом:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial F_0} = \sum K_{i,j} \frac{\partial^2 \theta_j}{\partial x^2} + \Pi_i$$

Потенциал θ_i вычисляется по формуле:

$$\theta_i(x, F_0) = \sum_{j=1}^3 C_{ij} \mathcal{Z}_j(x, F_0), \quad i = 1, 2, 3$$

Значение $\sum \mathcal{Z}_j(x, F_0)$ являлось результатом решения трех задач:

- решение задачи конвективного нагрева влажных форм, полученное Ю.А. Михайловым:

$$\mathcal{Z}_j^{(1)}(x, F_0) = A_j - \sum_{n=1}^{\infty} B_{jn} \cos \frac{\mu_n}{\nu_j} x e^{-\mu_n^2 n F_0} \quad (3)$$

- решение непрерывного СВЧ-нагрева влажного материала, полученное Г.А. Максимовым:

$$\mathcal{Z}_j^{(2)}(x, F_0) = D_j \sum_{n=1}^{\infty} D_{jn} \cos \frac{\mu_n}{\nu_j} x (1 - e^{-\mu_n^2 n F_0}) \quad (4)$$

- решение задачи тепломассопереноса с дискретным внутренним источником тепла, впервые предлагаемое в процессах формообразования:

$$\mathcal{Z}_j^{(3)}(x, F_0) = D_3 F_{0n} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2(m\pi)^2} [W_{j m1}^* \sin(2m\pi / (F_{0n}) F_0 + W_{j m2}^* (1 - \cos(2m\pi / F_{0n}) F_0)] \quad (5)$$

Сравнение потенциалов переноса в дискретном /импульсном/ и непрерывном режимах СВЧ-нагрева осуществлялось при условии равенства в каждом цикле средних значений внутренних источников тепла. Используя значения чисел Остроградского θ_s в решении задачи с непрерывным нагревом $\mathcal{Z}(x, F_0)$ (4) и вычитая его из решения зада-

чи с дискретным нагревом (5), находим приращение потенциалов тепло-массопереноса при дискретном нагреве по сравнению с непрерывным:

$$\Delta Z_{\tau}(x, F_0) = O_s^H \sum_{n=1}^{\infty} D_{\tau n} (\eta_{\tau} - F_n) \cdot \cos(\mu_n / \nu_{\tau}) x + O_s^H F_0 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} (W_{\tau m_2} / (2m\pi)^2). \quad (6)$$

Анализ формулы (6) показывает, что при дискретном нагреве, когда η_{τ} принимает значения в интервале $0 < \eta_{\tau} < 1$ значения $\Delta Z_{\tau}(x, F_0) > 0$, а в случае $\eta_{\tau} = 1$ /режим непрерывного нагрева/ $\Delta Z_{\tau}(x, F_0) = 0$. При дискретном нагреве температура и давление меньше, а потенциал массопереноса больше, чем при непрерывном.

Интенсивность внутреннего источника тепла в значительной степени определяется электрофизическими характеристиками ϵ и $t_g \beta$, которые, в свою очередь, зависят от влагосодержания материала, непрерывно изменяющегося в процессе сушки. Исходя из этого, функция Π_i представлена в виде $\Pi_i = O_s \cdot e^{-Pd \cdot F_0} f(F_0)$, где критерий Предводителя Pd учитывает количество импульсов внутреннего источника тепла во времени. В тех случаях, когда влажные материалы формы не выдерживают воздействия высокой температуры из-за низкой сырой прочности, целесообразно применение дискретного метода тепловой обработки; возникающие при этом градиенты температуры способствуют интенсификации переноса влаги из внутренних слоев к поверхности.

С увеличением числа O_s в материале возникают градиенты потенциала массопереноса. В результате происходит превышение скорости переноса влаги к поверхности материала над скоростью ее удаления с поверхности. Этот недостаток устраняется обдувом поверхности оболочковых форм воздухом. Уменьшение механических напряжений, возникающих за счет больших градиентов влагосодержания внутри материала, достигается интенсификацией теплообмена на поверхности, т.е. увеличением β_i . Когда скорость парообразования становится равной скорости массопереноса, рост давления в оболочке прекращается. Относительное время включения поля СВЧ η_{τ} характеризует продолжительность нагрева материала в течение периода дискретной функции. При этом значения η_{τ} и O_s могут изменяться, но количество поглощаемой материалом энергии СВЧ за цикл остается неизменным: $\eta_{\tau} \cdot O_s = const$.

