

Национальная Академия наук Украины
Физико - технологический Институт металлов и сплавов

УДК 621.74.045

На правах рукописи

Шинский Олег Иосифович

**Газогидродинамика и технологии литья железоуглеродистых и
цветных сплавов по газифицируемым моделям**

Специальность 05.16.04 - Литейное производство.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

КИЕВ - 1997



00751183 (P)

Диссертация на правах рукописи

Работа выполнена в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук,

профессор Борисов Георгий Павлович

доктор технических наук, профессор Макаревич Александр Павлович

доктор технических наук, профессор Мысик Раиса Константиновна

Ведущая организация - Государственная Металлургическая
Академия, г. Днепропетровск

Защита состоится "10" ИЮЛЯ 1997 года в 10⁰⁰ часов на заседании специализированного ученого совета Д 01.97.01. Физико - технологического института металлов и сплавов НАН Украины.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико - технологического института металлов и сплавов НАН Украины по адресу г. Киев, пр. Вернадского 34/1.

Автореферат разослан "6" ИЮНЯ 1997 г.

Ученый секретарь специализированного ученого совета
Д 01.97.01. доктор технических наук Е.Г. Афтандиянц.

Развитие современного машиностроения выдвигает требования существенного повышения качества, надежности и долговечности литых деталей, при одновременном повышении размерной и массовой точности литых заготовок, приближающихся к готовым изделиям.

Большой вклад в создание и развитие теории и технологии специальных методов литья, в том числе по газифицируемым моделям, внесли известные ученые Г.П. Борисов, В.А. Ефимов, Б.Б. Гуляев, А.А. Рыжиков, Ю.А. Степанов, В.С. Шуляк и др.

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что успешное решение этой задачи достигается использованием в литейной практике прогрессивных методов получения точных литых заготовок, к которым относится литье по газифицируемым моделям (ГМ).

Литье по газифицируемым моделям широко применяется в мировой практике, объем производства которого уже составил 600 тыс./год, а к 2000 г. прогнозируется увеличение до 2500 тыс. т./год. Распространение данного метода литья объясняется снижением массы литых заготовок, уменьшением объемов механической обработки, низкими ресурсо- энергозатратами, капитальными вложениями на перевооружение и организацию производства, повышением физико-механических характеристик и потребительских свойств литых деталей.

Литье по газифицируемым моделям отличается от других известных способов получения отливок наличием в период заливки в полости литейной формы модели из пенополистирола, которая под действием тепловой энергии заливаемого расплава подвергается термодеструкции с образованием парогазовых, жидких и твердых продуктов, что предопределяет гидродинамику заполнения формы, ее газовый режим и условия формирования физико - механических и потребительских свойств отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов.

Анализ современного состояния теории и практики литья по газифицируемым моделям позволил выявить несовершенство ряда теоретических представлений, узкую направленность технологических решений, инженерных методов оптимизации параметров литья, отсутствие комплексности при описании процессов формирования отливок и создании специализированного оборудования для организации серийного или массового производства точных заготовок из железоуглеродистых и цветных сплавов.

Причем физические и математические модели, описывающие процессы, происходящие при использовании данной технологии литья также носят, в большинстве случаев, эмпирический характер. Недостаточно изучен механизм взаимодействия продуктов

термодеструкции пенополистирола с жидким, затвердевающим металлом, формой и покрытием, к тому же, отсутствуют данные о влиянии избыточного высокого давления на формирование качества отливок полученных по газифицируемым моделям.

В связи с этим, в настоящей работе поставлена цель изучить закономерности газогидродинамики и взаимодействия пенополистирола, продуктов его термодеструкции в системе "металл - модель - покрытие - форма." и на этой основе разработать перспективные методы литья по газифицируемым моделям, создать оборудование и методы расчетов оптимальных параметров технологии для организации серийного и массового производства точных отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов.

В работе решены следующие задачи:

- разработаны и реализованы методики физического моделирования и натурного эксперимента для исследований гидрогазодинамических процессов движения расплава в форме, влияния технологических параметров на качество поверхности литых заготовок, формозаполняемость, физико-механические, технологические свойства металла отливок.
- разработаны универсальные физические и математические модели газогидродинамических процессов заполнения формы с верхним и нижним подводом металла при гравитационной заливке, под давлением; затвердевания и охлаждения металла; описаны механизмы остановки потока расплава, формирования пригара на поверхности и структуре отливок, структуры отливок при литье по газифицируемым моделям, адекватность которых подтверждена с помощью натуральных экспериментов и путем физического моделирования;
- исследованы закономерности условий заполнения формы, ее газовый режим, формирование пригара на отливках из железоуглеродистых и цветных сплавов при верхнем, нижнем подводе металла при гравитационной заливке и под избыточным регулируемым давлением;
- разработаны методы расчета оптимальных технологических параметров литья по газифицируемым моделям, сформулированы основные требования к противопригарным покрытиям; даны рекомендации для расчета и оптимизации геометрии литниково-питающих систем;
- разработаны новые оригинальные технологические процессы получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов при литье по газифицируемым моделям с гравитационной заливкой и под давлением, определены область их применения и экономическая целесообразность;

- создан комплекс технологического оборудования, включая средства экологической защиты, обеспечивающий организацию производства точных отливок из железуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям в объеме от 100 до 10000 тысяч тонн в год.

Обобщение полученных в настоящей работе научных результатов и их реализация в промышленности позволили определить новизну и практическую ценность технологических разработок:

Научная новизна. Созданные физические и математические модели газогидродинамики литья по газифицируемым моделям с гравитационной заливкой при верхнем и нижнем подводе металла, а также под регулируемым высоким давлением, впервые учитывают комплекс основных определяющих технологических факторов: фильтрацию образующихся при линейной и объемной термодеструкции полистирола парогазовых продуктов через пористую среду формовочного материала, влияние зоны низкой газопроницаемости, вызванной конденсацией их на его зернах, противопопригарное покрытие, а также величины переменной скорости, как функции сечения формы (отливки).

Разработана математическая модель охлаждения и затвердевания металла в форме с газифицируемой моделью при нижнем, верхнем подводе металла и под давлением, в которой учтены дополнительные тепловые потери расплава на термодеструкцию модели.

Установлен и экспериментально подтвержден механизм остановки потока металла в форме с газифицируемой моделью, который носит многостадийный характер и учитывает интенсивные тепловые потери металла на термодеструкцию модели в головной части потока, а также наличие противодействия часто превышающего металлостатический напор.

Описан механизм формирования пригара при литье по газифицируемым моделям, который связан с взаимодействием расплава с продуктами термодеструкции модели, сконденсировавшимися в порах противопопригарного покрытия, и вторичной их газификацией за счет теплоты затвердевающего металла.

Созданы физические и математические модели взаимодействия продуктов термодеструкции полистирола с расплавом при литье с гравитационной заливкой, которые учитывают смачиваемость фронта потока металла жидкой фазой, образующейся при термодеструкции модели, что позволило установить различие в механизме формирования дефектов на поверхности отливок из железуглеродистых и цветных сплавов.

Определен и описан с помощью математической модели механизм взаимодействия продуктов термодеструкции газифицируемой модели с поверхностью жидкого, затвердевающего металла при наложении высокого давления, который основывается на выдавливании жидкой фазы продуктов термодеструкции из системы "металл-модель" и образовании тонкой пленки на контактной поверхности "металл - форма", что позволило объяснить идентичность механизма формирования дефектов в отливках из железоуглеродистых и цветных сплавов при наложении избыточного давления.

В целях апробации и экспериментальной проверки разработанных физических и математических моделей были созданы специальные методики физического моделирования и натурных экспериментов, которые позволили подтвердить их достоверность и при этом установить следующие закономерности:

- противодействие парогазовых продуктов термодеструкции в зазоре "металл - модель" (δ_1) при нижнем, и верхнем подводе металла и гравитационной заливке значительно превышает этот показатель в полый форме и достигает значений в начальный ($P_{\phi}^{\max}$) и установившейся период (P_{cp}) - 8 ± 24 КПа и $0,8 \pm 4$ КПа.
- наличие высокого противодействия парогазовой фазы термодеструкции модели в зазоре (δ_1) видоизменяет характер, величину скорости движения металла в форме (W_1) при гравитационной заливке и обуславливает ее снижение на 20-250% по сравнению с аналогичной при литье в полые формы.
- заполнение формы сложного, переменного сечения с заданной скоростью при гравитационной заливке затруднительно или невозможно, так как скорость W_1 зависит от постоянно изменяющихся металлостатического напора, площади сечения формы, но при наложении регулируемого давления на жидкий металл, когда выполняется условие $W_1 = \text{const}$, движение металла с заданной скоростью в форме переменного сечения реализуемо.
- заполняемость формы с газифицируемой моделью ниже в 1,3-3,0 раза чем при литье в полые песчаные формы при гравитационной заливке, но при литье под высоким давлением этот показатель на 10 - 15% выше чем при литье в полые песчаные формы,
- термодеструкция пенополистироловой модели при наложении избыточного давления и высоких скоростях заполнения формы ($W_1 > 50 \text{ мм/с}$) отличается от таковой при гравитационном литье соотношением между образовавшимся жидкими (ЖФ), парогазовыми (ПГФ) и твердыми продуктами (ТФ) термодеструкции, которая не

зависит от температуры и вида заливаемого сплава, а при $W_1 > 80 \text{ мм/с}$ это соотношение становится величиной постоянной.

Качество поверхности отливки при гравитационном литье определяется смачиваемостью ЖФ поверхности фронта потока расплава, для несмачиваемых железоуглеродистых сплавов объем дефектов на поверхности в 1,5-3 раза выше, чем на отливках из медных сплавов, которая смачивается ЖФ, но наложение давления на жидкий металл исключает влияние смачиваемости и создает равные условия для формирования дефектов на поверхности отливок из различных сплавов FeC- и Cu сплавов, причем количество дефектов ниже, чем при гравитационном литье в 2.5 - 10 раз.

- наложение избыточного давления на жидкий и кристаллизующийся металл позволяет повысить механическую прочность и снизить пористость материала отливок из углеродистых, нержавеющей сталей, высокопрочных и серых чугунов на 15- 25%, в сравнении с гравитационным литьем этих сплавов.

~ пористость и газопроницаемость противопригарного покрытия (ПП) зависят от структуры огнеупорного наполнителя и вида связующего материала; причем эти характеристики покрытий на водной основе в 3,2-5,0 раз выше, чем на спиртовой, но коэффициент фильтрации ПГФ через ПП предопределяется газопроницаемостью, которая меньше 10 ед., что позволяет утверждать о нецелесообразности применения ПП - с газопроницаемостью, превышающей эту величину;

Определены теплофизические константы формы с пенополистироловой моделью в период ее заполнения и теплотери на ее термодеструкцию при литье железоуглеродистых и цветных сплавов, что позволяет реализовать созданные математические модели для компьютерного проектирования технологических процессов.

Практическая ценность. На основании изучения газогидродинамики, взаимодействия продуктов термодеструкции пенополистирола с жидким и затвердевающим металлом отливок, а также формировании их физико- механических свойств были созданы новые процессы с применением газифицируемых моделей в т.ч.

• технологический процесс получения отливок из железо углеродистых и цветных сплавов в вакуумируемых и магнитных формах с гравитационной заливкой с нижним и верхним подводом металла;

• технологический процесс получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов под высоким регулируемым давлением, получивший фирменное название "ТАМОДАР - процесс", а так же роторная и контейнерная технологии получения отливок;

Для реализации разработанных технологических процессов создана комплексная методика расчета, оптимизации их параметров и гамма оборудования, как для гравитационной заливки, так и под давлением, что позволяет организовать специализированные участки, цеха и заводы литья по газифицируемым моделям мощностью 100 - 10000 т/год., что позволяет снизить массу литых деталей на 10-20%, повысить КИМ до 90 - 97%, механические характеристики отливок на 10- 20% и одновременно снизить капитальные затраты и производственные площади в 2 -4 раза, исключить полностью трудоемкие и вредные производства, а также сократить на 70 - 80% объем финишных операций; расход шихты и вспомогательных материалов на 15-30%, энергоносителей на 20 ÷30% и объем вредных выбросов в 8 -10 раз.

С использованием созданных технологий освоено производство отливок на предприятиях России, Украины и Румынии в объеме не менее 3000 т/год., что позволило достигнуть экономического эффекта не менее чем 500.000 гривен в год и реализовывать лицензии в виде контрактов на сумму 200.000 долл. США.

