

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Физико-технологический институт металлов и сплавов

ДОРОШЕНКО ВЛАДИМИР СТЕПАНОВИЧ

doro55v@gmail.com

т. +38-066-1457832

УДК 621.74.045.072.2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ
ПЕСЧАНЫХ ФОРМ ИЗ СУХОГО ДИСПЕРСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА ЛЕГКОВЕСНЫХ ЛИТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Специальность 05.16.04 - литейное производство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев – 2018

Диссертация является рукописью.

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

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор. Шинский Олег Иосифович, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, заведующий отделом, г. Киев

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Акимов Олег Викторович,

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» МОН Украины, заведующий кафедрой литейного производства, г. Харьков

доктор технических наук, профессор

Лысенко Татьяна Владимировна

Одесский национальный политехнический университет МОН Украины, заведующий кафедрой технологии и управления литейными процессами, г. Одесса

доктор технических наук, доцент

Наумик Валерий Владиленович,

Запорожский национальный технический университет, проректор по научной работе и международной деятельности, г. Запорожье

Защита состоится «_22_» __ноября__ 2018 в __11__ часов на заседании диссертационного совета Д 26.232.01 в Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины по адресу: 03142, г.. Киев, бул. Вернадского 34/1, факс. 452-35-15, e-mail: metal@ptima.kiev.ua

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины по адресу: 03142, г.. Киев, бул. Вернадского 34/1.

Автореферат разослан «_18_» __октября__ 2018

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 26.232.01

доктор технических наук

Н. И. Тарасевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важность совершенствования теории и технологии песчаной формы для литейного производства обоснована тем, что в таких формах производят 75-80 % тоннажа отливок. Основная доля трудоемкости изготовления отливок, а именно 50-70 % по П. Н. Аксенову, мощности оборудования и площадей литейного цеха приходится на формовку, включая приготовление формовочных смесей и изготовление стержней. Экологические загрязнения, связанные с материалами и технологией формы, могут достигать 80 % от всех вредностей литейного цеха. Поэтому трудно планировать оздоровление культуры литейного производства с учетом ужесточения экологических норм без существенного снижения загрязнений «по вине» песчаной формы.

Украинская научно-техническая формовочная традиция, включающая работы А. М. Петриченко, А. Н. Цибрика, А. С. Лакеева, С. П. Дорошенко, Ф.Д. Оболенцева, В. С. Шуляка и др., общеизвестна среди литейщиков. Развивая это направление, научная школа проф. О. И. Шинского, представителем которой является диссертант, акцентирует внимание на физико-химии процессов литья в формы из сухих легко регенерируемых смесей многократного применения, упрочняемых преимущественно физическими методами, включая использование градиента газового давления в песчаной среде за счет вакуумирования, как наиболее ресурсосберегающих и экологически безопасных литейных процессов.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в отделе физикохимии процессов формообразования Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины в соответствии с планами научно-исследовательских работ: №III-4-02.501 “Создание теоретических основ и технологических методов повышения объемных и поверхностных свойств литых изделий из черных и цветных металлов” (ДР №0207U006017), №III-17.04.536 “Разработка теоретических и технологических основ получения отливок с управляемой структурой и свойствами в литейных формах с дифференцированными теплофизическими характеристиками” (ДР №0209U008369), №III-34-08.570 “Разработка теоретических основ и технологии получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов по моно-, многослойным и армированным одноразовым моделям, которые испаряются” (ДР № 0212U005039), №III-14-12-623 “Разработка теоретических и технологических основ комплексного контроля, управления физико-химическими и технологическими процессами формообразования с применением дистанционного компьютерного мониторинга характеристик отливок, состояния оборудования и экологической безопасности окружающей среды” (ДР №0112U003154).

Цель работы и задачи исследований. Исследовать процессы регулируемого охлаждения отливок в песчаных формах, явления фильтрации газа и жидкости в пористой среде формы; на этой основе разработать теоретические принципы и технологию литья в формах с дифференцированными теплофизическими характеристиками с последующим применением их для производства легковесных литых конструкций, а также экологически безопасный процесс литья по ледяным моделям и методы использования 3D технологий и фильтрационных явлений в процессах формовки. Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие научные и технологические задачи:

1. Установить основные закономерности теплообмена при охлаждении отливки в песчаной форме с сыпучим дисперсным наполнителем и возможности ускорения такого охлаждения для изменения свойств отливки путем изменения различных технологических

факторов, в отличие от охлаждения отливки в традиционной песчаной форме, которое определяется теплопроводностью песка со связующим в монолитной песчаной конструкции.

2. Установить закономерности воздействия текучих хладагентов на охлаждение отливок при дифференцированном охлаждении формы в системе «металл - форма» и разработать процессы интенсивного конвективного теплопереноса при охлаждении отливки в форме.

3. Изучить пути металлосбережения при конструировании отливок, и разработать новые методы проектирования и моделирования легковесных литых конструкций с использованием новых газонаполненных и легкоплавких материалов для их моделирования.

4. Установить закономерности формообразования экологически чистых ледяных моделей; создать способы и разработать методику расчета технологических параметров получения таких моделей из жидкоподвижных композиций путем замораживания в различных средах а также в зависимости от геометрической формы таких моно-, многослойных и армированных разовых моделей; получить экспериментальные подтверждения способов замораживания и характеристик прочности в зависимости от технологических условий производства моделей.

5. Установить закономерности формирования поверхностного слоя ледяных моделей для разработки технологических процессов нанесения противопригарного покрытия на поверхности таких моделей и изготовления по ним оболочковых форм.

6. Разработать новые технологии удаления из формы ледяных и пенопластовых моделей, установить закономерности самопроизвольной и принудительной фильтрации жидкого материала (расплава или раствора) разовой модели в песчаную среду формы с одновременным созданием прочности дисперсных сыпучих формовочных смесей и образованием адгезионно-когезионного комплекса в объеме оболочковой формы на глубину фильтрации такого расплава, раствора или содержащегося в них реагента, упрочняющего оболочку.

7. Разработать основы физикохимии формообразования песчаной оболочки с использованием при плавлении ледяной модели: теплоносителя, вакуумирования литейной формы и фильтрации в песчаный наполнитель расплава ледяной модели с подсушкой формы, регулирования глубины и скорости фильтрации, осаждения в близлежащем к модели слое формы технологических примесей (связующего или отвердителя) в виде нефильтрата при проникновении воды в виде фильтрата вглубь формы для создания ряда способов получения оболочковых форм с минимальным содержанием химически твердеющих связующих композиций, в частности, включающих недорогие легкорегенерируемые кристаллогидратные связующие.

8. Разработать и внедрить в производство технологические процессы получения по ледяным моделям легкоуплотняемых песчаных форм из сухого дисперсного наполнителя с применением их для производства легковесных литых конструкций, включая разработку теоретических и технологических основ 3D-процессов формовки деформированием песчаных изделий, и получения легковыбываемой песчаной формы с дифференциальной прочностью на основе быстродействующего смешивания путем совмещения двух двухфазных дисперсных систем в трехфазную с холодным твердением полученной формовочной смеси в контакте с оснасткой, в которых сочетаются формообразование с компьютерным управлением, криотехнологией, уплотнением песчаной смеси с неорганическими связующими и возможностью ее повторного использования до 90 %.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые экспериментально показано, что формы с дисперсным наполнителем без связующего позволяют увеличить скорость охлаждения отливки в 1,2–2,0 раза (0,068 – 0,138 °C/с) путем изменения теплопроводности, пористости наполнителя и конвективной составляющей теплопереноса в разработанных способах литья с фильтрацией газообразного или жидкого хладагента сквозь песчаную среду формы, в отличие от охлаждения отливки в традиционной песчаной форме, которое определяется теплопроводностью песка со связующим в виде монолитной конструкции.

2. Путем математического моделирования тепловых процессов получено выражение для коэффициента теплоотдачи α , с помощью которого по результатам калориметрии впервые определили численные его значения для различных способов принудительной конвекции в литейной форме как метода регулирования скорости охлаждения отливки путем дозированного увлажнения песка и фильтрации влаги в вакуумируемой форме или перемещения песка в контейнере, что повысило скорость охлаждения отливок в 1,2–1,5 (0,198–0,305 °C/с) по сравнению с отсутствием такой конвекции.

3. Созданы методы физического, математического и компьютерного проектирования легковесных ячеистых материалов путем наследования ресурсосберегающих структур природы, как их описывает современное естествознание, исходя из концепции воздействия конструкции литейной модели с двумя текучими средами: металлом, замещающим газифицируемую модель или заполняющим литейную полость, и песчаной средой, обтекающей модель снаружи; и на основе этих методов получено 11 патентов Украины на легковесные ячеистые конструкции литых изделий и их моделей.

4. Разработаны математические модели формообразования ледяных моделей в виде аналитических выражений для расчета технологических характеристик формообразования этих моделей из жидкоподвижных композиций путем их охлаждения, кристаллизации, переохлаждения, замораживания в различных средах, а также в зависимости от геометрической формы таких моно-, многослойных и армированных разовых моделей; получены экспериментальные данные кинетики замораживания и прочности на изгиб в зависимости от температуры таких моделей.

5. Установлены условия образования квазижидкого слоя на поверхности ледяных моделей, и присущий ему электрический заряд использован для разработки теоретических и технологических основ создания и применения порошковых противопожарных и герметизирующих покрытий для ледяных моделей, наносимых методом электроосаждения; такие покрытия подтверждены рядом примеров и отработаны для промышленного использования.

6. Научно обоснованы и разработаны способы создания прочности дисперсных сыпучих формовочных смесей путем перевода материала разовой модели в жидкое состояние (расплав или раствор), фильтрации его в формовочную смесь со стороны литейной полости формы и образования адгезионно-когезионного комплекса в объеме оболочковой формы на глубину фильтрации такого расплава, раствора или реагента, содержащегося в них; при этом такой расплав или указанный реагент вступает в химическую реакцию с материалом формовочной смеси или подвергается гелеобразованию, что приводит к формированию пространственной структуры пленок связующего в твердом состоянии.

7. Установлено влияние вакуумирования на потерю массы вакуумируемой песчаной формы в период времени плавления и фильтрации в песчаный наполнитель продуктов ледяной модели при подсушке формы, влияние температуры на глубину и скорость фильтрации, закономерность осаждения в близком к модели слое формы технологических

примесей (связующего или отвердителя) в виде нефильтрата при проникновении воды вглубь формы в виде фильтрата, положенные в основу способа получения оболочковых форм с минимальным содержанием этих примесей; на натурных образцах ледяной модели определена продолжительность твердения оболочковой формы течение 5-7 мин. с начала увлажнения и гидратации песчаной смеси, содержащей быстротвердеющий цемент в количестве 15-20 %.

8. Разработаны научные и технологические основы 3D-процессов формовки для способов получения песчаных изделий деформированием, и получения песчаной формы с дифференциальной прочностью на основе струйного смешивания - совмещения двух двухфазных дисперсных систем в одну трехфазную с холодным твердением полученной формовочной смеси в контакте с оснасткой, в которых сочетаются формообразование с компьютерным управлением, криотехнологией, уплотнением песчаной смеси с неорганическими связующими и возможностью ее повторного использования до 90 %.

Объект исследования. Процессы получения песчаных форм с возможностью применения их для производства легковесных литых конструкций, ресурсосбережения и экологической безопасности такого производства.

Предмет исследования. Процессы тепломассообмена в системе взаимодействия разовой модели и отливки с песчаной формой при применении преимущественно экологически чистых модельно-формовочных материалов с высокой степенью повторного использования.