Процессы с малым η_{τ} рекомендуются для сушки термочувствительных форм, какой является оболочка; пребывание форм при высокотемпературной обработке во избежание брака должно быть кратковремен-

ным. Наибольшее искажение качественного характера изменения потенциала переноса имеет место при пренебрежении числами ρ_d в процессах с большим исходным влагосодержанием материала формы.

Расчетные данные сопоставлены с результатами экспериментальных исследований по выбору оптимального режима сушки оболочковых форм в дискретном и непрерывном электрических полях СВЧ.

Установлено, что дискретный режим сушки формы, при использовании обдува воздухом ее поверхности, отличается от непрерывного /жесткого/ умеренным давлением и температурой, обеспечивающим сохранение модели и макроструктуры оболочки до появления необходимой прочности. Представлены режимы такой сушки, где плотность СВЧ-энергии составляет 7100–7200 Вт на 1 м^3 , частота 2450 МГц, цикл микроволнового нагрева 10–12 с, последующий обдув оболочки воздухом 0,8–1,0 мин. Общая продолжительность сушки одного слоя 3–4 мин., формы – 12–18 мин. Распределение температуры по сечению образца в начале процесса характеризовалось параболическими кривыми /рис. 4/. К концу сушки разность температур середины и поверхности становилась минимальной.

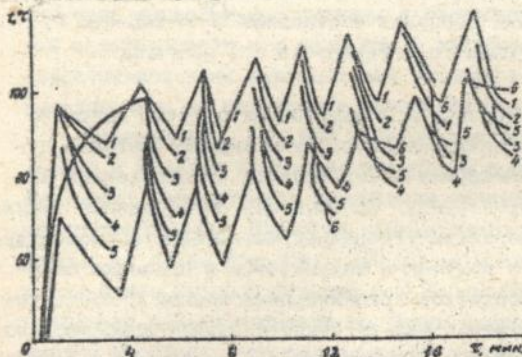


Рис. 4. Режимы дискретной сушки оболочковых форм электрическим полем СВЧ. Распределение температуры по сечению формы: 1 – центре; 2–2 мм от центра; 3–4 мм от центра; 4–6 мм, 5–8 мм; 6–10 мм.

4. Условия формирования отливок повышенного качества

Определяющим фактором процесса формирования литой поверхности в системе керамическая форма – расплав являются значения поверхностного натяжения σ и краевого угла смачивания θ° . Объективная оценка величин σ и θ° в широком диапазоне температур для расплавов, реализуемых для ЛВМ, достигается методом "лежащей" капли, который обеспечивает полное устранение окислительной атмосферы в рабочем пространстве измерений.

Метод основан на определении формы расплавленной капли, лежащей на керамической подложке из стабилизированного кремнезема,

циркона и электрокорунда. Давление в каждой точке жидкости по мере роста температуры изменяется с высотой капли; то же самое происходит с основными радиусами кривой в каждой точке ее поверхности. Профиль капли фотографируется, первые пробы /клише/ берутся с момента плавления. В течение каждого испытания проводится от 10 до 14 измерений σ и θ° с постоянной фиксацией температуры.

Параметры, выбранные для интерпретации экспериментальных профилей, представляют собой отношение d/D и h/D .

Существует однозначная зависимость между каждой парой этих отношений и формой капли, следовательно, углом θ° и полученным коэффициентом формы U :

$$U = \frac{\sigma}{\rho g D^2}$$

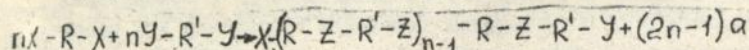
На основе экспериментальных значений d , h и D значения θ° и U /следовательно, и σ / получали на ЭИМ, при помощи расчетной программы.

Определены σ и θ° для наиболее распространенных в машиностроении марок чугунов и сталей. Углы смачивания такими расплавами исследуемых керамических образцов составляют $\theta^\circ = 128-136^\circ$. Полученные отливки имели гладкую поверхность без пригара,

$$R_z = 15+30 \text{ мкм.}$$

Дальнейшее повышение качества тонкостенных отливок возможно за счет дополнительной рафинирующей обработки жидкого металла путем разливки его через пенокерамический фильтр, изготовленный из карбида кремния или электрокорунда. Основой для изготовления таких фильтров является высокопористый углеродный материал с формой будущего изделия. Методика его получения заключается в пропитке эластичных полиуретановых поропластов органическими лаками и последующей их карбонизацией в инертной или восстановительной атмосфере по схеме: 1/ удаление легколетучих органических составляющих в процессе сушки до температуры 220-250 °С; 2/ высокотемпературный обжиг до температуры 1100-1200 °С. При этом карбонизированный полиуретан изменяет объемный вес от 0,07 до 0,2 г/см³.