На защиту выносятся: 1. Физические и математические модели газогидродинамики, взаимодействия с продуктами термодеструкции жидкого и затвердевающего металла, формозаполняемости, остановки потока, образования пригара и физико - механические характеристики покрытий, а также закономерности формирования физико - механических и технологических свойств отливок из железо - углеродистых и цветных сплавов при литье гравитационной заливкой и под давлением.

2. Результаты исследований влияния основных технологических факторов, структурных характеристик формы, покрытия, модели и геометрии отливки (формы) и литниково - питающих систем на характер и величину противодействия в форме, скорости движения в нем расплава, а также формозаполняемости при литье по газифицируемым моделям железоуглеродистых и цветных сплавов.

3. Закономерности и математические модели, описывающие особенности термодеструкции модели при наложении высокого давления, взаимодействия их с жидким металлом и формирования качества и потребительских свойств отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов.

4. Методики физического моделирования и натурального эксперимента для исследования процессов литья по газифицируемым моделям.

5. Технологические процессы, получения отливок, универсальные методы расчета технологических параметров, и геометрии литниковых систем с верхним, нижним подводом металла и под регулируемым

давлением, а также методики компьютерной оценки достоверности и прогнозирования условий формирования качества отливок при литье по газифицируемым моделям железоуглеродистых и цветных сплавов при гравитационном литье и под давлением.

6. Комплекс оборудования для подготовки пенополистирола, изготовления из него моделей, приготовления и нанесения на них противопопригарных покрытий, формовки и гравитационной заливки металла и под высоким регулируемым давлением для серийного и массового производства отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов.

7. Техничко - экономические расчеты и обоснования применения разработанных методов получения точных отливок массой до 500 кг. для авто - сельхоз машиностроения, нефтяной и химической промышленности, арматуростроения и специальной техники.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на 20 международных, всесоюзных и украинских конференциях и семинарах, в т.ч. на 62^м Международном конгрессе литейщиков (МКТАЛ) (Филадельфия, апрель 1996г.), III Всесоюзном научно-техническом съезде литейщиков (г. Вологда, сентябрь 1989г.), II Всероссийском научно - техническом съезде литейщиков (Ульяновск, май 1995г.), Международной конференции "ЭКОЛИТ - 93" (г. Минск, май 1993г.), II Международном конгрессе металлургов (г. Бухарест, сентябрь 1995г.), Научно - технической конференции литейщиков КНР И СНГ (г. Харбин, август 1992г.), Международном конгрессе материалов и технологии в машиностроении (г. Тегеран, декабрь 1996г.), Всесоюзных конференциях "Литье по газифицируемым моделям" (июнь 1976г., январь 1991г.) и др.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 43 научных работ, получено 22 авторских свидетельства и патента на изобретение.

Объем работы: Диссертация изложена на ___ страницах машинописного текста, состоит из пяти глав, общих выводов, содержит ___ рисунков, ___ таблиц, список литературы из ___ наименований и приложение.

Содержание работы:

1. Теория и практика литья по газифицируемым моделям.

Анализ современного состояния теории и практики литья по газифицируемым моделям позволил выявить несовершенство теоретических представлений, узконаправленность технологических решений, инженерных методов расчета технологических параметров,

отсутствие комплексности при создании нового класса оборудования и организации производства. Так, известные физические и математические модели, описывающие процессы заполнения форм, ее газовый режим носят эмпирический характер, не учитывают влияние температурных потерь при термодеструкции ГМ, конденсацию ее ПГФ на материале формы, роль ПП при эвакуации продуктов деструкции ГМ, кинетику изменения противодавления в форме при ее заполнении. Не достаточно изучен механизм остановки потока в форме, хотя интенсивность теплоотвода на границе "металл-модель" и контактной поверхности "металл - жидкая фаза - форма" может значительно превосходить аналогичную при литье в полые формы, к тому же, отсутствуют данные о теплофизических константах формы в период ее заполнения. Недостаточно изучен механизм взаимодействия продуктов деструкции ГМ с жидким и затвердевающим металлом.

Совершенно не исследована область литья по газифицируемым моделям при наложении избыточного (газового, механического) давления в период заполнения, затвердевания и охлаждения металла и недостаточно изучены условия получения отливок при верхнем подводе металла в случае гравитационной заливки. Отсутствуют универсальные инженерные методы расчета и программы для ЭВМ по расчету, выбору материалов и технологических параметров литья по газифицируемым моделям. Известные в практике методы экологической защиты субъектов и объектов носят частный характер, а методы и системы обезвреживания конденсата продуктов термодеструкции ГМ на формовочном материале и вовсе отсутствуют. Отсутствие комплексных подходов при проектировании оборудования для литья по газифицируемым моделям и организации его производства формовочно - заливочные комплексы еще уступают по производительности современным автоматическим линиям литья в песчаные формы.

С целью получения основополагающих представлений о формировании качества отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов широкой номенклатуры и различного назначения необходимо было разработать методики исследований и изучить с использованием моделирования и натурального эксперимента гидрогазодинамические процессы, происходящие при заполнении формы, особенности формирования поверхности литых заготовок, формозаполняемости, физико-механические свойства противопригарных покрытий при литье по газифицируемым моделям с верхним, нижним подводом металла при гравитационной заливке и под избыточным давлением. На основе этих исследований разработать методы расчета и выбора основных технологических параметров, создать и освоить в производстве новые технологические процессы получения отливок из железоуглеродистых и

цветных сплавов при литье по газифицируемым моделям с гравитационной заливкой и под давлением.

2. Основные теоретические представления о газодинамике и взаимодействии продуктов термодеструкции модели в системе "металл-модель-покрытие форма" литья по газифицируемым моделям.

Литье по ГМ во всех своих разновидностях отличается от других известных способов получения отливок наличием модели в полости литейной формы в период ее заливки. При этом способе литье под действием тепловой энергии расплавленного металла ГМ разлагается с образованием ЖФ, ПГФ и ТФ, которая предопределяет газогидродинамику и условия формирования качества отливок.

Первоначально были установлены особенности движения расплава в форме при нижнем подводе металла и гравитационной заливке, когда в начальный период времени (рис 1. а) расплав через стояк и литниковую систему поступает в нижнюю часть формы, где под действием теплоты жидкого расплава g_5 модель начинает разлагаться с образованием ЖФ, ПГФ и ТФ. При этом образуется зазор δ_1 , величина которого в этот период минимальная $\delta_1^{\min}$. Образовавшаяся ПГФ формирует противодавление в форме P_{ϕ} , величина которого в этот период максимальная $P_{\phi}^{\max}$. Это создает дополнительные потери металлостатического напора $(H_1 - P_{\phi}^{\max} / \rho_1 g)$ и приводит к значительному снижению и даже изменению направления вектора скорости $\vec{W}_1$ (рис.1.а). В этот период изменение W носит колебательный характер.(рис.1.а.). В последующий, т.н. установившийся период (Рис 1.в) величина зазора δ_1 стабилизируется, что приводит к снижению и стабилизации противодавления в форме P_{ϕ} , при этом потери металлостатического напора за счет уменьшения противодавления снижаются $(H_1 - P_{\phi} / \rho_1 xg)$, но суммарные потери напора выше, чем при литье в полые формы $(H_1 - y_1)$ (рис 1.г. кр. 1 и 2), к тому же образовавшиеся ЖФ скапливаются на фронте потока расплава в виде сфероидов (или тонкой пленки "д") (рис.1. д), а затем под действием конвективных потоков смещаются на поверхность раздела "форма - металл". Окончательная стадия заполнения формы происходит без модели (рис. 1.ж). Суммарные потери напора в этот период определяются уровнем металла в форме $(H_1 - y_1)$, а накопившаяся ранее ЖФ смещается на боковую поверхность или прижимается к верхней стенке формы.

В этом случае установлено, что газодинамика эвакуации ПГФ в форму определяется величиной градиента $(P_{\phi} - P_0)$, где P_0 -разряжение или атмосферное давление в форме, через ПП, где и конденсируется в

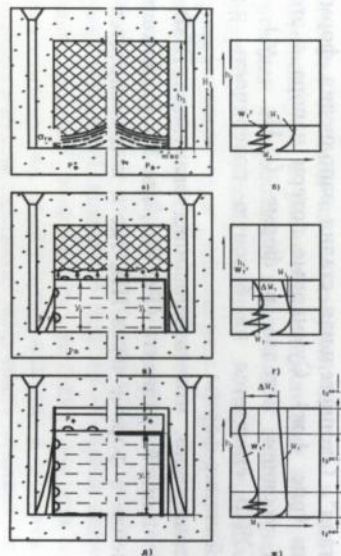


Рис. 1

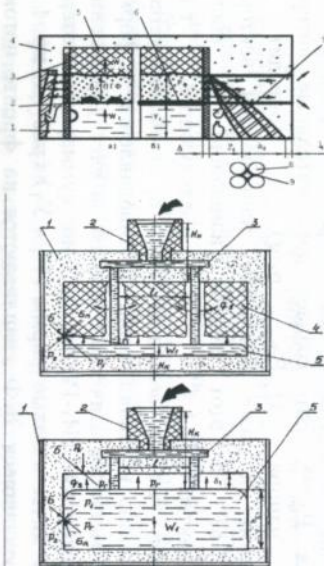


Рис. 2

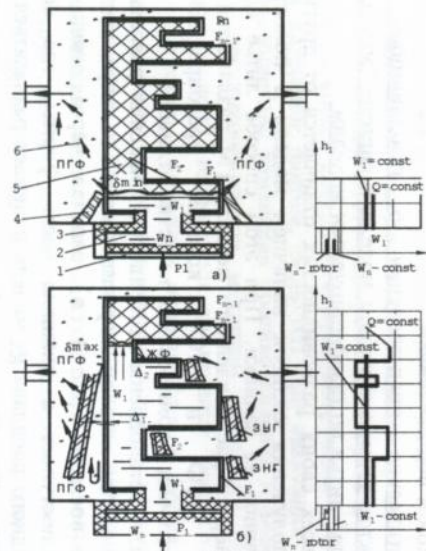


Рис. 3

Рис. 4

Рис. 1. Схема заполнения формы с газифицируемой моделью при нижнем подводе металла и гравитационной заливке. Рис. 2. Схема процесса фильтрации продуктов разрушения газифицируемой модели: 1. - жидкий металл, 2 - сфероид жидкой фазы (ЖФ), 3. - противопригарное покрытие, 4. - формовочный материал, 5. - газифицируемая модель, 6. Δ - пленка жидкой фазы, 7. - зона низкой проницаемости, 8. - зерна формовочного материала, 9. - конденсированная жидкая фаза а) металл не смачивается жидкой фазой разрушения модели б) металл смачивается жидкой фазой разрушения модели Рис 3. Схема заполнения формы с газифицируемой моделью при верхнем подводе металла. 1- контейнер с формовочным материалом; 2- чаша; 3- литниковая система; 4- газифицируемая модель; 5- жидкий металл; а) - начало заливки; б) - окончание заливки. Рис. 4 Физическая модель движения расплава в форме под высоким регулируемым давлением. W_1 - скорость подъема металла в форме, W_n - скорость перемещения металла в камере выжимания, Q - массовый расход металла в форме; δ^* - зазор металл - модель; ЗНГ - зона низкой газопроводности, ПГФ - парогазовая фаза термодеструкции модели. 1 - поршень; 2- расплав; 3- камера выжимания; 4- покрытие; 5- модель; 6- формовочный материал.

ее холодных слоях на зернах огнеупорного наполнителя (ФМ) в виде ЖФ, частично перекрывая каналы ФМ (рис.2 а,б), и образуя при этом зону низкой газопроницаемости (ЗНГ) шириной a_4 . Сформировавшаяся ЗНГ создает дополнительное сопротивление движущемуся потоку ПГФ от границы "металл - покрытие" и, тем самым, определяет совместно с ПП величину противодействия ПГФ - Рф в зазоре "металл - модель", и пограничном слое ФМ. Тогда условия формирования газового режима и противодействия в форме с ГМ могут быть представлены в следующем виде. При заполнении формы жидким металлом 1 (рис.2 а) со скоростью W_1 ГМ 7 разлагается с линейной скоростью W_5 , а так как $W_1 < W_5$, образуется зазор "металл-модель" δ_1 , в котором формируется противодействие Рф за счет образовавшейся ПГФ. ЖФ скапливается на поверхности фронта потока в виде сфероидов или тонкой пленки ЖФ "д" 6, (рис.2 б). Тепловой поток от расплава к ГМ в данном случае передается излучением с поверхности, не покрытой сфероидами ЖФ, и теплопроводностью через пленку ЖФ и зазор δ .