Методы исследований. Исследования закономерностей тепломассообменных процессов в песчаной форме при затвердевании и охлаждении отливок, влияния на эти процессы жидких и газообразных хладагентов, а также процессов фильтрации удаляемых материалов модели выполнены с использованием компьютерных методов термического анализа преимущественно в специально сконструированном α -калориметре, методов теплофизического и математического моделирования охлаждения (нагрева) образцов металла отливок, разовых моделей и форм, для измерения прочности образцов с применением криотехнологии – разработанного автором экспресс-метода, кроме того фильтрационный массоперенос исследовали методами гравиметрии и введения контрастных веществ, при этом характеристики крио процессов регулировали при помощи стандартного морозильного и холодильного оборудования, позволяющего охладить оснастку и модели до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а тепломассоперенос (фильтрационные процессы) в форме интенсифицировали с помощью водокольцевого вакуумного насоса, создающего остаточное давление в форме до 20 кПа.

Практическое значение полученных результатов. Разработаны процессы с интенсивным конвективным теплоотводом путем применения текучих хладагентов, вплоть до возможности совмещения литья с термообработкой отливок в песчаной форме из сухого дисперсного наполнителя, что не применялось для традиционной песчаной формы из песка со связующим в виде монолитной конструкции. На основе изучения явлений фильтрации хладагента в песчаной форме разработана технология получения оболочковых форм фильтрационной формовкой с пропиткой и упрочнением песчаной смеси расплавом ледяной модели одновременно с удалением такой модели. Для этого разработаны ряд процессов получения моно-, многослойных и армированных ледяных моделей, нанесения на них моно-, многослойного порошкового покрытия, которое для мелких моделей служит тонкой оболочковой формой, а также технология создания прочности холоднотвердеющей смеси оболочковой формы преимущественно с неорганическими связующими, в частности, кристаллогидратами. По опыту использования текучих сред в литейной форме создан метод, включая десяток примеров его применения, проектирования

металлосберегающих литых ячеистых конструкций по аналогам простейших структур природы, как процесс перенесения свойств природных конструкций на рукотворные литые материалы, включая получение их непрерывным способом и по моделям из новых легковесных газонаполненных углеводородов. Разработаны технологические способы 3D-формовки песчаных изделий деформированием, получения песчаной формы при струйном смешивании и путем послойного аддитивного нанесения двухфазных дисперсных компонентов с образованием формы из холодного твердеющей смеси, в этих способах использованы элементы криотехнологии и компьютерного управления. Разработана пооперационная схема процессов литья по ледяным моделям для компьютерного мониторинга литейного процесса, определены характеристики для мониторинга и их пределы с тремя вариантами удаления ледяной модели и подготовки формы к заливке металлом, а также разработан проект опытно-промышленного участка литья по ледяным моделям площадью 110 м².

Экономический эффект от внедрения опытно-промышленного процесса литья по ледяным моделям на производстве составил 1248 грн. на 1 тонну литья при экономии материалов, или на годовую программу МВПП "Мекол" объемом 10 тонн - 12480 грн. (Акт от 26.12.2011 г.). Расчетный эффект на 1 тыс. Т в пересчете на цены 2017 составляет 3744000 грн. для производства отливок из серого чугуна. Опытно-промышленной проверкой способов литья в песчаных формах с дифференцированными теплофизическими свойствами установлено, что экономический эффект от внедрения этой технологии для литья цветных сплавов составит 23520 грн. (Акт ООО «Втортех» от 10.06.1999 г.), Черных сплавов - 192000 грн. (Акт ООО ПП «КТД» от 06.07.2007 г..) И 216600 грн. (Акт ЧП «Видикаст» от 29.07.2011 г.), А также положительное заключение опробования способов литья, разработанных с участием Дорошенко В. С. (акт ПАО «КАМЕТ» от 29.07.2011 г.).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических конференциях 3-11 «Литье», Запорожье, 2007-2016; «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии», Киев, 2010; «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология», Киев, 2011 и 2012; опубликованы в материалах: 3-7 International Conference "Strategy of Quality and Education", Varna, Bulgaria, 2007–2011; VIII международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, 2015; I-V международных конференциях «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» 2009–2015, Краматорск; российских научно-технических конференциях «Современные проблемы металлургического производства», Волгоград, 2002 и «Экология и безопасность в техносфере», Орел, 2011; X–XIV научно-практических конференциях «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Київ, 2012–2016; XIV международной научно-технической конференции «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах», Запорожье, 2015; конференции «50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС – прошлое, настоящее, будущее», Киев, 2008.

Публикации. Результаты диссертации изложены в 56 статьях периодических профессиональных изданий (в т.ч. 26 в зарубежных), 33 тезисах конференций, 4 авторских свидетельствах СССР, 8 патентах России и 42 патентах Украины, и не содержат материалов кандидатской диссертации соискателя.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 6 глав основной части, заключения и списка использованной литературы из 326 наименований и 5 приложений, содержит 120 рисунков, 18 таблиц. Основная часть изложена на 304 страницах, общий объем - 385 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи исследований и основные результаты исследований, их научная новизна и практическая значимость, показана связь с основными научными программами, изложенный личный вклад соискателя в выполнении работы и апробации результатов.

В первом разделе проведен анализ литературных данных, изложены состояние и перспективы развития теоретических и технологических основ песчаного формообразования из сухих дисперсных наполнителей, а также современный уровень развития методов получения отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов по моно-, многослойным и армированным разовым моделям, как наиболее точных способов литья. Рассмотрены процессы литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) в литейных формах из дисперсных наполнителей, упрочненных физическим способом, а также состояние развития технологии литья по выплавляемым моделям (ЛВМ). Проанализированы предпосылки совершенствования известных ресурсоэффективных экологически безопасных криологических процессов, а также влияние физических характеристик сыпучих наполнителей на технологические свойства вакуумируемых песчаных форм, влияние технологических добавок к дисперсным наполнителям формы на теплофизические и технологические свойства формовочных смесей и кинетику теплового режима отливки. Рассмотрены влияние баланса газового давления в вакуумируемой литейной форме из сухих дисперсных наполнителей на условия создания прочности стенки литейной формы, технология формообразования из песчаных смесей с кристаллогидратами. Сформулированы цели и задачи исследований исходя из следующих актуальных проблем.

Условием получения отливок с заданными структурой и свойствами является управление интенсивностью теплоотвода в литейной форме. Поскольку в традиционных методах формообразования отливка сопровождается формой от заливки расплава до полного охлаждения, то способы управления теплоотводом сводятся к изменению теплофизических свойств формы, либо к принудительному охлаждению. Но при варьировании таких свойств и принудительного охлаждения скорость затвердевания и охлаждения отливки из-за образования зазора можно изменить в относительно небольших пределах: для формы песчаной – на 10%, из специальных огнеупоров или металлической дробы – на 50%, металлической, в том числе охлаждаемой – в 2-4 раза. Если еще учесть, что интенсивность теплоотвода по ходу охлаждения монотонно уменьшается (а условия структурообразования часто требуют циклического или даже знакопеременного теплоотвода), то становится ясно, что в рамках традиционных методов формообразования получить отливки с заданными структурой и свойствами весьма затруднительно. Наиболее близки к реализации управления в широком интервале теплоотводом методы, основанные на физических способах упрочнения песчаной формы: разновидности ЛГМ-процесса, литье в вакуумируемые, магнитные и замороженные формы. Однако ни один из них в отдельности не решает всей проблемы, и каждый имеет существенные недостатки. Напрашивается мысль о синтезировании различных физических воздействий в процессах формообразования, включая использование таких воздействий в формах со связующим для создания высокоэффективных методов литья.

Отсюда основные направления исследований процессов формообразования заключаются в изучении механизма упрочнения дисперсных неметаллических материалов, условий формирования качества поверхности отливок, процессов тепломассопереноса в поле сил управляемого физического воздействия, включая создание градиентов прежде всего давления, концентрации и температуры, в т.ч. криовоздействие, вакуумирование;

создание на их основе новых экологически чистых ресурсосберегающих технологий. Сохраняется актуальность внедрения нетоксичных (преимущественно неорганических) связующих и добавок, создание на их основе новых способов формовки и смесеприготовления с учетом огромного опыта упрочнения смеси за счет протекания химических процессов, совершенствование методов регенерации, обезвреживания вредных выбросов. Растет важность расширения сферы компьютеризации при разработке и контроле процессов формовки, конструировании отливок, создании баз данных, систем экспертных оценок, методов оптимизации материалов и технологий, в т. ч. по одному из главных критериев – снижению металлоемкости отливок.

Во втором разделе изложено развитие теоретических и технологических основ формообразования из песчаного наполнителя при получении форм с дифференцированными теплофизическими характеристиками (рис. 1). В отличие от охлаждения отливки в традиционной песчаной форме, которое определяется теплопроводностью формовочных материалов со связующим как монолитной конструкции, в песчаной среде вакуумируемой формы впервые системно использовали градиент давления для фильтрации хладагентов. А текучесть песчаного наполнителя - для дозированного удаления его из формы или гравитационного течения как подвижной среды в конвективном теплообмене при интенсификации охлаждения отливки.



Рис. 1. Структура исследований и технологических разработок по регулированию скорости охлаждения отливки в литейной форме.

Проведены исследования теплообмена между отливкой и формой в условиях принудительного охлаждения отливки газообразным, жидким хладагентами, вакуумированием формы и механическим перемешиванием наполнителя. Термическим анализом охлаждения отливки и металлического образца в литейной песчаной форме экспериментально показано, что формы с дисперсным наполнителем без связующего позволяют увеличить скорость охлаждения металлического образца в 1,2–2,0 раза путем

увеличения теплопроводности, уменьшения пористости наполнителя или охлаждения его перед формовкой, увеличения конвективной составляющей теплопереноса с применением продувки формы воздухом и одновременным вакуумированием, либо введением воды в песчаные слои формы, близкие к отливке.

Теплопередачу при конвективном теплообмене описывает закон Ньютона - Рихмана, в котором определяющую роль играет коэффициент теплоотдачи α . Если коэффициент теплопроводности λ является физическим параметром и определяется физическими свойствами вещества теплоотводящего слоя (используется при традиционной формовке), то коэффициент теплопередачи α не является физической постоянной для того или иного вещества. В нестационарных процессах теплообмена α представляет собой некоторую функциональную зависимость от многих факторов. Поэтому для определения коэффициента α применили экспериментальный метод исследования процесса теплообмена охлаждаемого цилиндрического образца в песчаной среде, используя предложенную математическую модель на основе баланса тепловых потоков.

На рис. 2 а показаны тепловые потоки в форме из сухого кварцевого песка при заливке расплавом и охлаждении цилиндрической отливки диаметром 50 мм из серого чугуна. Монотонное уменьшение кондуктивного потока q_T связано с уменьшением температурного напора во времени. Рост конвективного потока q_K по мере охлаждения отливки связан с увеличением контактного зазора отливки с поверхностью формы вследствие ее термической усадки и проникновением в зазор потоков воздуха, усиливающих конвекцию. Затем по мере прогрева слоя песка имеют меньший перепад температуры, и значение q_K убывает.