Процесс гетерополиконденсации выражается уравнением:



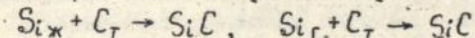
где X и Y - функциональные группы исходного вещества; Z - группа, связывающая остатки реагирующих молекул; α - молекула, выделяющегося простейшего вещества; R - радикал.

В результате получается пористый углеродный материал с содержанием

углерода 97-99 % и прочностью $\sigma_{\text{сж}} = 4-5$ МПа.

Получение фильтров из карбида кремния заключается в осаждении кремния из паровой фазы на углеродную пористую подложку. При нагреве кремний легко проникает в поры подложки, где протекают процессы адсорбции, конденсации и диффузии с образованием химического соединения с алмазоподобной решеткой.

Совместно с исследованиями макро- и микроструктур, химического и рентгеноструктурного анализов установлены температурные режимы карбонизации. Наиболее прочные покрытия $\sigma_{\text{сжс}} = 12-14$ МПа



получаются при температуре 2000-2200 °С. С повышением температуры 2300 °С происходит уменьшение толщины карбидного слоя, связанное с частичной диссоциацией SiC на кремний и углерод.

Метод получения фильтров из электрокорунда заключается в заполнении углеродистого материала суспензией на основе Al_2O_3 с последующей сушкой при температуре 220-250 °С и термообработкой при 1600-1650 °С.

5. Керамизация песчаных форм тонкими облицовками. Возможность получать тонкостенные отливки в песчаных формах без засоров, газовой шероховатости и с повышенной чистотой поверхности $R_z = 15-30$ мкм обеспечивается их керамизацией тонкими облицовками, $\delta = 2-3$ мм, выполненными из шликера на основе стабилизированного кремнезема.

Установлено, что при течении шликера в зазоре между песчаной формой и моделью изменение текучести происходит под действием двух факторов: капиллярного впитывания дисперсной среды и процесса структурирования. Величина капиллярного впитывания у форм, изготовленных из песка фракции $0,1 \pm 0,25$ мм больше, чем изготовленных из песка более крупной фракции - $0,315 \pm 0,63$ мм. Повышение текучести суспензии при ее движении по узким каналам песчаной формы осуществляется за счет: покрытия песчаной основы гидрофобными пленками из кремнийорганических жидкостей /ИМФ-29, МФ-50, КЭН-100/, характеризующихся наилучшим сочетанием гидрофобизирующих свойств, термостойкостью и газопроницаемостью; давления, прикладываемому к суспензии в начальный момент ее течения.

Время формирования структуры и период ее упрочнения зависит от концентрации отвердителя и регулируется в широком диапазоне.

Сушка керамизированных форм проводится при температуре 200-220 °С.

Результаты рентгеноструктурного анализа песчаной подложки с нанесенной на нее полимерной пленкой показали, что сущность гидро-

фобизирующего эффекта кремний-органических прослоек заключается в возникновении химических связей между полимерным слоем и гидрофильной поверхностью. При этом образуется невидимый полимерный слой толщиной $/4,5-5,0/ 10^{-5}$ см.

Кремнийорганические покрытия практически имеют ту же гидрофобность, что и парафиновые углеводороды, краевые углы смачивания их водой равны соответственно 110° и 105° . Водоотталкивающие пленки проницаемы для газов и воздуха, благодаря чему газопроницаемость керамизированной формы понижается всего на 5-6%. Кремнийорганические покрытия устойчивы к действию повышенных температур $\leq 500^{\circ}\text{C}$.