Часть продуктов деструкции модели в момент образования зазора δ_1 фильтруется в виде ПГФ в глубь формы под действием градиента давлений Рф - Р_о, первоначально через ПП 2 и накапливается на зернах формовочного материала ФМ 4 в виде конденсированной жидкой фазы (КЖФ). При этом образуется зона низкой газопроницаемости ЗНГ 3 с шириной a_4 на расстоянии I_4 от границы "металл-форма" и за счет частичного перекрывания КЖФ каналов ФМ (рис. 2 в).

Таким образом, поток ПГФ проходит в форме четыре зоны: ПП с толщиной "д" и газопроницаемостью Кп, два слоя ФМ толщиной I_4' и I_4'' газопроницаемостью К4 и ЗНГ шириной a_4 с газопроницаемостью Кзнг.

На основании этой физической модели фильтрации ПГФ в форму получена система уравнений, описывающая кинетику изменения давления ПГФ при литье по ГМ, при допущении, что ПГФ перемещается потоком шириной " δ " в границах "металл-ПП-формовочный материал - стенка контейнера", которая имеет следующий вид.

$$\left\{ \begin{aligned} dy/d\tau &= \frac{\left(\frac{\alpha \Delta T}{r \rho_c (1+N)} - \left(1 - \frac{\delta}{\delta_c} \right) + \frac{\lambda \Delta T}{\delta r \rho_s (1+N)} \right)}{\left[1 + \frac{\alpha \Delta T}{r \rho (1+N)} - \frac{\rho_s \tau (1 - \delta/\delta_0)}{y' (1 + M_r \tau) \rho_{жв} \left[(\delta/\tau W_1)^{0,05} \right]} \right]} - W_1, \\ dQ/d\tau &= W_5 \rho_s M_r V F_5 (2 - \varphi) - \delta \Pi_5 \Delta \rho K_4 \frac{I_2 - c(I_4' - I_4'')}{(I_4' + I_4'') a_4}, \\ P_{\varphi} &= \frac{PQ}{F_5 \delta}, \quad l_4 = (3,2 - 0,012 T_3) \tau_1, \quad a_4 = 0,015 T_3, \quad \varphi = 0,32 \cdot K_n^{1/3}, \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Тогда математическая модель движения расплава в форме при нижнем подводе и гравитационной заливке приобретает следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} W_{li} &= \mu \cdot \left[2g \left(H_1 - y_i - \frac{P_0}{\rho_i g} \right) \right]^{0,5} \\ P\delta &= f(\rho_s, W_1, T_1, K_n; K_4, l_4, l_4', a_4', \varphi_n) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где: α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²град); $\rho_s, \rho_{жф}$ - плотность модели и жидкой фазы, кг/м³; τ - время, с; Y' - толщина сфероидов ЖФ, м; ΔT - разность температур металла и плавления модели, град; v - удельный объем ПГФ, м³/кг; λ - коэффициент теплопроводности парогазовой фазы, Вт/(м град); r - теплота плавления материала модели, Дж/кг; N - критерий плавления; δ, δ_0 - зазор и зазор, при котором $W_5 < W_1$, м; M_r - степень деструкции ГМ; F_5 - площадь сечения отливки, м²; Π_5 - периметр сечения отливки, м; K_4 - газопроницаемость формовочного материала, м²/(Н с); l_4', l_4'' - длина слоя формовочного материала, м; a_4 - ширина ЗНГ, м; φ - коэффициент снижения газопроницаемости в ЗНГ; Q - количество ПГФ, м³; P - давление в зазоре, Па; T_3 - температура заливаемого сплава, К; τ_1 - время с момента заливки металла в форму, с; μ - коэффициент расхода; H_1 - начальный напор, м; y_1 - текущая координата фронта потока, м.

Физическая модель газового режима и заполнение форм с газифицируемой моделью при верхнем подводе металла и гравитационной заливке в работе представлена следующим образом. В начальной стадии заполнения формы расплавом через литниковую чашу 2 (рис.2) и литниковую систему 3 в виде сформировавшейся струи "пробивает" ГМ 4, после чего начинается его движения в форме со скоростью W_1 , направление которого противоположно перемещению струи. При этом, под действием теплоты g_5^1 образуется традиционный зазор "металл-модель" δ_1 , и так же происходит деструкция

пенополистирола вокруг струи под действием теплового излучения от расплава g_5^1 . Одновременно в зазоре δ_5', δ_5'' формируется противодавление ПГФ величиной P_r .

По мере заливки формы 1 металлом (рис.3) происходит газификация модели 4 в двух направлениях: вертикальном - под действием теплоты фронта потока и горизонтальном - за счет тепловых излучений падающей струи. В завершающей стадии заливки движение расплава в форме заканчивается без ГМ в ней.

На основании полученной физической модели была создана математическая модель газогидродинамики литья при верхнем подводе металла и гравитационной заливке, которая имеет в следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1 = \mu \cdot \varphi_T \left[2g \left(H_1 - y_i - \frac{P_{\Phi_1}}{\rho_1 g} \right) \right]^{0.5} \\ P_r = \left\{ \frac{1 + [2a' d (n_1 - y_i) / a_5 F_1]}{1 + [4x(h_1 - y_i) / \delta_1 \Pi_1]} \right\} \cdot P_{\Phi} \end{array} \right. \quad (3)$$

где: P_{Φ} - противодавление ПГФ при нижнем подводе металла определяется согласно системы уравнений (1); μ - суммарный коэффициент потери скорости; H_1 - металлостатический напор, м; P_r - противодавление ПГФ при верхнем подводе металла, МПа; ρ_1 - плотность жидкого металла кг/м³; F_5 - площадь сечения "металл - струя - модель", м²; d - диаметр струи, м; F_1 - площадь фронта потока металла, м²; χ, δ - площадь фильтрации "струя - модель", "металл - модель" соответственно, м²; a_5, a_5' - коэффициенты газификации в зазоре δ_1 и δ_1' соответственно, м³/м², t_i - текущее время заполнения формы, с; Π_1 - периметр отливки (формы), м.

Учитывая преимущества метода литья в полые формы под избыточным (механическим, газовым, вакуумным и др.) давлением в работе была предложена схема литья по ГМ под регулируемым высоким давлением и разработана физическая модель газогидродинамики этого процесса, суть который заключается в следующем: После герметизации и стыковки контейнера с камерой выжимания, которая заполнена дозой жидкого металла, происходит перемещение поршня со скоростью W_n (рис. 4) и металл выдавливается под давлением $P_m \gg P_{\Phi}$ со скоростью W_1 . В виду того, что, $W_1 \geq W_5$, где W_5 - линейная скорость плавления модели, $\delta_1 \rightarrow 0$ и, по этому отсутствует, стадия заполнения форм без модели. Следует отметить, что заполнение форм может происходить при $Q = \text{const}$, где Q - массовый расход и при $W_1 = \text{const}$; во втором случае возможно выполнение условия $W_1 = \text{const}$, т.к. реализуется равенство $W_1 F_1 = W_n F_n$ при $W_1 \rightarrow \text{rotor}$.

Созданная обобщенная физическая модель движения металла под регулирующим давлением в вакуумированных, магнитных формах с ГМ позволила разработать математическую модель газогидродинамики этого процесса, которая может быть предложена в виде системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{\text{и}} = \mu (F_{\text{кп}} / F_1) W_{\text{кв}} \\ W_{\text{и}} = \mu (F_{\text{кв}} / F_1) W_{\text{кв}} + \left(\frac{2}{\rho_1} P_{\text{в}} \right)^{0.5} \end{array} \right. \quad (4)$$

при $P_{\text{ф}} = P_{\text{в}} < 0$; $Q_{\text{в}} \geq Q_1$
 $A = f(W_1, F_1; K_{\text{п}}, K_4, T_1; L_4', a_4; \alpha, \delta, r)$

где: A - система уравнений (1), определяющая величину противодавления ПГФ $P_{\text{ф}}$ в форме, $W_{\text{п}}$, $F_{\text{п}}$ - скорость подъема и площадь сечения поршня μ , м^2 , $P_{\text{в}}$ - разряжение в форме, Па ; Q_1 , $Q_{\text{в}}$ - массовый расход металла в форме при наложении давления и разряжении в зазоре "металл - модель", Па .

Установлено, что в период заполнения форм образуется новая система взаимодействия "металл - модель", которая существует только в период заполнения формы и существенно влияет на механизм остановки потока расплава из-за дополнительных тепловых потерь на деструкцию ГМ вызывающих сокращение времени пребывания расплава в жидкоподвижном состоянии, противодавления ПГФ и накопления твердой фазы в головной части потока. В таком случае механизм остановки потока может быть следующим: Первый этап движения расплава в полые формы характеризуется тем, что $T_1 > T_0$, где T_0 - температура расплава к моменту "нулевой" жидкотекучести. При этом между металлом и расплавом формируется зазор минимальной величины, δ_1^{min} , в котором возникает противодавление ПГФ, величина которого достигает уже $P_{\text{ф}}^{\text{max}}$ и величина теплового потока воздействующего на жидкий расплав так же максимальна Q_{max} (рис. 5 а). Поэтому температура в головной части потока снижается и может достичь T_0 , но одновременно снижается и скорость расплава в канале $W_1 \rightarrow 0$. Тогда, в этом случае происходит остановка потока вызванная накоплением в его головной части предельного содержания твердой фазы и образуется корочка затвердевающего металла, т.е. $T_1 < T_0$, а $W_1 = 0$.

После первой остановки металла тепловой поток Q_1 достигает минимума (рис. 4.б), т.к. возрастает тепловое сопротивление из-за увеличения зазора до δ_1^{min} , а величина $P_{\text{ф}}^{\text{min}} \rightarrow 0$. Это ведет к разогреву головной части потока металла за счет его последующих слоев и температура металла вновь достигает величины, когда $T_1 > T_0$, и он

переходит в жидкоподвижное состояние. Так как $R_f \rightarrow 0$, то увеличивается металлостатический напор H_1 , равный первоначальному, и расплав вновь движется в канале формы со скоростью W_1 (рис.5 в) до следующей остановки, но при этом выполняется условие $L_1 > L_2$, где L_1, L_2 - путь, пройденный расплавом в первый и второй периоды движения расплава соответственно (рис. 5. г). Сокращение расстояния L_i после остановки потока связано с уменьшением сечения канала от F_1 до F_i , т.к. по периметру канала в месте остановки образуется корочка металла ξ_2 (рис. 5. д). Движение расплава продолжается до накопления такого количества твердой фазы металла, которое создаст сопротивление превосходящее начальный металлостатический напор H_1 .

Кинетика изменения температуры в головной части потока при движении и остановке представлена системой уравнений в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vartheta_1 = \vartheta_1 (1 - \frac{1.13b_{4M}}{c_1 \rho_1 (1 - g_5 \rho_5 : c_1 \rho_1) R_1} \sqrt{t_0}), Q_1 > T_L \\ \vartheta_1 = \vartheta_3 (1 - \frac{1.13b_{4M}}{S_{эф.сп} \rho_2 (1 - g_5 S_{эф.сп} S_1) R_1} \sqrt{t_0 - t_1}), Q_1 < T_L \end{array} \right. \quad (5)$$

где: ρ_1, C_1 - плотность и удельная теплоемкость расплава, соответственно, кг/м^3 ; $\text{Дж}/(\text{кг К})$; $\vartheta = T_1 - T_c$ - избыточная температура расплава, К ; b_{4M} - коэффициент теплоаккумулирующей способности формы с покрытием, $\text{Вт с}^{0.5}/(\text{м}^2 \text{К})$; t_1 - время движения расплава в форме до снятия теплоты перегрева; g_5 - удельная теплота деструкции модели, Дж/кг ; ρ_5 - объемная масса модели, кг/м^3 ; T_c - температура среды, К ; $S_{эф. сп.}$ - теплота кристаллизации расплава, Дж (кг К) , R_1 - приведенная толщина отливки, м ; t_0, t_1 - начальное и текущее время, с .

Установлено, что накопление ЖФ в порах ПП предопределяет условие формирования пригара на отливках при литье по газифицируемым моделям. На основе этого явления разработан механизм образования пригара при литье по ГМ. Так, в период заполнения формы жидким металлом (рис. 6) под действием его тепловой энергии происходит деструкция ГМ5 с образованием ПГФ и ЖФ, причем, ПГФ под действием градиента давления R_f через образовавшийся зазор δ_1 и поры ПП2 перемещается вглубь формы 4, а ЖФ смещается на боковую поверхность контакта "металл - покрытие" под металлостатическим напором u_1 и давлением R_f заполняет поры ПП (рис. 6. а). Затем происходит дальнейшая термодеструкция ЖФ до ПГФ в ПП и формирование корочки затвердевшего металла (рис.6 б, в, г.).