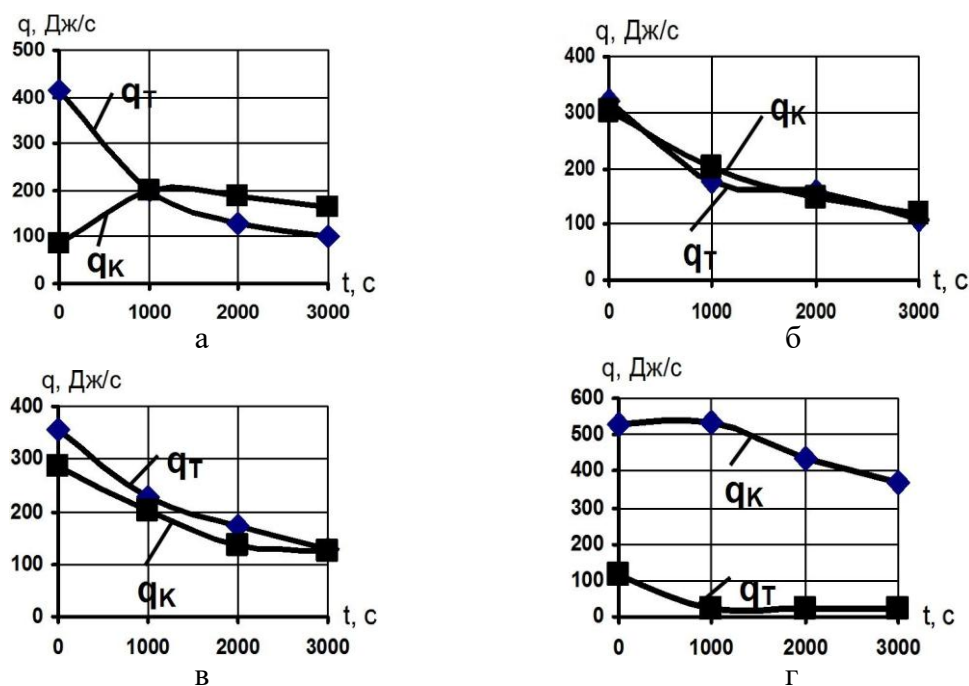


Рис. 2. Изменение величины кондуктивной q_T и конвективной q_K составляющих теплового потока во времени t при охлаждении цилиндрической отливки из серого чугуна в форме: а - из сухого песка; б - с добавкой в форму 200 г воды; в - с добавкой в форму 800 г воды; г - с дозированным высыпанием песка из формы через 1 мин после заливки.

На рис. 2 б показаны тепловые потоки при получении указанной цилиндрической отливки при заливке расплавом чугуна формы из сухого кварцевого песка с добавкой через 1 мин. после заливки 200 г воды в верхнюю часть формы по металлической трубке с отверстием на расстоянии около 10 мм от отливки. Вода в течение до 10 с впиталась в

вакуумируемый песок, конец трубки в песке размещали так, чтобы отливка находилась в контейнерной опоке на пути фильтрации воды в сторону вакуум-фильтров.

В этом случае подача воды как хладагента сразу увеличила составляющую q_k , которая в начальный момент возросла более чем в 3 раза по сравнению с графиком (рис. 2 а). Вода наряду с воздухом участвует в конвективном переносе, а фазовый переход воды в пар с последующей конденсацией пара в более холодных зонах песка также интенсифицирует теплоперенос. Обе составляющие теплового потока по величине практически равны на протяжении всего цикла охлаждения отливки, которое происходит быстрее по сравнению с предыдущим графиком.

На рис. 2 в показаны тепловые потоки для той же цилиндрической отливки в форме из сухого кварцевого песка с добавкой в эту форму 800 г воды (3,2 % от массы песка) через 1 мин. после заливки ее металлом. Вода за 26 с впиталась в вакуумируемый песок формы. При этом увеличение подачи в форму воды практически не изменило конвективную составляющую по сравнению с предыдущим экспериментом. Увеличение влажности слоя песка приводит к уменьшению его газопроницаемости, что тормозит конвективный перенос движущейся среды. Путем повышения влажности песка увеличили его теплопроводность за счет увеличения плотности увлажненного песка, что повысило q_t , чем в предыдущем случае, что в сумме на всей продолжительности охлаждения усилило теплоотвод.

На рис. 2 г показаны тепловые потоки при получении указанной цилиндрической отливки при следующих условиях. По истечении 1 мин. после заливки формы расплавом чугуна песок самопроизвольно высыпался из формы в течение 17 мин. после открывания пробки отверстия диаметром 15 мм, выполненном в нижней части контейнерной опоки. Вокруг отливки песок медленно опускался, обтекая ее стенки. Во время его гравитационного течения холодные слои песка нагреваются при контакте с отливкой и нагретыми песчинками и переносят тепло, высыпаясь из полости опоки. Отливка плавно опускается на дно контейнерной опоки и охлаждается на воздухе при его свободной конвекции. Для иллюстрации этого процесса обтекание струями движущейся среды показано на рис. 3 для горизонтально расположенного цилиндра (а) и наклонной пластинки (б), а также струями свободной конвекции воздуха при охлаждении цилиндра (в), в частности, по окончании высыпания песка из опоки.

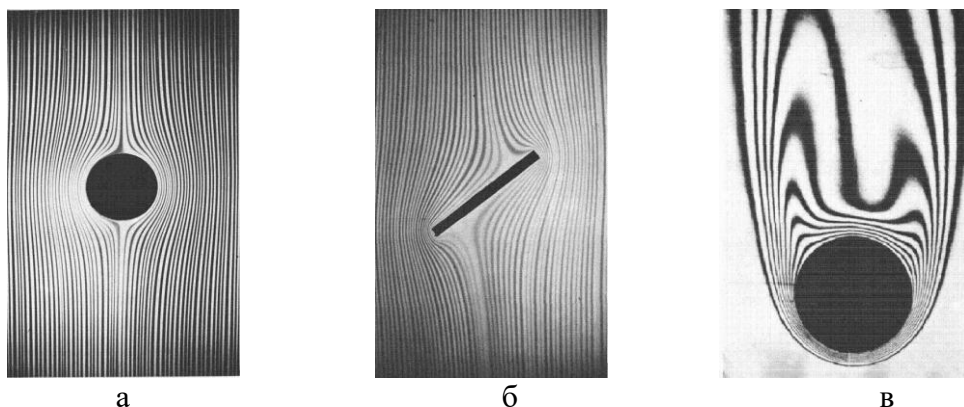


Рис. 3. Течение среды при обтекании: а - горизонтально расположенного цилиндра; б - наклонной пластинки; в - струи свободной конвекции воздуха при охлаждении цилиндра.

Охлаждение на воздухе нагретых деталей является одной из операций термической обработки металлоизделий, а воздух относится к одной из закалочных сред. В этом случае q_k практически полностью определяет весь тепловой поток, монотонное уменьшение которого наблюдается до момента извлечения отливки из опустошенной от песка опоки.

На рис. 2 г видно, что в начальный период времени движения песка конвективная составляющая в 5 раз больше кондуктивной, а затем последняя снижается практически до нуля при высыпании песка. Низкое значение q_t вызвано снижением плотности ранее виброуплотненного песка (разуплотнением) после его постепенного послойного сдвига и приведения в движение при повышении его пористости, которая уменьшает теплопроводность песка. Сравнение графиков на рис. 2 а и 2 г показывает, что увеличение пористости песка за счет постепенного разуплотнения от нижних слоев к верхним и в начальный момент в 4 раза по графику на рис. 2 а снижает теплопроводность и увеличивает конвективный поток газа между песчинками. Но основную роль выполняет течение песка с его нестационарной гидродинамикой движения. Текущий песок служит средой конвективного переноса тепла с перемешиванием частиц, за счет чего резко (почти в 6 раз по рис. 2 а и 2 г) возрастает q_k , и до момента высыпания песка наблюдается его незначительный рост.

Расчетные значения коэффициента $\alpha = q_k / (S \cdot \Delta T)$ в зависимости от времени для рассматриваемых условий охлаждения цилиндрической отливки из СЧ20 в литейной форме, тепловые потоки которых отражены на рис. 2 а – г, показан на рис. 4 а. На первых трех кривых видно, что введением в песок воды достигали того, что среднее значение α при введении 200 г выше, чем при введении 800 г. Добавление воды аналогично переводу форму в теплофизическом плане из категории сухой формы в категорию сырой формы, случаи с описанием теплофизики такого перевода в литературе не выявлены.

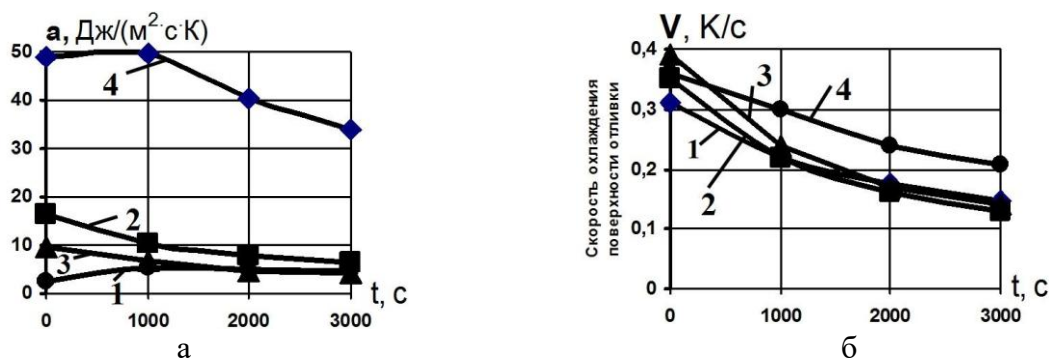


Рис. 4. Изменение коэффициента теплоотдачи (а) и скорости охлаждения (б) при охлаждении цилиндрической отливки из СЧ20 от времени t : 1 – без добавки воды в форму; 2 – с добавкой 200 г воды в форму; 3 – с добавкой 800 г воды в форму; 4 – с высыпанием песка.

Различие тепловых свойств сухих и сырых форм при применении одной методики тепловых расчетов вызывает необходимость учитывать перенос теплоты за счет испарения воды. При подаче воды в песок вблизи отливки влага интенсивно испаряется. Поверхностный слой формы вблизи отливки быстро прогревается, фронт испарения перемещается вглубь формы, а пар, проходя по порам, конденсируется в непрогретых местах формы, перенося при этом большое количество теплоты. В связи с этим эффективная теплопроводность увлажненной формы возрастает по сравнению с теплопроводностью сухой формы, что также сказывается на возрастании скорости охлаждения V (рис. 4 б).

Для кривой 4 (рис. 4 а), когда практически весь процесс определяется потоком q_k , сначала до постепенного разуплотнения (из состояния покоя), вовлечение песка в гравитационное движение и при последующем обтекании отливки верхними холодными слоями песка до его полного высыпания идет незначительный рост значения α . А затем процесс определяется свободной конвекцией воздуха с падением значения α по мере

охлаждения отливки. При этом величина α согласно кривой 4 в 5-6 раз выше значений, описанных кривыми 1-3. Это показывает высокую эффективность использования сыпучести песка при его самопроизвольном высыпании с последующей свободной конвекцией воздуха для регулирования скорости охлаждения отливки (рис. 4 б). Увлажнение песка в близких слоях к отливке до 3,3 % воды по массе песка увеличивает скорость охлаждения в начальный момент на 26 %, а процесс начала сдвига песка при высыпании – на 16 %. Но в целом за период охлаждения в течение 50 мин. после заливки металла увлажнение до 0,83 % увеличивает среднюю скорость охлаждения на 0,7 %, увлажнение до 3,3 % увеличивает эту скорость на 10,1 %, а дозированное высыпание песка в течение 17 мин. и последующее охлаждение на воздухе – на 35,8 %.