Установлено, что достаточным условием получения тонкостенных отливок без газовых пороков в керамизированной песчаной форме является последующая /после сушки/ тепловая обработка ее поверхностного слоя до 700°C . Теплофизические расчеты по определению такого прогрева керамической облицовки перегревом металла до начала затвердевания и подогревом формы, позволили построить номограммы управления тепловым режимом керамизированной формы для различных толщин $/\delta = 2-10$ мм/ и обеспечить их получение без газовых раковин и с гладкими поверхностями. Для отношений r/δ равным 5 и 7 температуру дегазации облицовки $/700^{\circ}\text{C}/$ получали при перегреве чугуна на $150-200^{\circ}\text{C}$ /рис. 5, а, линии 3 и 4/. Для $r/\delta = 3$ /линия 2/ дегазация облицовки достигалась высоким перегревом металла: $t_{np}/t = 0,23-0,25$. Для $r/\delta = 1$ кривая 1 перегрев металла не решал поставленной задачи. Это решение заключалось в совместном нагреве металла и подогреве формы /рис. 5, б, линия 1/. Для соотношений $r/\delta = 3,5$ и 7 показано /линия 2,3,4/, что с повышением толщины отливки, температура подогрева формы снижается.

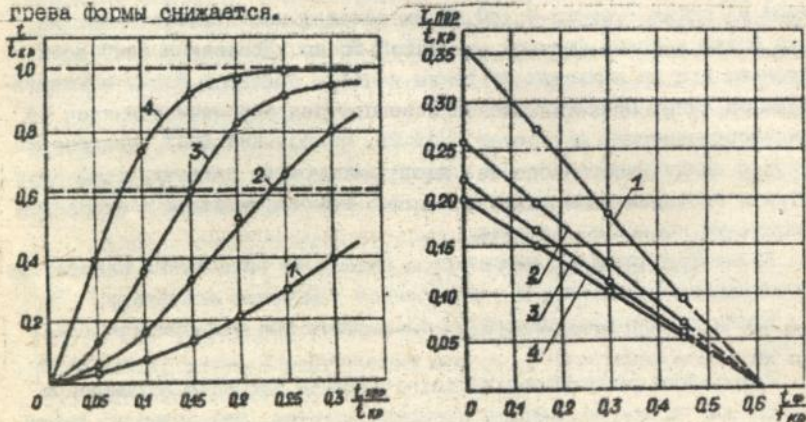


Рис. 5. Подогрев керамической облицовки до 700°C за счет:
 а/ перегрева металла; б/ совместного влияния перегрева металла и подогрева формы для отношений: 1- $r/\delta=1$; 2- $r/\delta=3$; 3- $r/\delta=5$; 4- $r/\delta=7$

6. Технологические процессы получения отливок повышенного качества

В повышении качества отливок практически равную долю вносят как свойства сплава, так и свойства литейной формы. В вопросе формирования геометрической точности отливки значение литейной формы преобладающее. На основании проведенных исследований разработаны технологические процессы, направленные на повышение геометрической точности отливок преимущественно тонкостенных, и на улучшение качества, применяемых сплавов. К таким методам относится усовершенствованный метод литья по удаляемым моделям и метод получения отливок в керамизированных формах. Разработанные двухкомпонентные формовочные смеси на основе стабилизированного кремнезема обладают одновременно свойствами огнеупорного наполнителя, а при взаимодействии с водой — связующими свойствами. Предложенные автором методы объемной сушки с использованием энергии СВЧ, гидротермальный метод формообразования, метод тиксотропного разжижения формочных масс обеспечили получение монослойной оболочки с необходимыми технологическими свойствами.

Улучшение качества сплавов, применяемых при литье по удаляемым моделям, достигается их фильтрацией через пенокерамические фильтры. Разработаны методы получения таких фильтров на основе карбида кремния или электрокорунда.

Внедрение разработанных технологий позволило в 2-2,5 раза снизить себестоимость тонкостенного литья, получить высокие эксплуатационные характеристики отливок и улучшить санитарно-гигиенические условия формовочных участков.

Общие выводы

Выполнен комплекс исследований экологически чистых процессов объемно-замкнутого формообразования для получения тонкостенных стальных и чугуновых отливок, к качеству которых предъявляются повышенные требования.

Впервые раскрыт механизм стабилизации распространенного формовочного материала диоксида кремния и определены условия, исключавшие эффект полиморфизма кварцесодержащих литейных оболочек.

Предложены принципиально новые технологические решения интенсификаций процесса стабилизации диоксида кремния и создания на его основе эффективного связующего. Разработаны методы литья в оболочковые монослойные формы при снижении энергоресурсного баланса расплавления и сохранении экологического равновесия с окружающей средой.

1. Экспериментально разработан и теоретически обоснован метод стабилизации диоксида кремния путем интенсивного перевода его в тридимит с помощью минерализаторов:

- показано, что катионы минерализаторов оказывают деформирующее воздействие на кристаллическую решетку кварца, величина которого пропорциональна соотношению размеров внедряющихся катионов;

- установлено, что катионы щелочных металлов в наибольшей степени способствуют созданию равновесных условий для интенсификации процесса тридимитизации;

- подтверждена гипотеза Айлера, что в равновесных условиях превращения кварца в тридимит осуществляется через промежуточную фазу метакристоболита.