Возможность существования этой версии формирования пригара определялась согласно уравнениям:

$$\frac{\rho_5}{\rho_{жф}} \cdot \frac{1-n}{Cr} \cdot R_1 > 1, \text{ и } B_5 = \frac{\rho_5}{\rho_{жф}} \cdot \frac{1-n}{c \cdot r} R_1 \quad (6)$$

где: B_5 - коэффициент накопления ЖФ в ПП, n коэффициент газификации модели, r - толщина ПП, m , c - коэффициент пористости покрытия, $\rho_{жф}$, ρ_5 - плотность жидкой фазы и ГМ соответственно, кг/м³.

Согласно уравнению (6) определена вероятность формирования пригара для отливок различной толщины (2-50мм), которая составляет: для алюминиевых сплавов - 0,99, чугуна - 0,93, медных сплавов - 0,93 и стали - 0,85. Возможность формирования пригара на поверхности отливок при литье по ГМ определяется согласно полученной системе уравнений вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_5 = \frac{\rho_5}{\rho_{жф}} \cdot \frac{1-n}{c \cdot r} \cdot R_1, \quad t_r = \left[\frac{\rho_{жф}}{\rho_{пф}} \cdot \frac{r}{a_5} \right]^{\gamma_m} \\ \xi_1 = \left[\frac{1.13b_4(T_n - T_i)}{L_1 \cdot \rho \left[1 - \frac{C_1}{L_1} \cdot (T_3 - T_{кр}) \right]} \right] t^{0.5}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где: T_n , T_3 , $T_{кр}$ - температура поверхности отливки, заливаемого металла, и кристаллизации сплава; L , c - теплота кристаллизации и теплоемкость сплава; t_o - время газификации ЖФ в порах ПП; a_5 - коэффициент газификации ЖФ.

Разработана физическая модель взаимодействия и массопереноса продуктов термодеструкции и жидкого затвердевающего металла, как главенствующих при формировании качества литых изделий, которая основана на смачивании этими продуктами фронта потока металла в период заполнения формы с ГМ. Тогда, при литье с гравитационной заливкой и отсутствии смачиваемости между фронтом потока расплава и ЖФ (железоуглеродистые сплавы) часть газифицирующихся продуктов в момент образования зазора "δ" "металл - модель" (рис. 7 а) фильтруются в виде ПГФ в глубь формы под действием градиента давления P_f , а ЖФ скапливается на поверхности расплавленного металла 1 в виде плоских сфероидов (рис.7 а). По мере подъема металла 1 в полости формы сфероиды ЖФ смещаются на поверхность раздела "металл-модель" и образуют там локальные объемы V_5 (Рис. 7. а), которые затем окончательно газифицируются. Причем, в период газификации ЖФ вокруг объема V_5 создается противодействие ПГФ P_f , которое не позволяет прижать нарастающую корочку "ξ" затвердевающего металла возрастающим металлостатическим напором

Рн. К моменту полной газификации ЖФ в объеме V_5 формируется корочка "ξ" такой толщины, которая не может быть полностью прижата к стенке формы, а только несколько деформирована за счет увеличивающегося напора $P_{\text{нmax}}$. (Рис. 7а). Механизм же формирования поверхности отливок при ЛГМ в случае смачиваемости ЖФ поверхности расплавленного металла (цветные сплавы) последняя при заполнении формы растекается по поверхности фронта потока расплава (рис. 7 б), а затем перемещается на поверхность раздела "металл - форма", где формируется в виде пленки ЖФ толщиной Δ , а затем окончательно газифицируется по всей поверхности затвердевающего металла.

На основании этого механизма взаимодействия разработана математическая модель взаимодействия ЖФ с жидким и затвердевающим металлом, которая имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\Phi} = 0,13\varphi_{\Gamma} \frac{\eta T_{\Phi} l_4}{c} a_4 t_{\Gamma}^{m-1} \\ \xi_1 = \frac{1,13b_4(T_n - T_{\Phi}) \cdot \left[1 + \frac{1995nd_{\text{ж}}^3}{1,13b_4(T_n - T_{\Phi})} \right]}{L_1 \rho_1 \left[1 - \frac{C_1}{L_1} (T_3 - T_{\text{кр}}) \right]} \\ t_{\Gamma} = \left[4,5n \frac{\alpha_{\text{ж}}}{a_5} \cdot 10^3 \right]^{1/m} \quad d_{\text{ж}}^{\text{min}} = 0,3R_1, \quad d_{\text{ж}} < \delta_1 \quad P_m = \rho_1 g_1 W_1 t_{\Gamma} \end{array} \right. \quad (8)$$

где: η - коэффициент динамической вязкости ПГФ, T_{Φ} - температура формы, c - проницаемость в Дарси, T_n - температурная константа, t_1 - время газификации сфероид (пленки), $d_{\text{ж}}$ - диаметр сфероид (толщина пленки) ЖФ.

Физическая же модель взаимодействия продуктов термодеструкции ГМ с металлом при наложении высокого давления может быть представлена в следующем виде. Форма с ГМ заполняется путем выдавливания металла 2 (рис. 4 б) из полости 3 при перемещении поршня 1 со скоростью W_n . При этом, в виду отсутствия зазора "металл-модель", $W_1 \geq W_5$ и в силу того, что $P_m \gg P_{\Phi}$, $P_m > \sigma_{\text{сж}}$ ($\sigma_{\text{сж}}$ термомеханическое сопротивление ГМ) ЖФ выделяется на границе раздела в виде тонкой пленки Δ (рис 7. д) и ее смачиваемость не влияет на формирование дефектов в отливке. Окончательная газификация ЖФ происходит на границе "металл - форма", где $P_{\Phi} \ll P_m$. Это исключает возможность проникновения ПГФ деструкции пенополистирола в жидкий металл и отжатия от поверхности формы затвердевшей корочки металла ξ .

Установленный механизм взаимодействия продуктов газификации, подтвержден графической интерпретацией кинетики изменения P_m ; ξ_1 ; t_r ; P_f , полученной с использованием математической модели (8).

Тогда, согласно расчетным данным при литье чугуна по ГМ под высоким давлением время газификации t_r пленки толщиной dp составляет 1,0 - 3,0 с. (рис. 8). За это время t_r развивается давление ПГФ величиной $8 \cdot 10^{-4}$ МПа, металлостатический напор в пределах $(2...5)10^{-4}$ МПа, (рис. 2. а) давление на жидкий металл P_m в этот период не менее, чем 0,2 МПа, а это значительно выше P_f . В таком случае, далее при образовании корочки ξ_1 , суммарное сопротивление $(P_f + \sigma_{\xi_1})$ не может противостоять усилию P_m , прижимающему (корочку ξ_1 к стенке формы, что полностью исключает образование специфических газоусадочных дефектов на поверхности отливок из железоуглеродистых сплавов. Аналогичным образом высокое давление предопределяет условиям взаимодействия ЖФ с цветными сплавами, т.к. $P_m \gg (P_f + \sigma_{\xi_1})$.

На основании созданных в этой главе математических моделей определена область исследований закономерностей газогидродинамики литья, и особенностей тепломассобмена, а также формирования качества отливок при литье по газифицируемым моделям. под низким и высоким давлением.

3 Газогидродинамика литья по газифицируемым моделям

Для исследования гидрогазодинамических особенностей движения расплавов в форме с газифицируемой моделью были созданы специальные методики, позволяющие с помощью физического моделирования и натурных экспериментов изучать процессы взаимодействия металла с продуктами термодеструкции ГМ в системе "металл - модель - покрытие - форма", в т. ч. под регулируемым давлением в вакуумируемых, магнитных формах. Это позволило изучить закономерности формирования газового режима и противодействия в форме с газифицируемой моделью. При этом установлено, что противодействие ПГФ термодеструкции в зазоре "металл - модель" при нижнем подводе металла и гравитационной заливке значительно превышает аналогичные в полый форме и достигает значений в начальный $P_f^{\max}$ и установившейся период $P_{ср}$ 8 - 24 КПа 0,8 - 4 КПа соответственно и может изменяться в широких пределах при затвердевании газопроницаемостью формы K_4 , покрытия K_{II} и скоростью подъема металла W_1 . Характер изменения и величина $P_f^{\max}$ и P_f при верхнем подводе металла аналогичны литью с нижним

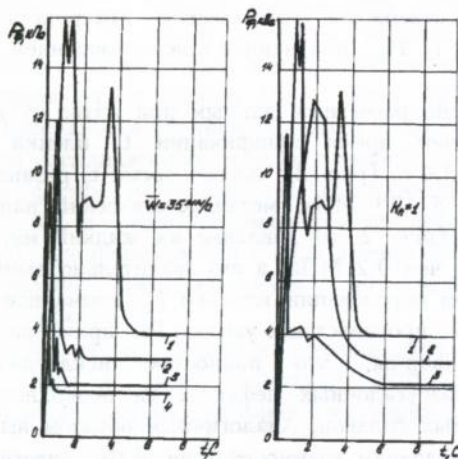


Рис. 9 Кинетика изменения противодействия P_{ϕ} в форме газопроницаемостью 360 ед. с газифицируемой моделью при литье чугуна с начальной температурой 1350 °С. а) 1 $K_{\text{п}} = 1$ ед.; 2 $K_{\text{п}} = 1$ ед. 3 $K_{\text{п}} = 1$ ед. 4 $K_{\text{п}} = 1$ ед. б) $\bar{W}_1 = 35$ мм/с. 2 $\bar{W}_1 = 20$ мм/с. $\bar{W}_1 = 35$ мм/с.

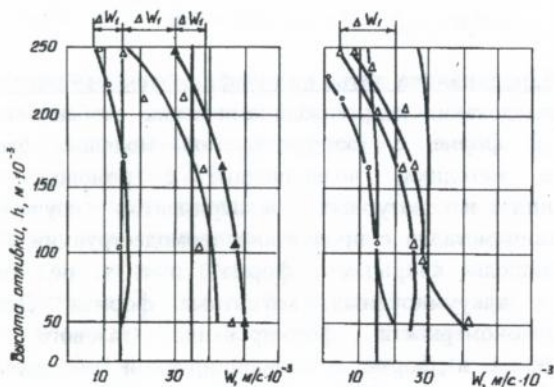


Рис. 10. Кинетика изменения скорости подъема металла по высоте формы W_1 при литье чугуна в форме с газифицируемой моделью моделью гравитационной заливкой. а) - Температура заливаемого сплава $T_1 = 1623\text{K}$. б) - Температура заливаемого сплава $T_1 = 1523\text{K}$. - газопроницаемость формы $K_4 = 330$ ед., покрытия $K_{\text{п}} = 15$ ед. 2. - $K_4 = 330$ ед., $K_{\text{п}} = 15$ ед. 3. - $K_4 = 330$ ед., $K_{\text{п}} = 15$ ед.; 4. - $K_4 = 120$ ед., $K_{\text{п}} = 1$ ед.; 5. - $K_4 = 240$ ед., $K_{\text{п}} = 1$ ед.; 6. - $K_4 = 180$ ед., $K_{\text{п}} = 1$ ед.

подводом металла и достигают значений 12-24 и 2-10 КПа соответственно. Один из фрагментов кинетики изменения Рф представлен на рис. 9.

При исследовании гидродинамики процесса заполнения формы гравитационной заливкой установлено, что наличие высокого противодавления ПГФ в зазоре δ_1 видоизменяет характер, величину, скорости W_1 при нижнем подводе и гравитационной заливке и ведет к ее снижению на 20-250% по сравнению с аналогичным при литье в полые формы, и зависит от величины газопроницаемости K_4 , K_n , собственно W_1 , начальной температуры T_1 и напора металла H_1 и их взаимного влияния. При верхнем подводе металла скорость W_1 зависит от газопроницаемости формы K_4 и покрытия K_n и не зависит от температуры головной части потока T_1 , но ниже аналогичной в сравнении с полый формой на 10 - 60%. Один из фрагментов графической интерпретации изменения величины W_1 представлен на рис. 10.