Путем математического моделирования тепловых процессов получено выражение для коэффициента теплоотдачи α , которое позволило по данным калориметрии определить ряд численных его значений для расчета способов принудительной конвекции при изменении ее вида и интенсивности в литейной форме из сухого песка. Каждому значению α соответствуют скорость охлаждения, влияющая на характеристики структуры и механические свойства металла, что позволяет регулированием режимов теплопереноса изменять функциональные свойства отливок.

Разработан ряд технологических способов создания дифференцированных характеристик формы и регулирования охлаждения отливки в вакуумируемой форме путем фильтрации газообразного, жидкого хладагентов и движения частиц песка. Установлено, что в производственных условиях эффективными способами повышения теплопереноса в кварцевом песке, традиционно применяемом в производстве отливок процессами ЛГМ и вакуумно-пленочной формовки (ВПФ), являются дозированное увлажнение песка путем введения в него воды после заполнения формы металлом в слои близкие к отливке с использованием всасывающего действия вакуума формы, а также перемещения песка в контейнере во время охлаждения отливок с определенным экспериментально повышением скорости охлаждения в 1,2-1,5 раза по сравнению с указанными способами формовки без принудительного охлаждения.

При выполнении теоретического анализа и обобщения экспериментальных данных исследования дифференцированных свойств литейной формы использовали принцип направленности при создании газового режима формы как метод оптимизации конвекции и предупреждения газовых дефектов отливок. Предложены меры по созданию направленного газового режима литейной формы с ростом градиента газопроницаемости формовочной смеси по мере удаления от границы контакта отливки с формой, а также меры по направленному затвердеванию отливки с учетом следующей зависимости коэффициентов теплоаккумулирующей способности вакуумируемых, сырых песчано-глинистых, замороженных форм и внешнего чугуна $b_{ВФ} < b_{ПФ} < b_{ЗФ} < b_{ЧХ}$.

Впервые предложен механизм создания дифференцированных свойств формы путем сочетания физических явлений, связанных с пониженным газовым давлением в порах песка, а также с воздействием низких температур процессов с элементами криотехнологии, показаны преимущества совместного использования технологии вакуумируемой и замороженной формы. Выполнены сравнительный анализ характеристик форм, упрочняемых с использованием физических явлений, расчет энергозатрат на примере получения стальной отливки с применением низкотемпературных форм и стержней, экономическое обоснование их применения с учетом расчета энергозатрат, анализ особенностей и преимуществ совместного применения вакуумируемой формы и низкотемпературного стержня. Показаны преимущества создания общего оборота смеси для форм и стержней указанных видов. Достижение дифференцированных

теплофизических характеристик вакуумируемых и замороженных форм для направленного затвердевания отливки легло в основу способов снижения температуры с повышением охлаждающей способности песчаной формы в целом или отдельных ее частей, а также поддержания низкой температуры замороженной формы путем продувания хладагента через поры ее смеси или подачи его в полость формы при помощи удаляемых дозаторов.

Запатентован способ литья в песчаную форму с применением вместо вакуума повышенного газового давления на поверхность формы для упрочнения песка формы (рис. 5). Элемент 1 подвешенного конвейера, для скрепления полуформ 2 (например, ВПФ) с транспортной плитой 3 снабжен герметизирующей крышкой 4 с приводом 5. Вместо вакуума, ранее подаваемого в толщу песка, под крышку 4 по трубопроводу подают под давлением газ и создают в толще покрытого пленкой песка такой же перепад давлений ($\sim 0,05$ МПа), что и при вакуумировании, в т. ч., и после заливки при кристаллизации отливки. На время заливки формы расплавом из ковша 6 с заливочной машины 7 (или с крюка крана) форму опять подключают клапанами 8 к вакуумному насосу, установленному на машине 7, и отключают подачу воздуха под давлением. Затем открывают крышку 4, заливают форму, закрывают контрлад формы крышкой и после приложения давления под крышку отключают вакуумирование формы. Используют тот факт, что вакуумируемая форма (ЛГМ, ВПФ) является практически герметичной конструкцией.

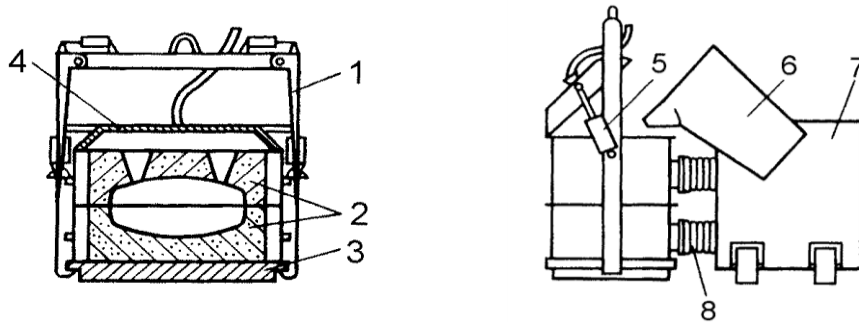


Рис. 5. Схема способа создания повышенного давления на верхний контрлад вакуумируемой формы: 1 – элемент подвешенного контейнера; 2 – полуформы; 3 – транспортная плита; 4 – герметизирующая крышка; 5 – привод; 6 – ковш; 7 – заливочная машина; 8 – клапаны.

И стоит наложить на контрлад верхней опоки металлическую крышку со средствами для поддержания герметичности, как получаем возможность подать в полость формы газ под давлением, близким к $\sim 0,15$ МПа и выше. Такое же газовое давление на металл отливки способствует ускорению кристаллизационных процессов в отливке за счет изостатического воздействия газового давления на стенки отливки, аналогичный способ используют ряд зарубежных заводов при массовом литье алюминиевых деталей для двигателестроения. Также рекомендован вариант применения газа, охлажденного до низкой температуры, для охлаждения песчаной формы и отливки.

Разработаны технологии воздействия на кристаллизацию и охлаждение отливки в песчаной вакуумируемой форме путем дозированной подачи жидкого хладагента переносными устройствами в контактную зону отливки с формой с помощью вакуума формы; способ пропускания через песчаную форму жидкого хладагента в большом количестве с возможностью закалки отливки в песчаной форме как в «песчано-водяной ванне»; а также способ литья корпуса блока цилиндров с регулируемым охлаждением избирательных поверхностей отливки и методом расчета оптимального количества влаги до 8% в песке формы, контактирующем с этими поверхностями отливки (рис. 6).



Рис. 6. Новые технические решения по регулированию охлаждения отливки в форме.

Предложена математическая модель фильтрации хладагентом песчаной литейной формы как капиллярно-пористого материала (КПМ) для охлаждения отливки и проектирования массообменных процессов в капиллярах. Специфика газогидродинамики процессов в литейной форме при ЛГМ обусловлена газовым режимом с подвижным источником газовыделения фазового происхождения; а фильтрации при литье по ледяным моделям, – изменением газопроницаемости по мере фильтрации жидкости при кольматации, схватывании и твердении оболочкового слоя формы в результате физико-химических процессов и химических реакций.

Для выбора способов воздействия на процессы фильтрации КПМ литейной формы и их ускорения использовали фактор интенсивности I (аналогично работам проф. Задорского В. М.). Интенсивностью I технологического процесса, в частности, в пористой среде литейной формы, является отношение целевой количественной характеристики Q - массы жидкости или газа, к основной, геометрической характеристике аппарата, например, к объему пор V литейной формы.

Интенсивность массообмена процесса в капиллярах определяется как $I = Q/V = Mp/V = (\pi r^4 \Delta P \rho) / (8 \eta l_k S m) = (\pi r^4 \Delta P \rho) / (8 \eta l_k S m)$, где $M = (\pi r^4 \Delta P) / (8 \eta l_k)$ - количество жидкости, перенесенной в единицу времени в тонкой цилиндрической трубке по закону Пуазейля, m^3 ; ρ - плотность жидкости, $кг/м^3$; V - объем капилляров, $м^3$; η - вязкость, $Па \cdot с$; r - радиус капилляра, $м$; l_k - длина капилляра, $м$; ΔP - перепад давления, $Па$; S - удельная поверхность пор, $м^2/кг$; m - масса КПМ, $кг$. Анализ этой формулы с точки зрения интенсификации газожидкостных процессов показывает, что на величину I влияют реологические свойства пропитывающих жидкостей и газов (продуктов деструкции литейных моделей); по мере пропитки в общем случае роль вязкого сопротивления возрастает, а также перепад давления ΔP - основной силовой фактор процесса. С целью уменьшения вязкого сопротивления увеличивают температуру КПМ и жидкости при пропитке, а также вводят в такие жидкости компоненты, снижающие вязкость жидкости и улучшающие смачиваемость КПМ, например, ПАВ. Для сквозных капилляров $\Delta P = P_k - \rho g l \sin \alpha$, где, кроме указанных, α - угол наклона капилляра к горизонту; $P_k = 2\sigma \cos \theta / r$ - капиллярное давление, $Па$; σ - поверхностное натяжение, $Н/м$; θ - угол смачивания. Отсюда ясно, что пропитка под действием капиллярных сил возможна при $\theta < 90^\circ$, а предельное расстояние, на которое проникает жидкость, рассчитывается из выражения $l = 2\sigma \cos \theta / \rho g r \sin \alpha$.

Для тупиковых капилляров $e \Delta P$ при пропитке под атмосферным давлением P_a выражается $\Delta P = P_k + P_a - P_a l_k / (l_k - l) - \rho g l$. Если в капиллярах перед пропиткой предварительно понижать давление до P_1 путем вакуумирования, то $\Delta P = P_k + P_a - P_1 l_k / (l_k - l) - \rho g l$. Если в капиллярах давление снижено до P_1 , а жидкость, кроме того, нагнетают при P_2 , то $\Delta P = P_k + P_2 - P_1 l_k / (l_k - l) - \rho g l$. Подставляя значения ΔP для этих вариантов в выражение I с учетом невысокого значения для тупиковых каналов члена $\rho g l$, получим:

1) для тупиковых цилиндрических капилляров при проведении процесса под атмосферным давлением: $I_1 = \pi r^3 \rho [P_k + P_a - P_a l_k / (l_k - l)] / 8 \eta l_k S m$; 2) для предварительного вакуумирования: $I_2 = \pi r^3 \rho [P_k + P_a - P_1 l_k / (l_k - l)] / 8 \eta l_k S m$; 3) при предварительном вакуумировании и избыточном давлении: $I_3 = \pi r^3 \rho [P_k + P_2 - P_1 l_k / (l_k - l)] / 8 \eta l_k S m$.

Фильтрацию песчаной среды формы регулировали путем изменения остаточного давления газовой фазы в капиллярах, создания избыточного давления в жидкости, либо сочетанием обоих приемов при принудительной фильтрации охлаждающей воды либо удалении расплава ледяной модели сквозь песчаную среду формы. Под действием градиента давления формы с остаточным давлением 20...50 кПа вода фильтруется в направлении вакуумпровода формы. С водой часто одновременно по порам устремляется воздух, унося пары воды и высушивая песок. Во влажном песке при вакуумировании влага изменяет коэффициент газопроницаемости K_r , а воздух и пар, находя пути наименьшего сопротивления в песке (с $K_{\text{макс}}$), движутся, распределяя и перемещая влагу практически до полного поглощения воды вакуумпроводом формы и высушивания песка.