2. Впервые предложены однокомпонентные формовочные системы типа наполнитель-связующий материал на основе стабилизированного кремнезема с содержанием оксида натрия 2-6 мас. %, что позволяет:

- обеспечить химическую однородность формовочных материалов и улучшение качественных характеристик оболочковых форм;

- создать методы формирования однослойных оболочек с использованием эффекта тиксотропного разжижения.

3. Представлена физико-химическая модель изменения поверхности диоксида кремния в процессе формообразования, включающая модифицирование и активацию поверхности SiO_2 ионами натрия; протонирование поверхности стабилизированного кремнезема и образование вместо ионных связей $-O-Na$ более прочных ковалентных $-O-H$; конденсацию силанольных групп при температуре сушки с возникновением на смежных поверхностях радикалов типа $\geq Si$ и $\geq Si-O$; полимеризацию Si_nO_{2n} с образованием силоксановой связи $Si-O-Si$, связывающей высокодисперсные частицы в прочную термостойкую оболочку.

4. Исследованы и рекомендованы для процессов объемно-замкнутого формообразования на основе стабилизированного кремнезема ионогенные поверхностно-активные вещества /диталан, сульфанол, метаупон/ в количестве 0,05-0,2 % от массы суспензии. Применение таких ПАВ обеспечивает смачиваемость водной суспензией гидрофобных моделей, высокий эффект разжижения стабилизированных суспензий, позволяющий на 16-20 % повысить содержание в суспензии диспергированной фазы, а при концентрациях 0,15-0,2 % ПАВ структурировать суспензию для получения плотного, прочного, не сползающего с блока моделей слоя покрытия.

5. Установлено, что одной из стабилизированных форм диоксида кремния является высокопористый аморфный кремнезем-диатомит. Применение диатомита в процессах объемно-замкнутого формообразования как

наполнителя, связующего и обсыпного материала обеспечивает стабильность параметров оболочковой формы при высоких температурах и повышает геометрическую точность отливок.

6. Анализом напряженно-деформационного состояния оболочковых форм установлено, что использование 18-22 % высокопористого диатомиита приводит к релаксации температурных напряжений, повышению трещиностойкости, термостойкости, податливости, газопроницаемости и теплоизолирующих свойств оболочек, позволяет проводить их заливку без опорного наполнителя.

7. Предложен гидротермальный метод получения тонкостенных стержней на основе стабилизированного кремнезема, заключающийся в обработке диспергированных систем перегретым паром и их упрочнении до уровня $\sigma_{\text{сж}} = 12-14$ МПа, что позволяет исключить высокотемпературное спекание стержней.

8. Разработан технологический процесс и организован промышленный выпуск стабилизированного кремнезема. Себестоимость производства СК намного ниже себестоимости жидкого стекла: в 15-25 раз меньше расходуется дефицитной кальцинированной соды, в 4-5 раз сокращается расход условного топлива без учета дополнительных затрат на растворение силикат-глыбы, в 3-4 раза уменьшаются трудозатраты.

9. Разработан метод объемной сушки оболочковых форм электрическим полем сверх высокой частоты, позволяющий обеспечить максимально возможную интенсивность и высокое качество процесса. Установлено, что необходимым условием сохранения целостности керамической оболочки является дискретный режим СВЧ-сушки, сочетающий нагрев формы с последующим ее обдувом воздухом. Рабочая частота электрического поля составляет 2450 МГц, плотность энергии 7100-7300 Вт на 1 м³ объема сушильной камеры.

10. Радикальным средством улучшения качества поверхности отливок является керамизация песчаных форм тонкими /2-3 мм/ облицовками, получение которых зависит от текучести суспензии и процесса ее взаимодействия с формой.

Предложенная гидрофобизация песчаных форм кремнийорганическими термостойкими пленками устраняет капиллярное впитывание дисперсионной среды суспензии, повышает ее текучесть, обеспечивает качественное формирование облицовки и является барьером для проникновения влаги из песчаной основы формы в облицовку.