Значение скорости подъема металла W_1 и коэффициента потери скорости φ_r при нижнем подводе металла и гравитационной заливке определены согласно системе вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{для железоуглеродистых сплавов:} \\ \bar{W}_1 = \varphi_r W_{1p} \\ \varphi_r = -0,8 + 1,3\theta_3 + (0,031\theta_3 - 0,03) K_n, \\ \text{при } 1,15 > \theta_3 > 1,11 \\ \varphi_r = 0,72 + 0,007 K_n, \text{ при } \theta_3 > 1,15 \end{array} \right. \quad (11)$$

где W_{1p} - расчетная заданная скорость для полый формы, м/с

для цветных сплавов:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1 = \varphi_r (9,7 - 1,15W_{1p} - 8,8\theta_3 + K_n + 1,6\bar{W}_{1p}\theta_1 - \theta_1 K_n) \text{ мм/с} \\ \varphi_r = -0,1 + 0,008K_n + 1,4, \text{ при } 1,15 > \theta_3 > 1,01 \\ \varphi_r = 0,54 + 0,008K_n, \text{ при } 1,15 > \theta_3 \end{array} \right. \quad (12)$$

При исследовании гидрогазодинамики заполнения форм с ГМ сложно - переменного сечения гравитационной заливкой установлено, что создать условия движения расплава в такой форме с заданной скоростью затруднительно или невозможно, т.к. скорость W_1 зависит от текущего металлостатического напора ($H_1 = f(H_{cm} - y_i)$) и одновременно подчиняется закону $W_1 = f\left(\frac{F_z}{F_1} F - \text{rotor}\right)$, но выполнение условия

$W_1 = \text{const}$ на протяжении всего периода заполнения возможно при наложении регулируемого давления на жидкий металл, когда его скорость подчиняется закону $W_1 = f(W_n)$, $W_n = \text{rotor}$, т.к. изменение

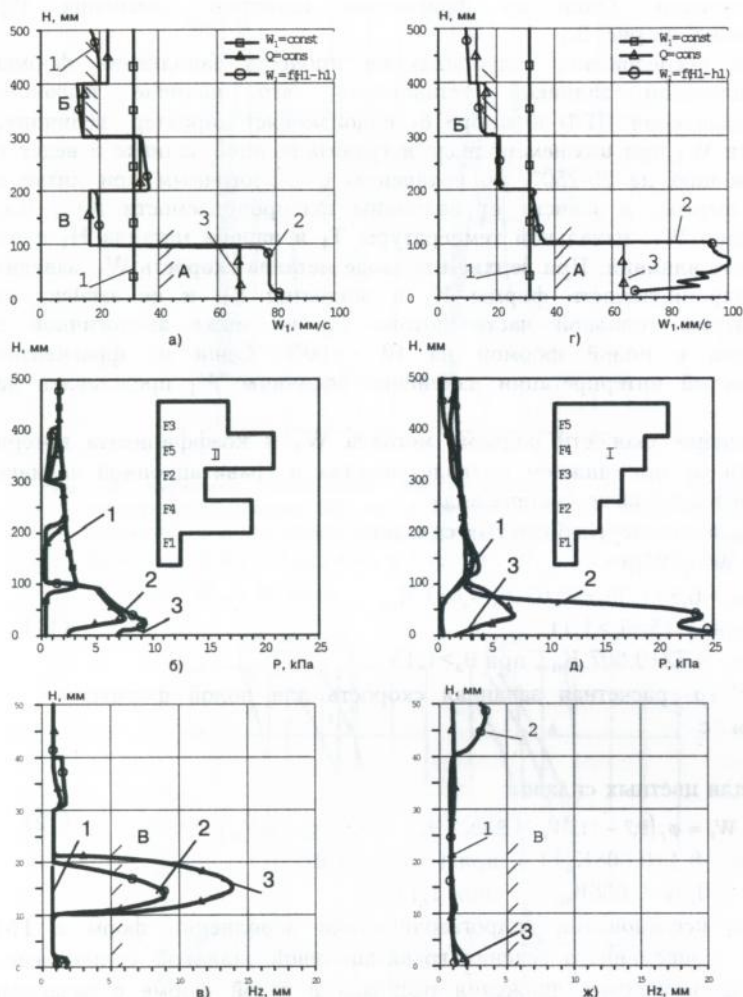


Рис. 11. Кинетика изменения скорости подъема металла (W_1), противодавления в форме (P_r) и величины зазора "металл- модель" (d) при заполнение формы переменного сечения $F_1:F_2:F_3:F_4:F_5=1:2:3:4:5$ с газифицируемой моделью.

1.- W_1 - const; 2- $W_1 = f(H_1 - h_1)$; 3 - Q - const; H_1 начальный металлостатический напор; h_1 и Q_1 - высота и массовый расход металла в форме; Зоны дефектов: А- "охват модели металлом"; В- "незаполнение формы".

начальной скорости перемещения поршня подчиняется закону $W_n = f(F_1)$.

При исследовании газогидродинамику литья под высоким регулируемым давлением установлено, что при наличии избыточного давления $P_1 > P_{\Phi}$, текущая скорость W_1/h_1 практически не отличается от значений $\bar{W}_1$ по всей высоте формы h_1 и варьирование технологических факторов литья по ГМ в исследуемом интервале температур заливаемого сплава T_1 не влияют на величину W_1 и отклонения "Δ" текущей скорости W_1 от средней $\bar{W}_1$ и создает условия для выполнения равенства $W_1 = \bar{W}_1$, т.е. коэффициент потери скорости $\phi_r = 1$, как для полый традиционной формы. Это очевидно и при заполнении форм переменного сечения с заданной скоростью как фактора определяющего качество отливки. Так если $W_1 = f(F_1)$, то она постоянна весь период заполнения формы (рис.11. а, г. кр. 1), что не возможно достигнуть при гравитационной заливке (рис.11. а, г. кр.2), где она отличается от заданной на 50 - 200 %, и ведет к образованию разных видов дефектов.

Исследование газодинамики при литье под давлением указывает на наличие в конечной стадии максимального давления $P_{\Phi}^{\max}$ но его существование кратковременно (рис. 11 б, д, кр. 1), а, вместе с тем, максимальное $P_{\Phi}^{\max}$ и установившееся $P_{\Phi}^{\max}$ давление совершенно не влияет на кинетику и величину скорости подъема металла в форме W_1 (рис. 11 а, г, кр. 1). При исследовании формозаполняемости при литье по ГМ установлено, что она ниже аналогичной в полых песчаных формах в 1,3 - 3,0 раза и зависит от варьирования при гравитационном литье технологических параметров (T_1 ; K_4 ; K_{Π} ; W_1 ; H_1 ; ρ_5 ; b_4). Причем снижение газопроницаемости до 1 ед. ведет к падению формозаполняемости расплавом бронзы, чугуна на 70...75% и 35...40% соответственно, что связано с напором ($H_1 - P_{\Phi}/\rho_5 g$). Установлено также, что из-за потери теплоты на деструкцию модели g_5 значительно снижается теплосодержания расплава, что в конечном итоге сокращает время его пребывания в подвижном состоянии. Так, повышение тепловых потерь на деструкцию модели (увеличение объемной массы от 20,0 до 50,0 кг/м³) ведет к снижению заполняемости формы из стальной дробы расплавом бронзы на 40...50% и расплавом чугуна на 15...20%.

В целях практического применения математических моделей течения расплава в тонких каналах формы с газифицируемой моделью определена теплоаккумулирующая способность формы с ГМ b_4 и удельная теплота ее деструкции q_5 в период заполнения формы металлом.

Величины этих значений составили в температурном интервале заливаемых сплавов 1050 -1200 °С $b_4 = 1440 \text{ ВтС}^{0,5}/(\text{м}^2\text{с})$ и $q_5 = 9,2 \times 10^3 \text{ кДж/кг.}$, а в интервале 1250-1600°С - $b_4 = 1930 \text{ ВтС}^{0,5}/(\text{м}^2\text{с})$ и $g_5 = 10,1 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг.}$

При исследовании влияния технологических факторов, в т.ч. давления на жидкий металл P_1 , степени, перегрева расплава θ_1 , скорость подъема металла в форме W_1 и плотности модели ρ_5 на формозаполняемости различными сплавами при наложении избыточного давления, было установлено, что повышение давления P_1 с 0,3 до 0,7 МПа увеличивает формозаполняемость углеродистой сталью в 1,2...1,5 раза а нержавеющей - в 1,6...2,0 раза соответственно. Следует отметить, что при низкой плотности модели $\rho_5 = 20,0 \text{ кг/м}^3$ и высокой степени перегрева расплава ($Q_1 = 1,15$) влияние давления P_1 , наблюдается только в интервале 0,3...0,45 МПа, а при высокой плотности модели ($\rho_5 = 50,0 \text{ кг/м}^3$) и низкой степени перегрева расплава ($\theta_1 = 1,05$) влияние P_1 очевидно во всем исследуемом интервале.

4. Исследование закономерности взаимодействия жидкого, затвердевающего металла с пенополистироловой моделью, продуктами ее термодеструкции, противопригарным покрытием, и формированием качества отливок при литье по газифицируемым моделям

Первоначально по специально разработанной методике были исследованы закономерности термодеструкции пенополистироловой модели при наложении избыточного давления и высоких скоростях заполнения формы ($W_1 > 50 \text{ мм/с}$), что ранее не исследовалось при гравитационном литье с Г.М. При этом установлено, что соотношение между образовавшимся жидкими, парогазовыми и твердыми продуктами термодеструкции ГМ, не зависит от температуры и вида заливаемого сплава, а соотношение между ЖФ, ПГФ и ТФ продуктов термодеструкции ГМ при литье под давлением предопределяется скоростью подъема металла, когда $W_1 \leq 80 \text{ мм/с}$, а при $W_1 > 80 \text{ мм/с}$ оно становится величиной практически постоянной (табл. 1).

Одновременно исследовалась кинетика газификации модели, которая характеризуется коэффициентом газификации η и накопления ЖФ ϵ . Эти величины являются функцией W_1 , которая показывает, что по мере увеличения скорости W_1 возрастает степень газификации с 0,2 до 0,45, а значение коэффициента ϵ , естественно уменьшается с 0,8 до 0,55. Характер изменения η и ϵ - обратный в сравнении с гравитационной заливкой. На основании полученных данных о газификации определен относительный коэффициент газификации a_5 ,

как параметр, используемый в математических моделях газодинамики, величина которого равна $8,75 \text{ см/с}^{-1/2}$.

Таблица 1.

Количество газообразной, парожидкой и твердой фаз при термодеструкции образца пенополистирола массой 2,4 г.

Относительное количество фазы, г, (%)	Наименование фазы	Скорость подъема металла в форме см/с					
		2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0
газообразная фазы,	Газообразная	0,160 (7)	0,114 (5)	0,094 (4)	0,08 (3,3)	0,072 (3,0)	0,066 (2,7)
		0,32 (13)	0,701 (30)	0,818 (34)	0,906 (36,7)	0,976 (40)	1,004 (42,3)
твердая фазы,	Твердая	1,92 (80)	1,585 (65)	1,488 (62)	1,414 (60)	1,352 (57)	1,330 (55)

Установленные отличия в сравнении с гравитационным литьем объясняются иными механизмами теплового воздействия, т.к. повышение давления ведет к образованию новой системы теплосилового взаимодействия - "металл - парогазовый зазор - пленка ЖФ - модель". При заполнении формы от расплава к модели q_5 передается через пленку ЖФ, которая является термическим сопротивлением и определяется толщиной Δ . При увеличении $W_1 > 40 \text{ мм/с}$ ЖФ выдавливается в форму, а толщина пленки и термическое сопротивление уменьшается, что ведет к увеличению мощности теплового потока q_5 . Соответственно увеличивается скорость газификации ГМ. По мере дальнейшего увеличения скорости W_1 формируется минимальный зазор $\delta_1^{\min}$, величина которого становится постоянной, что создает постоянное термическое сопротивление, а, следовательно, постоянную скорость газификации модели.