Принудительный конвективный теплообмен между отливкой и формой при регулируемом гравитационном течении зерен песка одновременно включает меры по предотвращению пыления песка. Запатентованы процессы регулируемого охлаждения частей отливки и отдельных ее поверхностей (рис. 6) путем частичного удаления верхнего слоя песка формы с использованием вакуумного пневмотранспорта, а также охлаждение отливки в псевдооживленном слое непосредственно в песчаной форме с мерами предотвращения пылеобразования и потерь смеси.

Создана технология управления термо-прочностными свойствами песчаной формы с жидкостекольным связующим с его содержанием до 3 % и частичным замещением добавкой 2 % отходов полистирола в виде 40 %-го раствора в живичном скипидаре в песчаной смеси со свойствами высокой прочности, улучшенной выбиваемости при снижении напряжений в отливке по вине формы. Экспериментальные исследования жидкостекольно-полистирольной формовочной смеси состава: кварцевый песок 95 % (по массе, здесь и далее); жидкое стекло 3 %; полимер полистирол 2 % в виде 40 %-го раствора отходов пенополистирола в живичном скипидаре показали прочность такой смеси на разрыв 0,57-0,60 МПа при температуре сушки 150 °С. Обоснована физикохимия процесса: легкая выбиваемость таких смесей обусловлена термодеструкцией полимера полистирола с 200 °С и разупрочнением смеси при температуре 350 °С. Смесеприготовление жидкостекольно-полистирольных смесей с продувкой CO_2 включает такую очередность ввода компонентов в смеситель: сначала 40 %-й раствор отходов пенополистирола для плакирования поверхности песчинок и только затем - жидкое стекло.

В третьем разделе о проектировании легковесных ячеистых литых металлоконструкций по аналогам из живой и неживой природы и с помощью математического и физического моделирования разработана концепция построения литых конструкций с ячеистой структурой на основе применения процесса ЛГМ. На основе анализа функции литейной модели (при ЛГМ) при воздействии ее с двумя текучими средами - заливаемым металлом, замещающим модель изнутри, и подвижной песчаной средой, обтекающей модель снаружи, - создана концепция проектирования легковесных литых металлоконструкций с ячеистой и сотовой структурой (рис. 7).

Разработаны, включая компьютерное проектирование по методу построения структур материалов, ячеистые конструкции литых ячеистых металлоизделий (рис. 8, 9),

Исследование методов металlosбережения и разработка конструкций легковесных отливок				
Анализ ячеистых ресурсо- эффективных конструкций природы для наследования в металло- изделиях	Создание новых концепций конструирования с учетом высокой текучести формовочной смеси и возможности создания ячеистых конструкций с повторяющимися элементами	Конструирование по аналогам строения кристаллических и аморфных структур (кристалл, аморфное тело, квазикристалл, структура алмаза и углеродных нанотрубок)	Конструирование по аналогии с некоторыми структурами живой природы (филлотаксис в ботанике, дендриты, молекула ДНК)	Конструирование легковесных отливок с использованием теории минимальных поверхностей (структура пены и гироида, метод висячей цепи для оболочковых конструкций)

Рис. 7. Структура исследований и подразделов конструирования легковесных отливок и способов их моделирования.

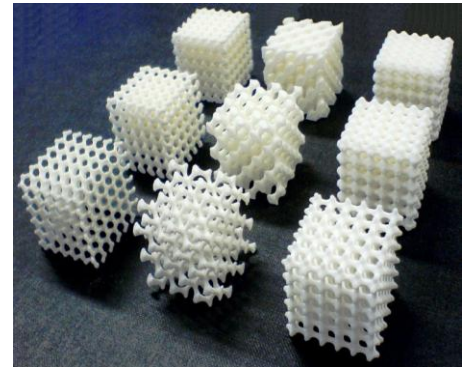
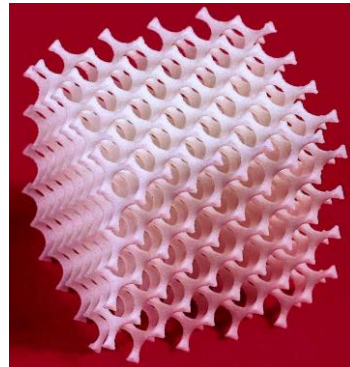
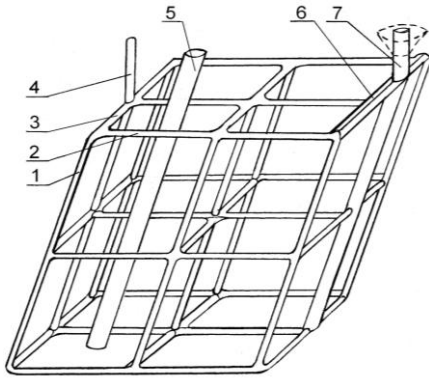


Рис. 8. Модели пространственных решеток для копирования структуры кристаллов: 1, 2 и 3 - перемычки а, в, с (параметры кристаллических решеток Браве); 4 - выпор; 5 - пористый трубопровод; 6 - шлакоуловитель; 7- стояк; и примеры полимерных моделей ячеистых структур.

по аналогам строения кристаллов и аморфных структур неорганических веществ как их представляет современное естествознание, квазикристаллов (на основе мозаики Пенроуза) и углеродных нанотрубок, а также способы изготовления для них газифицируемых моделей. Сотовые модели по аналогии с аморфными структурами предложено проектировать из многогранников (рис. 9 а). В общем случае аморфную структуру моделируют непрерывным рядом, мозаичным узором из чередующихся многогранников, характерных для кристаллических и некристаллических структур, что легло в основу строения разовой модели (рис. 9 б). Рассмотрены 5 типов правильных полиэдров Бернала: тетраэдр, октаэдр, тригональная призма, архимедова антипризма, тетрагональный додекаэдр, а также полиэдры Вороного, три примера которых представлены в верхнем ряду слева на рис. 9 а. По данным кристаллографии такие многогранники заполняют пространство структуры без пропусков.

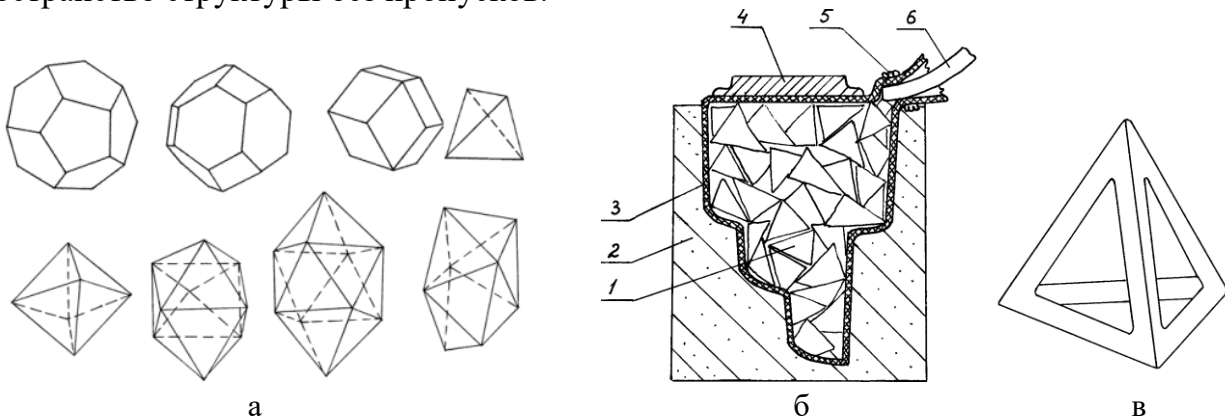


Рис. 9. Элементы модели в виде многогранников (а), объемной модели тетраэдра (в) и схема фасонной модели, аналогичной строению аморфных структур (б): 1 - модель из повторяющихся пенопластовых элементов; 2 - формообразующая емкость; 3 - синтетическая пленка в виде мешка; 4 - груз; 5 - зажим; 6 - патрубок системы вакуумирования.

Запатентованы литые пространственные металлоизделия, созданные по аналогии с некоторыми структурами живой природы как образцам ресурсоэффективных конструкций, отобранных эволюцией (рис. 10). Разработаны конструкции отливок и способ монтажа модельных блоков на многоярусных стояках-коллекторах по принципу ботанического явления филлотаксиса, на основе математических моделей из фрактальной геометрии по аналогии с пространственными древовидными структурами, а также по аналогии со строением структуры ДНК (рис. 7 а). Проектирование легковесных отливок с использованием теории минимальных поверхностей весьма эффективно с точки зрения повышения формозаполняемости и металлосбережения в литейных процессах. Предложен ряд математических концепций проектирования каркасно-ячеистых отливок, оптимально заполняющих пространство в объеме песка литейной формы, с использованием теории минимальных поверхностей (на примере гироида), аналогично строению пены с ячейками в виде пентагональных додекаэдров, как прообразов металлоизделий со сборкой разовых моделей из повторяющихся деталей (рис. 11).



Рис. 10. Критерии оптимизации ячеистых отливок, новые газифицируемые материалы и способы изготовления моделей ячеистых отливок для ЛГМ (14 патентов).

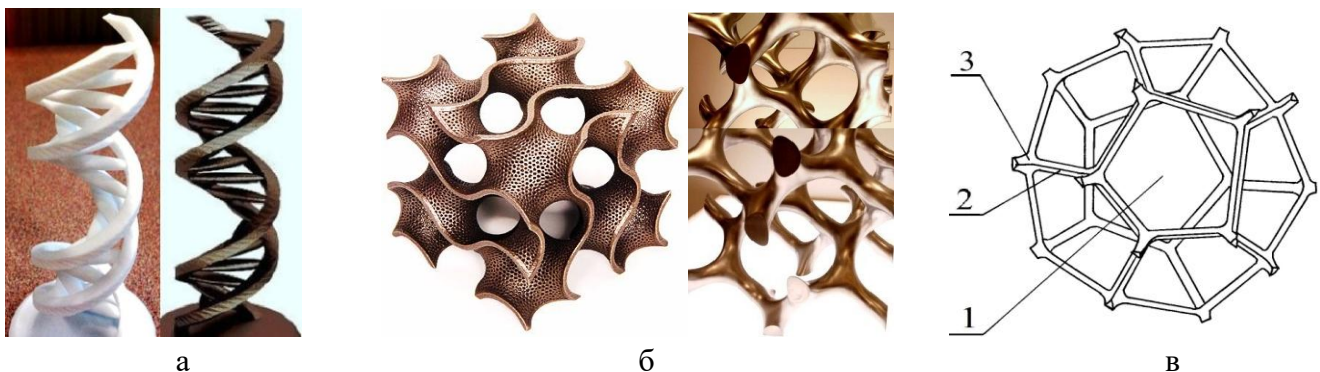


Рис. 11. Примеры пенополистирольной модели и отливки ДНК (а); двух отливок с гироидной структурой (б); модели в виде пентагонального додекаэдра (в): 1 - открытые сквозные полости; 2 - ребро; 3 - точка соединения четырех ребер.

Если на момент патентования ячеистые отливки казались фантастикой, то с развитием 3D-печати металлоизделий и компьютерной оптимизацией в информации все больше появляется изделий с фрактальными элементами, аналогичными в живой и

неживой природе. Предложенные ячеистые конструкции и способы их литья (рис. 10) расширяют возможности литейных процессов.