II. Теплофизическими расчетами установлена и экспериментально подтверждена возможность дегазации керамической облицовки песчаных форм при получении чугуновых отливок за счет:

- перегрева металла не более чем на 200-250 °С для отливок с толщиной стенки 6-10 мм;
- перегрева металла на 250 °С и подогрева формы на 400 °С для отливок с толщиной стенки 3-6 мм.

12. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана технология получения пенокерамических фильтров на основе карбида кремния и электрокорунда для высокотемпературных сплавов:

- представлен метод получения высокопористого углеродного материала, заключающийся в пропитке полиуретановых поропластов органическими лаками с последующей их карбонизацией в инертной атмосфере;

- установлено, что наиболее эффективным методом получения термостойких высокопрочных фильтров из карбида кремния является осаждение кремния из паровой фазы на пористую углеродную подложку при температуре 2000-2200 °С;

- показано, что изготовление пенокерамических электрокорундовых фильтров заключается во внедрении электрокорундового шликера центробежным методом в углеродистую подложку и последующем высокотемпературном обжиге;

- определено, что применение разработанных фильтров позволяет на 60-70 % снизить брак отливок по неметаллическим включениям и на 18-20 % повысить ударную вязкость литых деталей.

13. Разработанный комплекс технологических процессов, позволяющий принципиально усовершенствовать специальные способы литья, включает:

- промышленное изготовление стабилизированного кремнезема с заданными свойствами;
- получение оболочковых форм без органических связующих;
- керамизацию песчаных форм тонкими облицовками;
- гидротермальный метод получения тонкостенных стержней;
- изготовление термостойких пенокерамических фильтров для очистки расплавов.

Внедрение разработанных технологий решает проблему улучшения качества отливок, экологии, энерго- и ресурсосбережения их производства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО
В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Отливка тонкостенных чугунных деталей в керамические формы // Точность обработки металлов в машиностроении. - Кишинев. - 1972. - С.21-22.
2. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Способ изготовления точнолитой оснастки // Точность обработки металлов в машиностроении. - Кишинев. - 1972. - С.23-24.
3. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Пути повышения качества литых поверхностей тонкостенных отливок // Проблемы технологичности конструкций изделий в машиностроении. - Брянск. - 1974. - С.42-44.
4. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Исследование процессов влагопереноса в песчано-керамических формах диска триера // Совершенствование технологии литейного производства и повышение качества литых деталей. - Орел. - 1974. - С.27-29.
5. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Совершенствование технологического процесса отливки дисков триеров // Совершенствование технологии литейного производства и повышение качества литых деталей. - Орел. - 1974. - С.30-32.
6. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А. Применение песчано-керамических форм // Технология и организация производства № 6. - Киев, 1975. - С.18-20.
7. Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Керамизация песчаных форм - метод повышения качества отливок // Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей. - Одесса, 1975. - С.106-107.
8. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А., Юрченко В.В. Оптимизация керамизированных песчаных форм // Повышение точности отливок и эксплуатационной надежности литых деталей. - Одесса, 1975. - С.105-106.
9. Селиванов Ю.А., Чмых И.Д. Особенности изготовления песчано-керамических форм // Сб. трудов ин-та Гидромаш, Кишинев, 1976. - С.31-32.
10. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А. Особенности тепловой обработки песчано-керамических форм для получения тонкостенных отливок

// Прогрессивные технологические процессы производства отливок из различных сплавов. - Саратов. - 1976. - С. 57-58.

11. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А. Условия получения отливок без засоров и газовых пороков // Неметаллические включения и газы в литейных сплавах. - Запорожье. - 1976. - С. 51-52.

12. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А. Получение отливок в песчано-керамических формах // Литейное производство. - 1977. - № 6. - С. 21-23.

13. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Развитие методов керамизации литейных форм // Развитие методов и процессов образования литейных форм. - Москва, 1977. - С. 139-144.

14. Оболенцев Ф.Д., Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Получение высококачественных отливок сложной конфигурации // Повышение качества продукции литейного производства. - Киев: ИГи АН УССР, 1978. - С. 70-71.

15. Оболенцев Ф.Д., Становский А.Л., Селиванов Ю.А. Неразрушающий контроль плотности оболочковых форм // Известия высших учебных заведений "Черная металлургия", Москва. - 1978. - № 6. - С. 124-127.

16. Оболенцев Ф.Д., Селиванов Ю.А. Особенности тепловой обработки песчано-керамических форм при получении тонкостенных отливок // Прогрессивные технологические процессы производства отливок. - Саратов, 1978. - С. 56-57.

17. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А., Кучмий Н.И. Совершенствование изготовления оболочковых форм // Повышение качества отливки и эффективности производства. - Уфа. - 1986. - С. 26-27.

18. Селиванов Ю.А., Кучмий Н.И. Разработка малоотходной технологии получения оболочковых форм // Пути сбережения ресурсов. - Одесса, 1986. - С. 17-19.

19. Селиванов Ю.А., Новиков В.В. Моделирование теплофизических и термоупругих свойств керамических форм // Пути сбережения ресурсов. - Одесса, 1986. - С.

20. Селиванов Ю.А. Совершенствование технологии литья по выплавляемым моделям // Прогрессивные формовочные смеси и технологические процессы. - Минск, 1987. - С. 39-41.

21. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Особенности получения оболочковых форм на основе водного шликера // Совершенствование технологических процессов при производстве отливок. - Омск. - 1987. -

С. 12-14.

22. Селиванов Ю.А. Совершенствование технологии изготовления тонкостенных отливок // Фосфатные ХТС и технология получения на их основе высококачественных отливок. - Липецк, 1987. -

23. Селиванов Ю.А. Ресурсосберегающая и экологически чистая технология получения литейных форм и стержней // Интенсификация технологических процессов в литейном производстве. - Барнаул. - 1989. - С. 39-40.

24. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Процессы формообразования на основе стабилизированного кремнезема // Перспективы применения регенерации песков при малотходной технологии получения отливок. - Челябинск, 1988. - С. 22-23.

25. Селиванов Ю.А. Однокомпонентная система "наполнитель-связующее" для изготовления оболочковых форм // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса, 1988. - С. 15-16.

26. Селиванов Ю.А. Экологические проблемы литейного производства и пути их решения // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса, 1988. - С. 12-13.

27. Черниенков В.В., Селиванов Ю.А. Многосекторная литейная форма // Технология и организация производства № 2. - Киев, 1988. - С. 77-78.

28. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Особенности изготовления оболочковых форм на основе водного шликера // Литейное производство. - 1989. - № 9. - С. 21-23.

29. Селиванов Ю.А. СВЧ-энергия в процессах формообразования ЛМ // Повышение качества и эффективности литья по выплавляемым моделям. - Москва, МДНТИ, 1989. - С. 91-97.

30. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Исследование гетерогенных систем на основе стабилизированного кремнезема // Известия вузов "Черная металлургия". - Москва, 1989. - № 6. - С. 116-129.

31. Селиванов Ю.А. Исследование гидротермальных процессов изготовления тонкостенных стержней // Современные направления повышения качества литых заготовок

32. Селиванов Ю.А. Оптимизация и экология ЛМ // Повышение эффективности литейного производства. - Ленинград, 1990. - С. 87-89.

33. Селиванов Ю.А. Экологические требования к литейному производству и пути их решения // Научно-методологические основы биосферосовместимых технологий. - Одесса, 1990. - С. 62-63.
34. Селиванов Ю.А. Изготовление двухслойных оболочковых форм // Литейное производство. - 1990. - № 7. - С. 23-24.
35. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Изготовление тонкостенных стержней из стабилизированного кремнезема // Литейное производство. - 1990. - № 8. - С. 14-15.
36. Решение по заявке № 4849906/02 на выдачу авторского свидетельства "Противпригарное покрытие для газифицируемых моделей" / О.И.Шинский, Н.Г.Черненко, А.И.Валигура, А.Ю.Сичугов, Т.В.Трояновская, Е.Ф.Князев, Ю.А.Селиванов // Москва, 1990.
37. Селиванов Ю.А. Экологические проблемы процессов формообразования // Литейное производство. - 1990. - № 8. - С. 28-29.
38. Селиванов Ю.А. Получение тонкостенных отливок по газифицируемым моделям // Литейное производство. - 1991. - № 6. - С. 21-22.
39. Селиванов Ю.А., Азаров Э.В. Пенокерамические фильтры для высокотемпературных расплавов // Литейное производство. - 1991. - № 12. - С. 11-12.
40. Селиванов Ю.А., Иванова Л.А. Процессы формообразования на основе стабилизированного кремнезема. - Киев: Лыбидь, 1991. - 227 с.
41. Селиванов Ю.А. Биосферосовместимые технологии объемно-замкнутого формообразования // Литейное производство и окружающая среда. - Минск. - 1992.
42. Селиванов Ю.А., Огородников Г.Д., Дымов В.Ф. Решение экологических проблем в ЛМ // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1990. - С. 57-58.
43. Селиванов Ю.А., Таленкевич В.Ш., Усенко В.П. Методы устранения недостатков процесса ЛМ // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1990. - С. 75-76.
44. Селиванов Ю.А. Пенокерамические фильтры для рафинирования жидкого металла // Литейное производство и окружающая среда. - Минск. - 1992. - С. 63-64.
45. Селиванов Ю.А. Метод получения тонкостенных отливок по-

вышенного качества // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1992. - С. 38-39.