Экспериментально было подтверждено, что качество поверхности отливки при гравитационном литье определяется смачиваемостью ЖФ поверхности фронта потока расплава, и в случае литья несмачиваемых железоуглеродистых сплавов объем дефектов в 1,5-3 раза выше в сравнении с аналогичными отливками из медных сплавов, где имеет место смачивания ЖФ. Наложение давления на жидкий и кристаллизующийся металл исключает влияние смачиваемости ЖФ поверхности расплава и создает равные условия для формирования дефектов на поверхности отливок из различных сплавов, причем количество их ниже, чем при гравитационном литье в 2.5 - 10 раз. На основании экспериментальных данных получены уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать качество поверхности отливок, которые имеют следующий вид. для FeC-сплавов

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 = 1,3[\rho_5 + 0,5R_1 + (0,07R_1 - 0,23)W_1 - 10] \times 10^{-3}, \text{ мм}^3/\text{м}^2 \\ \text{для Cu-сплавов} \\ D_1 = (0,25W_1 + 3,4R_1 - 6,5) \times 10^{-3}, \text{ мм}^3/\text{м}^2 \end{array} \right. \quad (13)$$

Анализ этих уравнений показал, что при формировании качества отливок из FeC-сплавов определяющими являются: скорость подъема металла W_1 , плотность модели ρ_5 и толщины стенки отливки R_1 , а для Cu-сплавов: скорость W_1 и толщина R_1 . При литье под давлением эти параметры не влияют на качество литых заготовок. Изучено влияние теплосилового воздействия на развитие кристаллизационных процессов при формировании физико - механических характеристик отливок, которое выражается в виде уравнений регрессии.

Согласно данным полученным с помощью уравнений регрессии, повышение давления P_1 в исследуемом интервале (3,5...7,5 МПа) ведет к росту прочностных характеристик для отливок из углеродистых и легированных сталей, серого и высокопрочного чугунов на 15-25% и 15-20% соответственно.

Проведенные исследования подтвердили механизм формирования пригара на основе наличия и последующей газификации ЖФ в порах противопригарного покрытия. Так установлено, что на поверхности образцов полученных по ГМ при наличии ПП появляется тонкая корочка металла, которая состоит преимущественно из цементита, который отсутствует на контрольных (без покрытия) образцах. Это объясняется интенсивным начальным теплоотводом, вызванным дополнительными потерями на термодеструкцию ЖФ, которая находится в порах ПП, но при отсутствии ПП под действием градиента P_{cp} ЖФ стремится вглубь формы. Отсутствие окисленного слоя на поверхности отливки с покрытием, а без него слой окалины толщиной 1-1,2 мм также указывает на наличие ЖФ в порах ПП, т.к. ее газификация создает на границе "металл - покрытие" восстановительную атмосферу в результате разложения ЖФ.

Исследована также закономерность изменения одной из важных характеристик - конструкционной прочности модели и литниковой системы "покрытие - пенополистироловая модель σ_{II} ", которая может быть представлена уравнением регрессии:

$$\sigma_{II}'' = 4,5\sigma_{II} - 5,45d_m + 0,04\rho_5 + 10,25\rho_5 + 5\sigma_{II}d_H + 0,5, \text{ МПа} \quad (14)$$

Это уравнение позволяет определить значения интегральной прочности системы "модель-покрытие", которые используются для расчета на прочность пенополистироловых моделей и модельных блоков.

Одновременно исследовалась закономерность взаимодействия пенополистироловой модели и продуктов ее термодеструкции с

противопригарным покрытием (ПП). При этом определен с использованием специальной методики коэффициент сопротивления фильтрации ПГФ ϕ_{Π} , который предопределяется газопроницаемостью ПП и может быть представлен выражением

$$\phi_{\Pi} = 0,32K_{\Pi}^{1/3} \quad (15)$$

Анализ этого уравнения показал, что повышение газопроницаемости выше 10 ед нецелесообразно, т.к. дальнейшее ее увеличение повышает ϕ_{Π} всего на 5÷7%. Одновременно исследовалась газопроницаемость ПП с разными огнеупорными наполнителями, и спирто - водорастворимым связующим, которая у водных покрытий составляет 8-34 ед, и на спиртовой основе 0,28-12,2 ед, и зависит от состояния минерального наполнителя и условий формирования корочки в период ее отвержения.

5. Разработка технологий, методов оптимизации технологических параметров, оборудования, систем экологической защиты и организации производства железуглеродистых, цветных сплавов по газифицируемым моделям

В главе представлены созданные технологии получения отливок из железуглеродистых и цветных сплавов в вакуумируемых и магнитных формах с гравитационной заливкой при нижнем и верхнем подводе металла и под высоким регулируемым давлением, который получил фирменное название "ГАМОДАР - процесс", а так же созданные на его базе контейнерные и роторные технологии получения отливок из железуглеродистых и цветных сплавов. Для реализации этих технологических процессов создана гамма оборудования для подготовки пенополистирола, изготовления из него моделей, нанесения противопригарных покрытий, формовки и заливки сплавов, как гравитационным литьем, так и под избыточным давлением. Эти разработки позволяют организовать специализированные участки, цеха и заводы литья по газифицируемым моделям мощностью 100-10000 т/год. Разработана конструкторская документация роторно - конвейерного комплекса производительностью 250-500 форм/час для изготовления отливок ГАМОДАР -процессом., который по производительности в 1,8-3 раза выше аналогичных зарубежных линий и в 1,3 раза выше наиболее производительных в литейном производстве автоматических формовочных линий фирмы "GF+DISAMATIK" (Германия).

Представлены данные о качественных и количественных характеристиках состава продуктов термодеструкции моделей, на основании которых создана гамма установок термо-каталитического обезвреживания вредных выбросов и регенерации формовочных смесей,

что обеспечивает высокую степень очистки выбросов (до 98%) и экологическую чистоту созданных технологических процессов литья по газифицируемым моделям.

Далее приведена разработанная комплексная методика расчета и оптимизации ЛГМ - ГАМОДАР - процессов (рис. 12а.), которая включает методы расчета и оптимизации технологических параметров предварительного вспенивания полистирола и изготовления из него газифицируемых моделей, скорости подъема металла в форме с газифицируемой моделью и времени ее заполнения при заливке сплавов гравитационной заливкой с нижним и верхним подводом металла и под регулируемым давлением, а так же температуры заливаемого сплава, расчет геометрических параметров элементов литниковых систем при гравитационной заливке с верхним, нижним подводе металла и под регулируемым высоким давлением и гидравлического сопротивления керамических фильтров с ориентированными каналами.

Представлены данные о разработанной методике компьютерной оценки выбранных оптимальных параметров и их корректировании путем изменения скорости подъема W_1 , давления $P_{ср}$, величины зазора металл - модель δ , температуры жидкого T_1 , и затвердевающего металла в различных сечениях формы и отливки и ее апробации и применение на практике, фрагмент которой представлен на рис 12б.

Приведены и анализируются данные, полученные при оценке экономической эффективности применения литья по газифицируемым моделям взамен различных методов получения отливок из серого, высокопрочного чугуна, углеродистой и легированной стали и медных сплавов в цехах и заводах производительностью 100-10000 тонн/год, которые указывают на снижение расхода формовочных и стержневых материалов на 85-95%, шихтовых материалов на 25-30%, электроэнергии на 25-50%, уменьшения трудоемкости формовочных и финишных операций в 2-4 раза и на 70-80%, соответственно, и так же на сокращение капитальных затрат и производственных площадей в 2-4 раза и снижению вредных выбросов в 8-10 раз. Одновременно обеспечивается снижение массы литых заготовок на 15-30%, повышение их потребительских свойств на в 1,2-1,7 раза, увеличение КИМ до 97% и выхода годного на 10-15% при гравитационной заливке и на 20-30% при литье под давлением, что в целом ведет к снижению себестоимости литых заготовок на 10-30%.

Представлены также технологические планировки участков и цехов литья по газифицируемым моделям, в которых реализованы комплексные технологические решения по организации производства литых заготовок из железоуглеродистых и цветных сплавов с

использованием механизированного и автоматизированного оборудования для всех технологических операций, а также системы экологической защиты объекта и окружающей среды.

Общие выводы

В результате выполненных исследований изучены закономерности взаимодействия жидкого и затвердевающего металла с газифицируемой моделью и их влияние на качество отливок, разработаны и реализованы в промышленности оригинальные технологии литья ГМ, получены следующие основополагающие результаты:

1. Физические и математические модели гидрогазодинамики литья по газифицируемым моделям гравитационной заливкой, при нижнем и верхнем подводе металла и переменным металлостатическим напором, которые позволяют оптимизировать основные технологические параметры литья по газифицируемым моделям отливок различной конфигурации и массы из железоуглеродистых и цветных сплавов.

2. Физическая и математическая модель остановки потока металла в форме с ГМ и формирования пригара, которые учитывает интенсивные теплотери металла в головной части потока на термодеструкцию модели, базируются на взаимодействии расплава с продуктами термодеструкции модели, сконденсировавшихся в порах противопригарного покрытия. Применение полученных зависимостей позволяет прогнозировать формозаполняемость, исключить пригар при литье по газифицируемым моделям железоуглеродистых и цветных сплавов.

3. Физическая и математическая модели взаимодействия продуктов термодеструкции при литье железоуглеродистых и цветных сплавов с гравитационной заливкой по газифицируемым моделям на основе смачиваемости жидкой фазой продуктов термодеструкции пенополистирола поверхности заливаемого металла. Проведенный анализ позволил установить различия в механизме взаимодействия и формирования дефектов на поверхности отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов при гравитационном литье, а так же взаимодействия продуктов термодеструкции ГМ с поверхностью жидкого и затвердевающего металла при литье под высоким давлением. В последнем случае имеет место выдавливание ЖФ из зазора "металл - модель " в виде тонкой пленки, что позволило сделать вывод об идентичности механизма взаимодействия ЖФ с поверхностью металла, при смачиваемости или несмачиваемости, сформулировать идею и теоретически обосновать новый способ литья по газифицируемым моделям под высоким регулируемым давлением.

4. Все физические и математические модели апробированы, экспериментально подтверждена их адекватность и могут быть рекомендованы для расчета и оптимизации технологических параметров. Для целей апробации и экспериментальной проверки были созданы специальные методики, позволяющие с помощью физического моделирования и натурных экспериментов изучать процессы “металл - модель- покрытие - форма”, в т. ч. под регулируемым давлением в вакуумируемых и магнитных формах. В результате получен ряд новых данных о газогидродинамике различных технологических вариантов литья по ГМ:

- противодавление парогазовых продуктов термодеструкции в зазоре “металл - модель” при нижнем подводе металла и гравитационной заливке значительно превышает аналогичные в полый форме и достигает величины в начальный $P_{ф}^{max}$ и установившийся период $P_{ф}$ равной 8-24 и 0,8-4,0 кПа соответственно, которое может изменяться в широких пределах при варьировании газопроницаемостью формы K_4 , покрытия K_{II} и скорости подъема металла W_1 . Характер изменения и величина $P_{ф}^{max}$ и $P_{ф}$ при верхнем подводе металла и $W_1 > 40$ мм/с аналогичны литью с нижним подводом металла.

- наличие высокого противодавления ПГФ в зазоре “металл - модель” видоизменяет характер, величину, скорости W_1 при нижнем подводе и гравитационной заливке приведет к ее снижению на 20-250% по сравнению с аналогичным при литье в полые формы, а при верхнем подводе металла скорость W_1 зависит от газопроницаемости формы K_4 и покрытия K_{II} и не зависит от температуры потока T_1 , но всегда ниже аналогичной в сравнении с полый формой на 10 - 60%.

- заполнение формы сложного, переменного сечения заданной скоростью с применением гравитационной заливки, затруднительно или невозможно, так как скорость W_1 зависит от текущего металлостатического напора ($H_i = f(H_{cr} - y_i) - const$); и одновременно подчиняется закону $W_1 = f(\frac{F_z}{F_1} F - rotor) - const$, но выполнение условия,

когда $W_1 = const$ возможно только при наложении регулируемого давления на жидкий металл, когда его скорость подчиняется закону $W_1 = f(W_n)$, а $W_n = f(F_1)$,

- формозаполняемость при литье по ГМ ниже в 1,3÷3 раза при гравитационной заливке, а при наложение давления, выше на 10 +15% аналогичной при литье в полые песчаные формы;

- термодеструкция пенополистироловой модели при наложении избыточного давления и высоких скоростях заполнения формы ($W_1 > 50$ мм/с) отличается от таковой при гравитационном литье с ГМ

соотношением качества образовавшихся жидких, парогазовых и твердых продуктов термодеструкции ГМ и не зависит от температуры и вида заливаемого сплава, а предопределяется только скоростью подъема металла W_1 ;

- установлено, что качество поверхности отливки при гравитационном литье определяется смачиваемостью ЖФ поверхности фронта потока расплава, и в случае литья несмачиваемых железоуглеродистых сплавов объем дефекта в 1,5-3 раза выше, чем на отливках из медных сплавов, поверхность которой смачивается ЖФ. Наложение давления на металл исключает влияние смачиваемости и создает идентичные условия для формирования качества отливок из различных сплавов.