В четвертом разделе изложены теоретические и технологические основы получения моно-, многослойных и армированных разовых ледяных моделей (ЛМ) и по ним оболочковых песчаных форм как составные процессы разработанной технологии литья по ЛМ. Новизна этой технологии состоит в использовании расплава ЛМ для создания прочности оболочковой формы, отверждаемой в сыпучей виброуплотненной песчаной смеси. А операции и физико-химические процессы состоят в формовке ЛМ в сыпучую песчаную смесь, удаление модели путем плавления и фильтрации ее расплава в стенки песчаной формы с их упрочнением на глубину фильтрации по механизму твердения холодно-твердеющих песчаных смесей. Этапы исследований (рис. 12) включали изготовление моно-, многослойных и армированных разовых ЛМ, нанесения на них



Рис. 12. Структура исследований и технологических разработок по получению ледяной модели из водных композиций (ВК).

противопригарного покрытия и получения оболочковых форм. Описанные методы расчета технологических характеристик формообразования литейных ледяных моделей из водных композиций путем их охлаждения, кристаллообразования, переохлаждения, замораживания в различных средах и в зависимости от геометрической формы моделей, а также аналитические выражения в совокупности составляют обобщенную математическую модель процесса формообразования ЛМ различных геометрических форм, на основе которой разработан технологический процесс производства таких моделей и зиждется методика его контроля.

Продолжительность замораживания τ ЛМ в виде пластины предложено рассчитывать по формуле: $\tau = 0,5q_{\text{л}} \rho h (0,25 h/\lambda + 1/\alpha + \sum \delta_i / \lambda_i) / (t_{\text{кр}} - t_c)$, где $q_{\text{л}}$ – теплота фазового перехода, Дж/кг; ρ – плотность материала модели, кг/м³; h – толщина пластины, м; λ – коэффициент теплопроводности замороженного слоя, Вт/(м · К); α – коэффициент теплоотдачи от поверхности модели к внешней среде в процессе замораживания, Вт/м² · К; $t_{\text{кр}}$ – криоскопическая температура продукта, °С; t_c – температура окружающей среды, °С. Для учета влияния стенок пресс-формы введено значение $\sum \delta_i / \lambda_i$ – сумма термических сопротивлений слоев материала пресс-формы с толщиной δ_i . Для алюминия $\lambda = 209,3$ Вт/(м · К), при толщине алюминиевых стенок до 10...15 мм и $i = 1$ этим значением пренебрегают как сравнительно малым.

Продолжительность процесса замораживания ЛМ в виде цилиндра находится по формуле: $\tau = 0,25q_{\text{л}} \rho D (0,25D/\lambda + 1/\alpha) / (t_{\text{кр}} - t_c)$,

где, кроме ранее указанных, D – наружный диаметр цилиндра, м.

Продолжительность замораживания при получении ЛМ с формой прямоугольного параллелепипеда при отводе тепла через все шесть граней рассчитывается по формуле:

$$\tau = q_{\text{л}} \rho l [R/\lambda + P(1/\alpha)] / (t_{\text{кр}} - t_{\text{с}}),$$

где l – толщина ЛМ, м; R , P – коэффициенты, зависящие от соотношений размеров.

Продолжительность процесса замораживания ЛМ шарообразной формы диаметром D вычисляют по формуле: $\tau = q_{\text{л}} \rho D [0,25D/\lambda + 1/\alpha] / [6(t_{\text{кр}} - t_{\text{с}})]$.

При расчете расхода холода Q (кДж/кг) на замораживание ЛМ учитывали следующие периоды замораживания: охлаждение, кристаллообразование, переохлаждение. Расход холода на охлаждение: $Q_{\text{охл.}} = m C_1 (t_{\text{и}} - t_{\text{кр}})$, где m – масса охлаждаемой модели, кг; C_1 – теплоемкость модели до замораживания, кДж/(кг·К); $t_{\text{и}}$ – температура модели до замораживания; $t_{\text{кр}}$ – температура криоскопическая, °С. Расход холода на льдообразование $Q_{\text{л}} = m w / 100 \omega r$, где m – масса ЛМ, кг; w – содержание воды в модели, %; ω – доля вымерзающей воды; r – теплота льдообразования, равная 335,2 кДж/кг. Расход холода на переохлаждение замерзшей модели: $Q_3 = m C_3 (t_{\text{кр}} - t_{\text{к}})$, где m – масса ЛМ, кг; C_3 – теплоемкость ЛМ, кДж/(кг·К); $t_{\text{к}}$ – температура, до которой заморожена модель; $t_{\text{кр}}$ – температура криоскопическая, °С. Сумма этих расходов составляет энергетические затраты на технологический процесс получения ЛМ. В реальных условиях замораживания компенсируют дополнительные теплопритоки извне через теплоизолирующие ограждения, пребывание людей в охлаждаемых помещениях, тепловое излучение от освещения и другие.

Схема расчета и оптимизации технологических параметров трех стадий охлаждения и замораживания ЛМ на основе ВК показана на рис. 13, буквенные обозначения указаны выше. Совокупность математических выражений составляет математическую модель процесса формообразования ЛМ, на основе которой разработана технология с компьютерным контролем и мониторингом технологического процесса, описанного ниже. Кинетика охлаждения и затвердевания литейных моделей из ВК и влияние температуры среды ВК на темп их замораживания показаны на рис. 14. Способы изготовления ЛМ включают заливку водой пресс-формы и замораживания воды, в ряде случаев с технологическими добавками.

Для ускорения замораживания моделей создан способ получения пористой ЛМ с применением сухого льда как хладагента и порообразователя с расчетом его массы из уравнения теплового баланса.

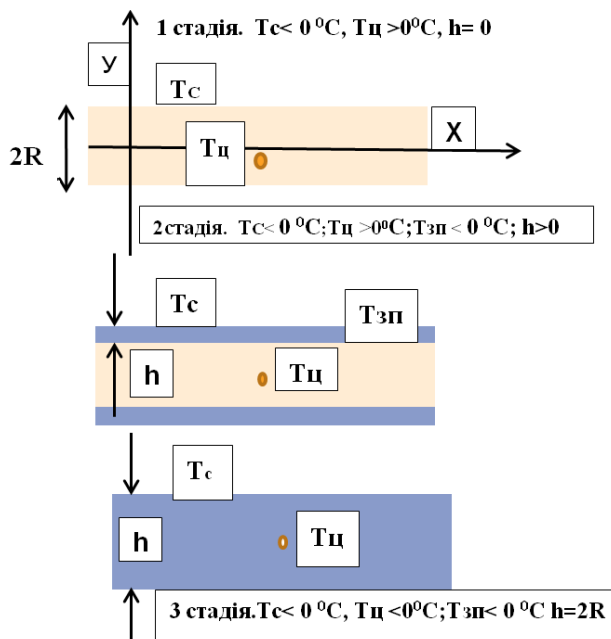


Рис. 13. Стадии определения и оптимизация технологических параметров охлаждения и замораживания моделей на основе водных композиций.

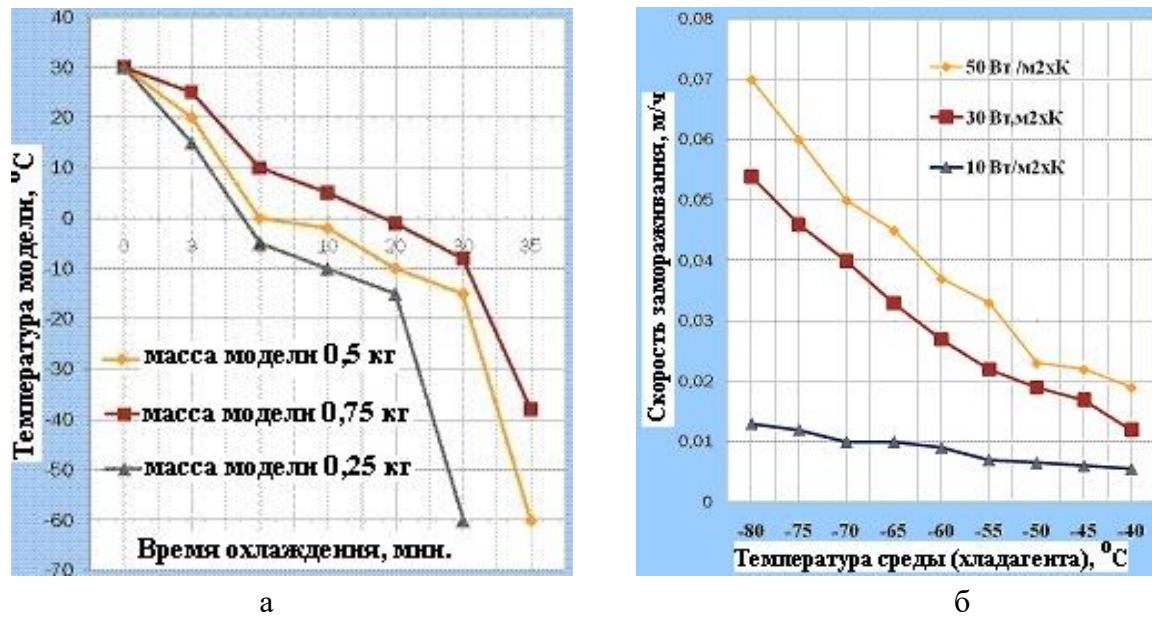


Рис. 14. Кинетика охлаждения и затвердевания литейных моделей из водных композиций (а) и влияние температуры среды водных композиций на темп их замораживания (б).

Предложена технология формообразования ЛМ из жидкотекучих композиций льда, содержащих до 50 % твердой фазы, а также жидкоподвижная композиция из сыпучего льда с 4,5 - 5,5 % жидким водным компонентом и 0,04 - 0,5 % ПАВ, описаны способы смешивания жидкотекучих композиций при раздельном или совместном их приготовлении. Продолжительность приготовления такой композиции из сыпучего льда путем смешивания в мешалке до получения оптимальной жидкотекучести определяется путем мониторинга снижения тока, потребляемого электродвигателем мешалки. В небольших количествах жидкотекучую композицию замешивают в мешалке ПАВ с сыпучим льдом, а жидкий водный компонент в смеси добавляют путем частичного таяния этого льда.

Термический анализ замораживания образцов ВК со связующим в морозильной камере с температурой (-15...-17) $^{\circ}\text{C}$ показал незначительное влияние наличия добавок связующего на скорость замораживания ЛМ. В цилиндрическом сосуде диаметром 100 мм из пластика замораживали три вида образцов массой по 1 кг: из водопроводной воды, а также ВК с связующими компонентами, 25 %-й раствор жидкого натриевого стекла (плотностью 1,08 г/см³) и 25%-й раствор декстрина (плотностью 0,98 г/см³). Температуру определяли в центре образца с начальной температурой +3 $^{\circ}\text{C}$ (рис. 15).

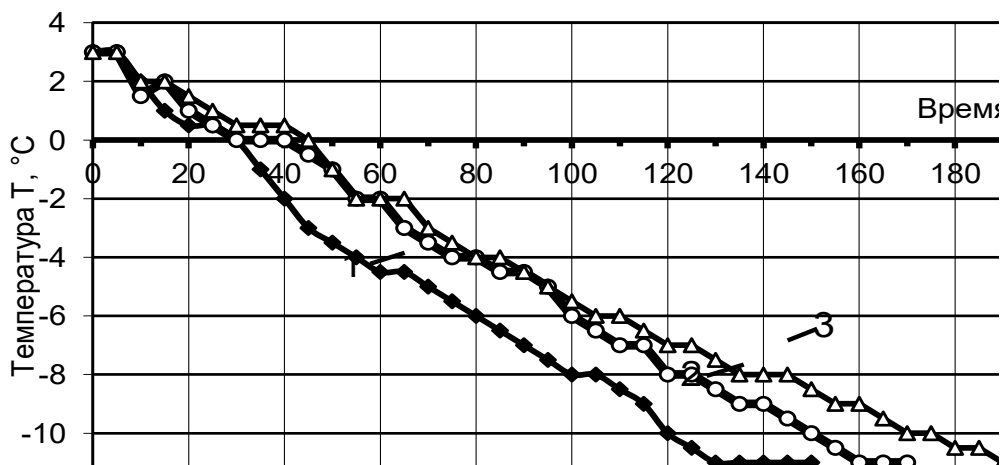


Рис. 15. Графики термического анализа замораживания образцов водных композиций массой 1 кг с различными связующими материалами и плотностью.