46. Селиванов Ю.А., Музыченко Р.Л., Замятин Н.И. Процессы объемнозамкнутого формообразования на бесвязующей основе // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1993. - С. 26.

47. Селиванов Ю.А., Лях О.В. Физико-химическая модель состояния поверхности стабилизированного кремнезема // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1993. - С. 27.

48. Селиванов Ю.А., Васильев Р.В. Пенокерамические фильтры для ЛМ // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1993. - С. 68.

49. Иванова Л.А., Селиванов Ю.А. Биосферасовместимые технологии для литейного производства // Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. - Одесса. - 1993. - С. 93.

50. А.с. 263783 СССР. Шихта для плавки / П.И. Четвериков Ю.А. Селиванов, А.М. Егоров // Открытия. Изобретения. - 1970. - № 8. - С. 25.

51. А.с. 350616 СССР. Флюс для плавки / И.В. Липтуга, Н.А. Кривых, Ю.А. Селиванов // Открытия. Изобретения. - 1972. - № 23. - С. 36.

52. А.с. 392051 СССР. Керамическая смесь / И.В. Липтуга, К.М. Гончар, Ю.А. Селиванов // Открытия. Изобретения. - 1973. - № 32. - С. 27.

53. А.с. 399301 Литейная форма / И.В. Липтуга, В.Н. Клюенко, К.М. Гончар, Ю.А. Селиванов и В.А. Вахчеван // Открытия. Изобретения. - 1973. - № 39. - С. 29.

54. А.с. 414040 СССР. Способ изготовления литейной формы / И.В. Липтуга, К.М. Гончар, Ю.А. Селиванов // Открытия. Изобретения. - 1974. - № 5. -

55. А.с. 515568 СССР. Литейная двухслойная форма / Ю.А. Селиванов, Э.В. Азаров // Открытия. Изобретения. - 1976. - № 20. - С. 25.

56. А.с. 524598 СССР. Литейная форма / Ф.Д. Оболенцев, Ю.А. Селиванов // Открытия. Изобретения. - 1976. - № 30.

57. А.с. 604622 СССР. Способ получения отливок пористых литейных формах / Ф.Д. Оболенцев, Ю.А. Селиванов, Ф.Д. Оболенцев // Открытия. Изобретения. - 1978. - №

58. А. с. 674828 СССР. Способ получения, Ф. Д. Оболенцев // Открытия. С. 41.

59. А. с. 899614 СССР. Керамическая смесь / Ю. А. Селиванов, В. П. Кирилишин // Открытия. Изобретения. - 1982. - № 3. - С. 41.

60. А. с. 954138 СССР. Смесь теплового отверждения для изготовления литейных форм и стержней / Ю. А. Селиванов, В. П. Кирилишин // Открытия. Изобретения. - 1982. - № 32. - С. 44.

61. А. с. 1063535 СССР. Литейная форма / А. С. Жилко, К. М. Гончар, И. Э. Джуринский, Ю. А. Селиванов, А. И. Алексеенко, Н. В. Федин // Открытия. Изобретения. - 1983. - № 48. - С. 47.

62. А. с. 1227325 СССР. Форма для получения отливок типа тел вращения / В. В. Черниенко, А. К. Машков, Ю. А. Селиванов // Открытия. Изобретения. - 1986. - № 16. - С. 27.

63. А. с. 1353565 СССР. Способ изготовления керамических ободочек / Ю. А. Селиванов, В. П. Кирилишин, С. А. Василенко, Н. И. Кучмий // Открытия. Изобретения. - 1987. - № 43. - С. 50.

64. А. с. 1404167 СССР. Способ получения стержней и форм / Ю. А. Селиванов, В. П. Кирилишин // Открытия. Изобретения. - 1988. - № 23. - С. 64.

65. А. с. 1692720 СССР. Способ изготовления керамических форм / Ю. А. Селиванов, Л. А. Иванова // Открытия. Изобретения. - 1991. - № 43. - С. 35.

1988