- одновременное влияние технологических факторов и избыточного давления на жидкий и кристаллизующийся металл позволяет повысить механическую прочность и снизить пористость материала отливок из углеродистых, нержавеющей сталей и высокопрочных, серых чугунов на 15 - 25% в сравнении с гравитационным литьем по ГМ;

- газопроницаемость противопопригарных покрытий K_{Π} зависит от структуры огнеупорного наполнителя и вида связующего материала, причем газопроницаемость противопопригарных покрытий на водной основе в 3,2-5,0 раз выше, чем на спиртовой, но коэффициент фильтрации ПГФ через ПП ϕ_n существенно зависит от этой величины, когда $K_{\Pi} \leq (8 \pm 10)$ ед, а при $K_{\Pi} \geq 10$ ед. величина ϕ_n возрастает лишь на 5-6%, что позволяет утверждать о нецелесообразности применения покрытий для ГМ с газопроницаемостью более 10 ед.

6. Созданы технологические процессы получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов в вакуумируемых и магнитных формах с верхним и нижним подводом металла, гравитационной заливкой, под высоким регулируемым давлением, получивший фирменное название "ГАМОДАР процесс", на основе которого разработаны также конкурентная и роторные технологии; для их реализации создана гамма оборудования, что позволяет организовать специализированные участки, цехи, и заводы литья по газифицируемым моделям мощностью 100 - 10000 т/год.

7. Для применения компьютерных методов с использованием созданных математических моделей прогнозирования качества отливок при литье по газифицированным моделям созданы и апробированы комплексные методики расчета и оптимизации, определены теплофизические константы формы с пенополистироловой моделью в период ее заполнения и теплопотери на ее термодеструкцию.

8. Реализация новых технологий и оборудования в промышленности позволили в течении 1980 -1995 г. освоить свыше 150

наименований отливок массой от 0,05 до 500 кг из серого, высокопрочного чугуна, углеродистой и легированной стали, бронзы, латуни, алюминиевых сплавов и показать, что применение новых технологий литья позволяют снизить массу литых деталей на 10 -20%, повысить КИМ до 90 - 97% механические характеристики отливок на 10 - 30% и одновременно снизить капитальные затраты, сократить расход шихтовых и вспомогательных материалов на 30-50 %, энергоносителей на 15-45%, и вредные выбросы в 8 -10 раз.

9. На основании созданных технологии и оборудования организованы серийное и массовое производства отливок по газифицируемым моделям из железоуглеродистых и цветных сплавов в объеме 3000 т/год, что позволило достичь экономического эффекта в размере 500000 гривен/год, а также выполнить контракты с зарубежными партнерами на сумму 200000 тыс. долл. США.

Основные положения опубликованы в следующих работах:

1. Шуляк В.С., Шинский О.И., Анненко Л.П. Литье в магнитные формы. Киев : Общество "Знание" Украинской ССР, 1979, с. 27.

2. В.С. Шуляк, О.И. Шинский, А.И. Валигура. Технологические и технико-экономические аспекты литья по газифицируемым моделям - Киев: РВЭНТП ЧССР, 1991 - 18 с.

3. Канашко И.Г., Шинский О.И., Гурник А.Т. Состояние и перспективы применения литья по газифицируемым моделям на предприятиях отрасли. Москва, ЦНИИ ТЭ стройдормаш, 1984 С.48.

4. Шуляк В.С., Шинский О.И., Горская Л.В. Формозаполняемость магнитной формы. - Литейное производство, 1978, 3, с. 27.

5. Шинский О.И., Зяхор С.Ф. Расчет литниковых систем для магнитной формы с газифицируемой моделью. - Литейное производство, 1979, N5, с. 27-29.

6. Шинский О.И., Черненко Н.Г., Валигура А.И. Противопригарные покрытия для газифицируемых моделей. - Литейное производство 1991, N4 с 24-25.

7. Шинский О.И. Механизмы формирования качества отливок, полученных по газифицируемым моделям - Литейное производство. 1991, N 1 с 4-7.

8. В.С. Шуляк, О.И. Шинский, Ю.И. Хвастухин. Экологические аспекты литья по газифицируемым моделям - Литейное производство, 1993, N7, с. 17-19.

9. О.И. Шинский, Н.И. Бех, А.И. Валигура и др. Противопригарное покрытие для газифицируемых моделей. - Литейное производство. - 1994 - N10 с. 10-12.

10. О.И. Шинский, Г.В. Ефимов, Б.С. Гончар, Исследование коэффициентов сопротивления керамических литейных фильтров и их влияние на гидравлические параметры литниковой системы. Процессы литья. 1996. N2. с.18-28.

11. Особенности гидрогазодинамики заполнения вакуумируемых литейных форм/ О.И. Шинский, Б.С. Гончар, М. Брынзеа// Процессы литья. 1996. N3.

12. О.И. Шинский, В.А. Злубко. Особенности формирования и расчет противодавления в форме с газифицируемой моделью. - Процессы литья, 1993, N2, с. 117 - 123.

13. О.И. Шинский, Н.П. Александров, В.И. Валигура. Исследование процессов науглероживания и газификации углеродистой и перлитной сталей с кристаллизацией под давлением - Процессы литья. 1996, с.65.-77.

14. О.И. Шинский, Н.И. Бех, В.А. Злубко и др. Особенности заполнения форм переменного сечения и ее газовые режимы при литье по газифицируемым моделям. - Процессы литья, - 1995 - N1 с. 16 - 19.

15. О.И. Шинский. Механизм формирования пригара при литье по газифицируемым моделям. / Процессы литья. 1997. N1. с. 57-64

16. О.И. Шинский. Исследование условий остановки потока металла в форме с газифицируемой моделью. Процессы литья. 1997. N1. с. 14-22

17. О.И. Шинский, В.А. Злубко, М. Брынзеа Особенности управления процессом заполнения формы металлом при литье по газифицируемым моделям коленчатых валов легковых автомобилей. Процессы литья. 1995. N3. с. 19-29.

18. О.И. Шинский, Н.И. Бех, И.О. Шинский. Технологический процесс получения литых заготовок коленвалов автомобилей КАМАЗ по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением. Металлы и литье Украины, - 1994 - N11-12 с. 16-19.

19. Исследование термовременных параметров получения изделий из пенополистирола для литья по газифицируемым моделям О.И.Шинский, Х.Киореан, И.О.Шинский//Процесс литья. 1996. N2. с. 82 - 90.

20. О.И.Шинский. Технология и оборудование для литья железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям под высоким регулируемым давлением.- Металл и литье Украины, 1997, N1. с 25-28

21. Oleg I.Shinsky, Igor O.Shinsky "Theory and practice of Lost Foam Process (LFP)" из сборника докладов 62nd Международного

Конгресса литейщиков (МКТАЛ), США, Филадельфия, 19-23 апреля 1996г., стр. 47-52.

22. Oleg I. Shinsky, Igor O. Shinsky. New directions in theory and practice of Lost-Foam process. Из сборника докладов международной иранской конференции "Материалы и технологии в машиностроении", Тегеран, Технический университет, 1996, стр. 13-28.

23. O.I. Shinski, V.I. Litovka, M. Brinzea Cercetari privind obtinerea arborilor cotiti destinati automobilelor "DACIA" prin turnarea de precizie cu modele gazeificabile din polistiren in forme vidate. Revista de turnatorie. 1995. N1. c.27-33.

24. O.I. Shinski, H. Chiorean, I.O. Shinski, Kinetics of polystyrene granules in the static process of preliminary foaming. Metallurgy and New Materials, vol IV, 1996 N1. p.29-40.

25. O.I. Shinski, B.S. Gonchar, G.V. Efimov. Influenta filtrelor de turnatorie asupra parametrului hidraulic al retelei de turnare si consideratii privitoare la dimensionarea lor. Revista de turnatorie. 1996. N3. **p 27-35**

26. Cercetari privind influenta densitatii si presiunii agentului termic asupra timpului optim de expandare a modelelor cilindrice din polistiren /O.I.Shinsky, H.Chiorean, I.O.Shinsky //Revista de turnatorie. 1995. N1. p.34-37.

27. Studiul unei noi tehnologii de lucru privind imbunatatirea calitatii precizei dimensionale si a rugozitatii modelelor de polistiren/O.I.Shirisky, H.Chiorean, I.O.Shinsky// Revista de turnatorie. 1997. N1.

28. О.И. Шинский. Технология и оборудование литья по газифицируемым моделям. в кн. Доклады научно - технической конференции литейщиков КНР и СНГ. Харбин КНР 1992, с 130 - 133.

29. Шуляк В.С. , Шинский О.И. Механизм остановки потока и тепловые потери при литье по газифицируемым моделям в магнитную форму. В кн.: Оптимизация теплофизических процессов литья. Киев : ИПЛ АН УССР, 1977, с.144-149.

30. Шинский О.И., Грозина Н.Д. Некоторые особенности заполнения магнитной формы с верхним подводом металла. - В кн.: Повышение качества продукции литейных и металлургических производств. Первая республ. конф. молодых литейщиков Украины (Киев, апрель 1978 г.) : Тез. докл. Киев : ИПЛ АН УССР, 1978, с. 67-69.

31. Шинский О.И., Зяхор С.Ф. Формирование газового давления в зоне взаимодействия металл-модель при литье сплавов на основе меди. - В кн.: Литье по газифицируемым моделям. Киев : ИПЛ АН УССР, 1979, с. 12-19.

32. Шинский О.И., Шуляк В.С., Зяхор С.Ф. Некоторые особенности заполнения магнитной формы. - В кн.: Литье по газифицируемым моделям. Киев : ИПЛ АН УССР, 1979, с. 32-42.

33. Шинский О.И., Шуляк В.С. Расчет литниковых систем при литье по газифицируемым моделям. - В кн.: Литье по газифицируемым моделям. Киев: ИПЛ АН УССР, 1979. с. 54-61.

34. Найдек В.Л., Шинский О.И. Новые литые материалы, специальные способы их получения и обработки. в кн. Доклады III Всесоюзного научно - технического съезда литейщиков. М. ВНИИ ТЭМП, 1989, с 51-61.

35. Шуляк В.С, Нетес Л.Я., Шинский О.И. и др. Новые технологические процессы и оборудование в производстве отливок по газифицируемым моделям. в кн. Доклады III Всесоюзного научно - технического съезда литейщиков. М. ВНИИ ТЭМП, 1989, с 162-164.

36. Шинский О.И. Особенности формирования поверхностей отливок при литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением. В. кн. Плавка и рафинирование литейных сплавов. Киев: ИПЛ АН УССР, 1990, с 125-128.

37. Шинский О.И., Шульга В.Т., Вишнякова Л.П. и др. Технология получения гидроплотных отливок из нержавеющей сталей по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением. в кн. Плавка и рафинирование литейных сплавов. Киев: ИПЛ АН УССР, 1990, с 128-131.

38. Шинский О.И., Злубко А.А., Черненко Н.Г. и др. Механизмы формирования качества отливок по газифицируемым моделям в кн. Современные технологические процессы в литейном производстве. РДЭНТП - Киев. 1991, с 10 - 11.

39. Шинский О.И., Злубко В.А. Оптимизация основных технологических параметров и методов расчета литниковых систем при литье по газифицируемым моделям. в кн. Прогрессивные технологические процессы в литейном производстве: Хабаровск, Хабаровских дом науки и техники, 1991, с 140 - 142.

40. О.И. Шинский. Экологическая концепция технологии получения отливок. в кн. Проблемы экологии в металлургии, машиностроении и пути их решения. Тезисы докладов. Суздаль Научно - технический центр. II с.9-10.

41. О.И. Шинский, А.И. Валигура, П.Г. Наголкин и др. Исследование условий затвердевания отливок из железографитовых сплавов при литье по газифицируемым моделям. (тез. докладов.), Одесса, ОПИ, 1993.- с. 8-9.

42. О.И. Шинский, В.А. Злубко. Газовый режим и особенности заполнения формы с газифицируемой моделью под низким и высоким давлением. В кн. Литье с применением давления. Киев, ИПЛ АН Украины, 1991, с.146-156.

43. А.с. 648324 (СССР). Ступенчатая литниковая система. / В.С. Шуляк, О.И. Шинский, С.Ф. Зяхор - опубл. в Б.И. 1979. N7.

44. А.с. 904872 (СССР). Способ изготовления моделей из пенополистирола. / О.И. Шинский, В.А. Шевченко, А.И. Валигура и др. / Опубликовано в Б.И. 1982. N6.