Жидкостекольная композиция охлаждается быстрее двух других из-за ее повышенной теплопроводности. Монотонное понижение температуры сменяется горизонтальными участками. Первые «полки» кривых вблизи 0 °С связаны с переходом воды из жидкого состояния в твердое при выделении скрытой теплоты льдообразования. Нарушение плавного снижения связано с периодичностью включения-выключения компрессора камеры и процессами внутри растворов. Композиция с жидким стеклом закристаллизовалась за 30...32 мин., что быстрее двух других, которые затвердели примерно в одно и то же время 40...45 мин. Энергозатраты морозильника Nord-155 объемом 200 л при часовом расходе электроэнергии не более 0,06 кВт·ч и температуре в камере до -18 °С при охлаждении 1 кг льда до измеренной температуры -11...-12 °С за 3 часа не превышали 0,18 кВт·ч, или для литья железоуглеродистых сплавов – 25,7 кВт·ч на 1 т отливок, что сравнимо с данными В. С. Грузмана – 59,5 кВт·ч на 1 т стальных отливок при литье в замороженную форму, охлажденную до -30 °С. Это использовали при расчете производительности морозильных камер для проектирования отделения литья по ЛМ.

Для сравнения на рис. 16 показаны графики нагревания ЛМ на воздухе в помещении цеха, две кривые справа отражают нагревание образцов с покрытием синтетической пленкой. Показано, что ЛМ имеют достаточно длительное «время жизни» для транспортирования и выполнения технологических операций формовки в помещении цеха.

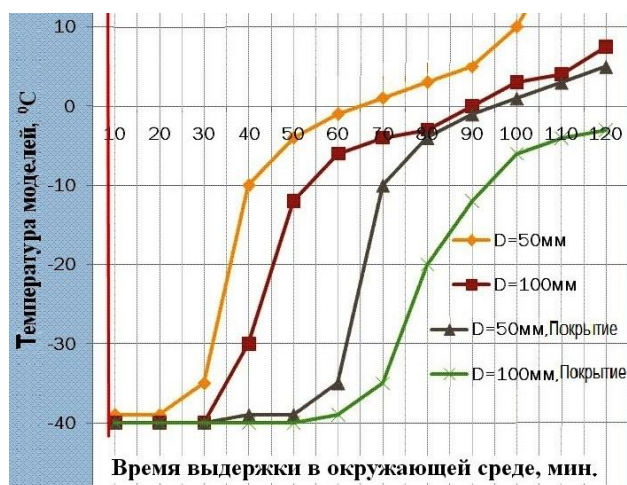


Рис. 16. Кинетика нагрева цилиндрических образцов литейных моделей из ВК на воздухе в помещении цеха.

Повышение скорости охлаждения ведет к увеличению количества кристаллических зародышей в ВК и уменьшению размеров образовавшихся кристаллов. Скорость роста кристаллов V (в г/сек) на образовавшихся центрах кристаллизации описывается уравнением: $V = dx/dt = kS(x - x')$, где dx/dt - количество вещества, закристаллизовавшегося в единицу времени; k - коэффициент, зависящий от диффузии молекул, достигших температуры затвердевания (D), и средней длины диффузионного пути (δ); $k = D/\delta$; S - поверхность выделившейся твердой фазы; x - концентрация переохлажденного раствора; x' - растворимость зародышей кристаллов при данной степени их дисперсности.

Выполнен анализ формирования структуры ЛМ, методы ее моделирования, мониторинга, изучены экспериментальные образцы льда с добавками (рис. 17-19).

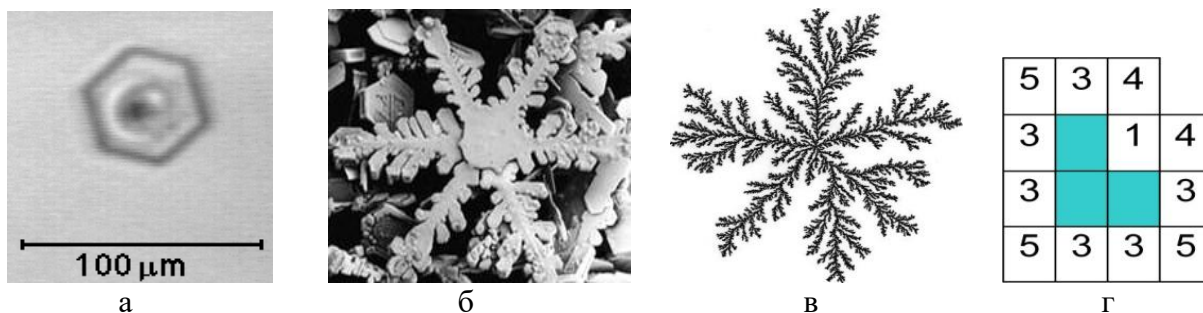


Рис. 17. Кристаллические структуры и описывающие их модели: а - микрофотоснимок гексагонального кристалла льда, выросшего из зародыша; б - снежинка под микроскопом; в - кластер в модели ограниченной диффузией агрегации; г - схема кластера из трех частиц с указанием вероятности прикрепления частиц к кластеру при его росте.

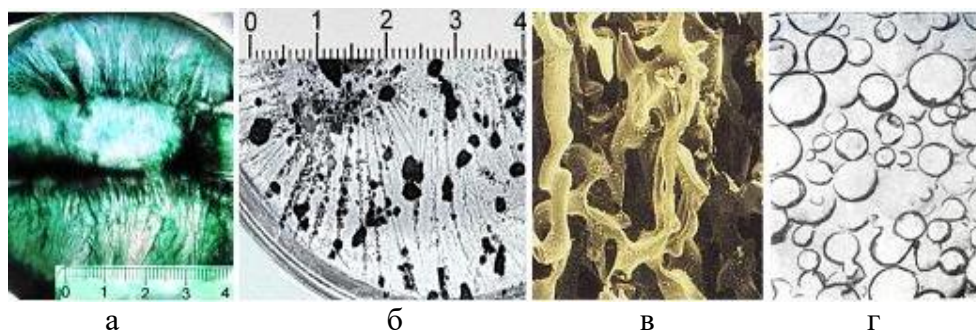


Рис. 18. Образцы различных структур льда с добавками: а, б – пластины толщиной 10 мм; а - с чернилами; б - с углем; в - морской лед; г – снимок на электрон. микроскопе скола замороженной эмульсии.

Теоретическими и технологическими основами производства ЛМ с функциональными примесями служат результаты экспериментальных исследований кинетики затвердевания образцов ЛМ с примесями реагентов, характера распределения примесей в полученных микроструктурах льда. К ним относятся: аналитическое моделирование кристаллизации с учетом теории кластеров, роста и строения поликристаллических и дендритных микроструктур, образцов подкрашенного льда с позиций фрактальной геометрии и термодинамики неравновесных процессов. Это подтвердило концепцию производства ЛМ как носителя геометрической формы металлоотливки, так и одновременно носителя технологических реагентов для упрочнения оболочковой формы, получаемой из сыпучих наполнителей фильтрационной формовкой.



Рис. 19. Модели: полумуфт с пресс-формой, окрашенный лед (а); ЛМ с жидким стеклом и чугунная отливка (б); звездочки конвейера (с лигносульфонатами ЛСТ – темного цвета) с двумя отливками (в).

Измерения предела прочности льда на изгиб как конструкционного материала ЛМ выполнены разработанным экспресс-методом и показали, что такая прочность льда в зависимости от состава ВК достигает 2,5- 5,6 МПа при температуре льда $-20...-15^{\circ}\text{C}$, и выше такой прочности пенополистирола для газифицируемых моделей не менее чем в 2 раза. Способ формообразования ЛМ в контакте с предварительно охлажденной оснасткой по расчету на основе теплового баланса позволил разработать и контролировать

технологии с минимальным субъективным подходом. Например, при получении ЛМ массой 1 кг в виде прямоугольного параллелепипеда для намораживания ледяной корки толщиной 1 мм на поверхности алюминиевой пресс-формы ее следует охладить до температуры ниже $-15,5^{\circ}\text{C}$. Примеры моделей, полученных с предварительным охлаждением пресс-форм (рис. 20, 21).

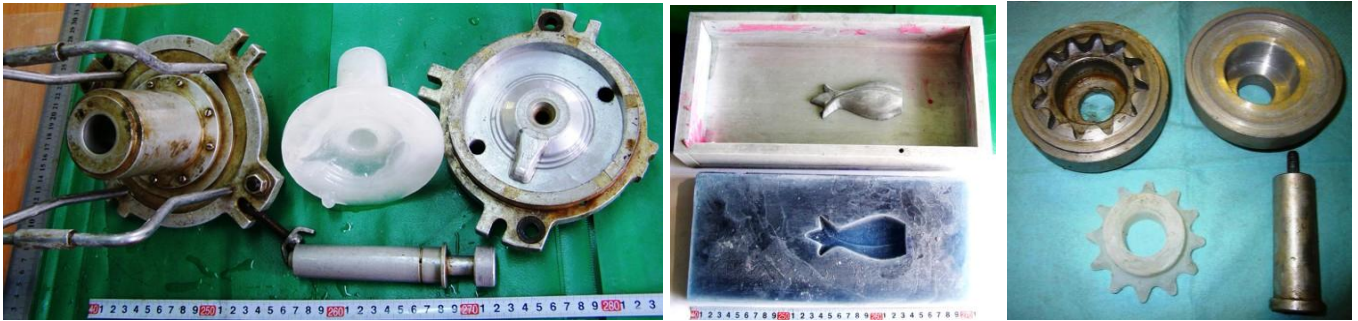


Рис. 20. ЛМ детали автомобиля ГАЗ-24, кокиля, звездочки и пресс-формы для их получения.

Разработаны способы и показаны примеры получения армированных ЛМ, с газонаполненными вставками в моделях и их литниковых системах, а также сборки моделей в блоки из двух и более моделей. На рис. 21 показаны примеры сборки блоков на теплоизолирующей подкладке из пенопласта и «постели» из охлажденного песка для оказания охлаждающего действия на ЛМ, а на рис. 22 – получения ЛМ по неметаллическим формам. Отработана сборка ЛМ в различного вида блоки с моделью литниковой системы (рис. 23).



Рис. 21. Сборка блоков на пенопластовой подкладке и «постели» из охлажденного песка.



Рис. 22. Оснастка из стеклопластика, резины и пенополистирола и ЛМ, полученные по ней.