45. А.с. 1060295 (СССР). Способ изготовления литейных форм. / О.И. Шинский, А.И. Валигура, А.П. Червинская и др. / Опубликовано в Б.И. 1983, N46.

46. А.с. 1063528 (СССР). Способ изготовления литейных форм вакуумной формовкой. / О.И. Шинский, Е.Ф. Князев, А.П. Артеменко и др. / Опубликовано в Б.И. 1983, N48.

47. А.с. 1079340 (СССР). Способ изготовления моделей из пенополистирола. / О.И. Шинский, Л.П. Вишнякова, Е.Ф. Князев и др. / Опубликовано в Б.И., 1983, N10.

48. А.с. 1156816 (СССР). Способ изготовления литейных форм. / О.И. Шинский, В.И. Московка, М.Б. Закута и др. / Опубликовано в Б.И. 1985, N19.

49. А.с. 1171186 (СССР). Способ изготовления неразъемных литейных форм. / О.И. Шинский, В.И. Московка, Е.Ф. Князев и др. / Опубликовано в Б.И. 1985, N29.

50. А.с. 1591292 (СССР). Устройство для литья выжиманием с кристаллизацией под давлением. / Ю.Е. Липовецкий, Л.Д. Минин, О.И. Шинский и др. / Опубликовано в Б.И. 1990, N33.

51. А.с. 1799659. Газифицируемая модель. / О.И. Шинский, Р.В. Чайкин, А.И. Валигура и др. / Опубликовано в Б.И. 1993, N41.

52. Патент РФ 2015790. Противопригарное покрытие для газифицируемых моделей. / О.И. Шинский, Н.Г. Черненко, А.И. Валигура и др. / Опубликовано Б.И. 1994, N13.

53. Патент РФ 2020040. Способ получения отливок по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением. / О.И. Шинский, В.А. Ефимов, А.И. Валигура и др. / Опубликовано Б.И. 1994, N18.

54. Патент РФ 2022705. Устройство для контроля положения и конфигурации фронта потока металла в литейной форме. / О.И. Шинский, В.А. Злубко, Б.И. Кишко и др. / Опубликовано Б.И. 1994, N21.

55. Патент України N244. Спосіб виготовлення моделей із пінополістіролу. / О.Й. Шинський, Л.П. Вишнякова, Є.Ф. Князев та ін./ Оpubліковано Б.П.В. 1993, N1.

56. Патент України N722. Устаткування для виготовлення виливків по моделям, що газифікуються, з кристалізацією під тиском. / Ю.Є. Липовецький, Л.Д. Мінін, О.Й. Шинський та ін./ Оpubліковано Б.П.В. 1993, N2.

57. Патент України N832. Устаткування для виготовлення виливків по моделях, що газифікуються з кристалізацією під тиском./ О.Й. Шинський, А.І. Валігура, О.Ю. Синчугов та ін./ Зареєстровано 10.04.1993р.

58. Патент України N901. Протипригарне покриття для моделей, що газифікуються. /О.Й. Шинський, А.Г. Черненко, А.І. Валігура та ін./ Зареєстровано 30.04.1993р.

59. Патент України N1183. Спосіб виготовлення виливків по моделям, що газифікуються з кристалізацією під тиском./ О.Й. Шинський, В.О. Єфімов, А.І. Валігура та ін./ Зареєстровано 30.06.1993р.

60. Патент України N1402. Установа для виготовлення та вибірки форм із сипучого матеріалу при литті по моделям, що газифікуються./ О.Й. Шинський, А.І. Валігура, О.Ю. Синчугов та ін./ Зареєстровано 16.08.1993р.

61. Патент України N14730А. Виготовлення ливарних магнітних форм./ О.Й. Шинський, В.І. Католиченко, І.В. Ткачук та ін. Оpubліковано 28.04.97 р.

62. Патент РФ N2044599. Устройство для получения отливок по газифицируемым моделям с кристаллизацией под давлением / О.И. Шинский, А.И. Валигура, В.И. Лозенко и др.// Оpubл. Б.И. 1995. N27.

63. Патент РФ N2079388. Способ изготовления неразъемных литых форм/ О.И. Шинский, В.И. Католиченко// Оpubліковано БИ 1997, N14.

65. А.с. СССР. Способ получения отливок / Н.П. Пухальский, В.А. Ефимов, О.И. Шинский и др.// Оpubліковано БИ 1991 N 44.

65. 4. О.И. Шинский, Б.С. Гончар. Гидрогазодинамика литья по газифицируемым моделям под регулируемым давлением. ФТИМС НАН Украины. 1996 - 40 с. Деп. в ГНТВ Украины.

Личный вклад автора в опубликованных работах, семь из которых без соавторов, состоит: [4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 36, 38, 41, 42, 65] - в разработке физических и математических

моделей, методик исследований, постановке экспериментов, обработке и анализе полученных данных при исследовании закономерностей газогидродинамики, взаимодействия продуктов термодеструкции пенополистирола с металлом, формирования пригара, формозаполняемости и формирования физико - механических, технологических свойств материала отливок и противопопригарных покрытий при литье железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям; [1, 2, 3, 6, 8, 9, 18, 20, 23, 27, 28, 33, 34, 35, 37, 39, 40] - в разработке схем новых технологических процессов, исходных данных для создания оборудования и систем экологической безопасности, а также разработке методов расчета и оптимизации технологических параметров геометрии элементов литниковых систем для литья железоуглеродистых и цветных сплавов гравитационной заливкой и под давлением.

Аннотация

Шинский О.И. "Газогидродинамика и технологии литья из железоуглеродистых и цветных сплавов по газифицируемым моделям"

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.04 - литейное производство, Физико - технологический институт металлов и сплавов Национальной академии наук Украины, г. Киев. 1997.

Защищается 43 научных работы, 22 авторских свидетельства и патента, в которых представлены физические, математические модели и результаты исследованных закономерностей газогидродинамики, взаимодействия жидкого и затвердевающего металла с продуктами термодеструкции пенополистирола, формозаполняемости, образования пригара при литье железоуглеродистых и цветных сплавов гравитационной заливкой, и под регулируемым давлением по газифицируемым моделям. При этом установлено, что противодействие в зазоре "металл - модель" составляет 0,8 - 24,0 КПа, а скорость движения металла в форме, ее заполняемость - в 1,2 - 2,5 и 1,3-3,0 раза ниже, чем в полый форму, а при наложении давления на жидкий металл, которое превышает противодействие в зазоре "металл - модель" скорость движения потока металла в форме не зависит от технологических факторов, а формозаполняемость на 10 - 15 % выше в сравнении с полый формой.

Исследованы закономерности и разработаны математические модели, которые описывают особенности термодеструкции модели, взаимодействие ее продуктов с жидким и затвердевающим металлом, а также формирование физико- механических свойств покрытий, сплавов при литье по газифицируемым моделям. При этом установлено, что качество отливок при гравитационном литье преимущественно зависит от смачиваемости жидкой фазой продуктов термодеструкции модели поверхности фронта потока расплава. В связи с этим для несмачиваемых железоуглеродистых сплавов объем дефектов на поверхности отливок в 1,5 - 3,0 раза выше, чем у таких из медных сплавов, которые смачиваются жидкой фазой. При наложении высокого давления на жидкий металл исключается влияние смачиваемости и создаются равные условия для формирования отливок из различных сплавов.

Разработаны новые технологические процессы получения отливок гравитационной заливкой с верхним, нижним подводом металла и под давлением по газифицируемым моделям внедрены в производство с экономическим эффектом свыше 500 тыс. гривен в год и за рубежом в виде контрактов на сумму свыше 200 тыс. американских долларов.

Ключевые слова: газифицируемая модель, газогидродинамика, термодеструкция, железоуглеродистые, цветные сплавы, технологии, отливка.

Анотація

Шинський О.Й. Газогідродинаміка і технології лиття з залізвуглецевих і кольорових сплавів по моделях, що газифікуються.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.04 - ливарне виробництво, Фізико - технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, 1997.

Захищаються 43 наукові праці, 22 авторські свідоцтва і патенти, в яких представлено фізичні, математичні моделі і результати досліджень закономірностей газогідродинаміки, взаємодії рідкого і твердуючого металу з продуктами термодеструкції пінополістиролу, формонаповнюваності, утворення пригару при литті залізвуглецевих і кольорових сплавів гравітаційною заливкою та під регульованим тиском по моделях, що газифікуються. При цьому встановлено, що протитиск в зазорі "металл - модель" складає 0,8 - 24,0 КПа і значно перевищує, а швидкість у формі та її заповнюваність в 1,2 - 2,5 та 1,3 - 3,0 рази нижча цих показників порожньої форми при гравітаційному литті, а при накладенні тиску на рідкий металл, що перевищує протитиск у зазорі "металл - модель", швидкість руху потоку металу у формі не залежить від технологічних параметрів, а формозаповнюваність на 10-15% вища у порівнянні з порожньою формою.

Досліджені закономірності і розроблені математичні моделі, що описують особливості термодеструкції моделі, взаємодії її продуктів з металом, а також формування фізико - механічних і технологічних властивостей покриттів, залізвуглецевих сплавів при литті по моделях, що газифікуються. При цьому встановлено, що якість відливки при гравітаційному литті переважно визначається змочуваністю рідкою фазою термодеструкції моделі поверхні фронту потоку розплаву. Для незмочуваних залізвуглецевих сплавів об'єм дефектів на поверхні відливок в 1,5 - 3,0 рази є вищим, ніж на таких з мідних сплавів, поверхня яких змочується рідкою фазою. Однак накладення тиску на рідкий метал виключає вплив змочуваності і створює рівні умови для формування відливок з різних сплавів.

Розроблені нові технологічні процеси отримання відливок гравітаційною заливкою і під тиском по моделям, що газифікуються, впроваджені у виробництво з економічним ефектом понад 500 тис. гривень/ рік та реалізовані зарубіж у вигляді контрактів на суму понад 200 тис. американських доларів.

Ключові слова: модель, що газифікується, газогідродинаміка, термодеструкція, залізвуглецеві, кольорові сплави, технології, відливка.

Resume

Oleg I. Shinsky "Gas - hydrodynamic and technology of casting from ferro - carbon and non - ferrous alloys by Lost - Foam casting".

Dissertation work pretends on science degree of doctor of technical sciences on specialty 05.16.04 - "Foundry", Physical - technological institute of metals and alloys of National academy of sciences of Ukraine, Kiev, 1997. defending 43 science work, 22 authors certificates and patents, in which introduce physical and mathematical models of hydro - gas dynamic, interaction between liquid and solidifying metal with thermal - destruction products of polystyrene model, form filling, burn - in defect during casting of ferro - carbon and non ferrous alloys by lost - foam casting with gravitational pouring and regulated pressure.

Thus obtained, that counter - pressure in gap "metal - model" tape about 0,8 - 2,4 KPa and velocity of metal movement in mould and form -filling characteristics in 1,2 - 2,5 and 1,3-3,0 times lower then in empty mould under gravitational pouring, then during applying pressure on liquid metal, which exceeds counter - pressure in gap "metal - model" velocity of metal movement in mould not depends from technological factors, and form - filling characteristics on 10 -15% higher in comparison with empty mould. Main laws has been investigated and mathematical models created, thetas describe especialities of models destruction, interaction of physical - mechanical and technological properties of coatings of ferro - carbon alloys by Lost - Foam process. In this way defined, that quality of castings under gravitational pouring in great extend determines of liquid phase wettability of the surface of the alloy flow.

For non - wettable ferro - carbon alloys defects volume on the surface of castings in 1,5 - 3,0 times higher than on the same type of castings from copper alloys, surface of which by liquid phase. But applying of pressure on liquid metal include influence of wetability and creates the equal conditions for obtaining of castings from various types of alloys.

New technological processes of casting production by Lost - foam process and developed in production with economical effects over 500 thousand UH/a and realized abroad in types of contracts on sum over 200 thousand of US\$.

Key words: polystyrene model, gas hydrodynamic, thermal destruction, ferro - carbon, non - ferrous alloys, technologies, casting.

Підп. до друку 05.06.97

Формат 60×84/16

Папір друк №1. Спосіб друку офсетний. Умовн. друк арк. 2.0.

Умовн. фарбо. відб. 2.0. Обл. - вид. арк. 2.0.

Тираж 100. Зам. № 14-97

Друкарня фірми "ЕСЕ"

252142, Київ, пр-т Вернадського 34/1



439906

4-2804
AB 38.048