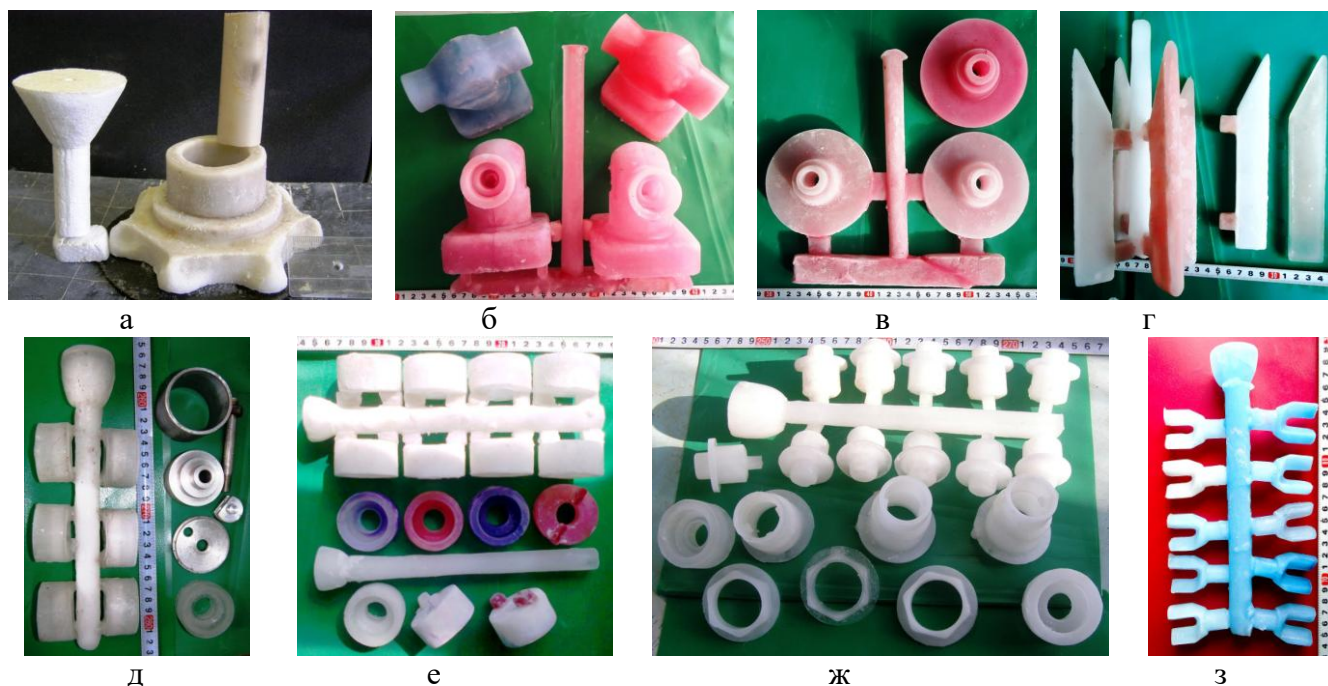


Рис. 23. Блоки ЛМ: а - комплект из одной модели; б, в - блоки из двух моделей; г - из четырех моделей; д - из шести моделей; е - из восьми моделей; ж и з - из десяти моделей (рядом с блоками показаны отдельные модели и линейки для определения габаритных размеров).

Теоретические и технологические основы создания и применения порошковых противопригарно-герметизирующих покрытий (порошковой краски ПК) для ледяных моделей с использованием квазижидкого слоя льда, образуемого в нем при температуре, близкой к плавлению, с наличием электрического заряда на поверхности ЛМ проверены экспериментально, подтверждены примерами и запатентованы для промышленного использования. На рис. 24 а показаны примеры нанесения на ЛМ в виде колпачка такой ПК, которая стабильно удерживается на всех поверхностях, полностью сглаживая уступ на модели, и достигает толщины до 3-4 мм. При двух- или трехслойном нанесении покрытие служит облицовкой. Модель и оболочковая форма отливки «звездочка» показаны на рис. 24 б, в. Отливки полумуфты, полученные по такой технологии, показаны на рис. 24 г.

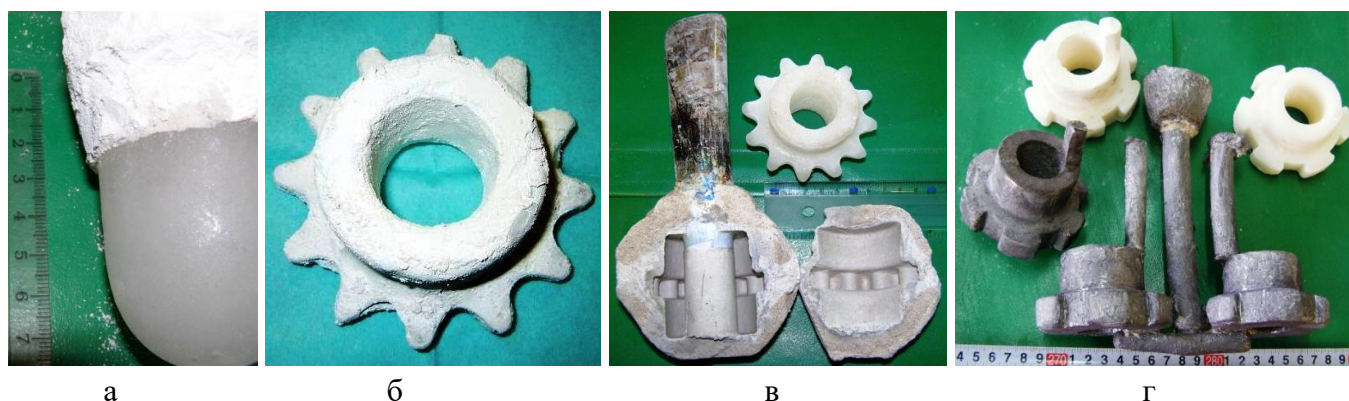


Рис. 24. Нанесение порошковой краски на модель (а, б); ПК перенесена на оболочковую форму (в); блок отливок, изготовленный с применением ПК (г).

Разработанная технология с созданием условий образования электростатического заряда на поверхности модели позволяет получать качественное противопригарное покрытие на модели с невысокими трудозатратами при его приготовлении и нанесении. Разработаны различные ПК для литья различных сплавов на основе недорогих огнеупорных порошков,

а также быстротвердеющих связующих, либо смеси порошков со связующим и ускорителем его твердения (отвердителем), вступающих в реакцию при смачивании водой. На образование оболочковых форм идет только пропитанный слой ПК вместе с контактирующим песком, остальная часть формы служит сыпучим наполнителем и используется повторно в цикле оборота песчаной смеси в литейном цехе.

Криотехнология производства разовых моделей отвечает экологическим аспектам минимизации или исключения из процесса органических связующих и растворителей (рис. 25). Она реализует научные знания о квазижидкой структуре льда и электрическом заряде на его поверхности, которые служат основой технологии нанесения ПК, как один из первых примеров применения такого вида красок в литейном цехе. Разработка ПК позволила впервые применить следующие процессы в литейном производстве: 1) нанесение противопригарного покрытия на модель практически без использования жидкости; 2) нанесение несколько слоев ПК как основы для создания из них твердеющей оболочковой формы для мелких отливок; 3) изменение последовательности нанесения материалов в жидкой (Ж) и твердой (Т) фазах при создании оболочковой формы на разовой модели (схему Ж-Т-Ж... заменили на Т-Ж-Т...) со значительным сокращением продолжительности формовки за одну операцию; 4) создание полутвердого или холодно-твердеющего герметизирующего покрытия (удерживающего стенку формы) при вакуумировании формы из сыпучей песчаной смеси или при самопроизвольном плавлении модели, включая возможность пропитки слоя песчаной смеси формы расплавом ЛМ.



Рис. 25. Конструкции ледяных моделей и структура исследований и разработок в области формовки по этим моделям.



В процессах песчаной формовки с фильтрацией расплава ЛМ в окружающую песчаную смесь качество литейной формы обеспечивается соблюдением расчетных

значений: -1) продолжительности нагрева поверхности ЛМ воздухом цеха до температуры плавления льда («время жизни»); -2) прочности ледяной оболочки полый модели с определением минимально допустимой ее толщины; -3) условием поддержания песка стенки формы без осыпания при таянии модели. Технология формовки по ЛМ основана на применении легкоуплотняемых (вибрацией) сухих сыпучих смесей для оболочковых форм при наличии ряда аналогичных операций из известных формовочных процессов с учетом их ресурсоэффективности (табл. 1).

Таблица 1

Операции при формовке по ледяным моделям и их аналоги в известных видах формовки

Операции при формовке по ледяным моделям	Аналоги в известных видах формовки
Засыпка сухой песчаной смесью разовой модели в контейнере и виброуплотнение смеси	То же при литье по газифицируемым моделям (ЛГМ)
Герметизация поверхности формы синтетической пленкой с выводом каналов стояка и выпора к поверхности контрлада	Герметизация поверхности формы при вакуумно-пленочной формовке ВПФ или ЛГМ
Расплавление модели теплоносителем и впитывание ее продуктов в песок формы	Подобно ЛГМ, когда металл служит теплоносителем
Создание градиента давления жидкости в рабочей полости формы с герметизацией полости формы противопригарным покрытием пониженной проницаемости	Создание градиента давления воздуха при герметизации песка синтетической пленкой при ВПФ или моделью при ЛГМ
Увлажнение песчаной смеси путем фильтрации сквозь нее расплава ледяной модели	Приготовление влажной (5-7 %) смеси для сырой песчано-глинистой формы
Упрочнение (твердение) контактного с моделью слоя – оболочки песчаной смеси после увлажнения	То же при литье по выплавляемым моделям или в оболочковые формы

На основе исследования газодинамических явлений разработаны новые способы уплотнения песчаных смесей вокруг разовых моделей при формовке в контейнерных опоках, включая «щадящие» модель условия засыпки такой смесью, заполнение разнообразных каналов модели (рис. 26), а также автоматическое отключение вибрации с момента достижения максимальной степени уплотнения смеси. Разработаны сухие сыпучие формовочные смеси с оптимизацией по зерновому составу, исходя из уравнения Фуллера; созданный оперативной метод гранулометрической оптимизации рекомендовано ввести в компьютерные программы для расчета составов смесей и мониторинга процесса формообразования.

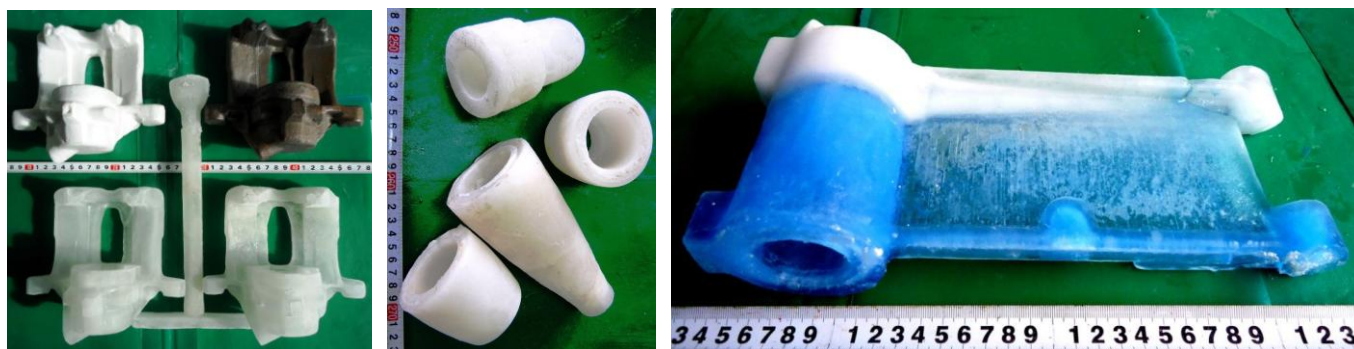


Рис. 26. Примеры ЛМ с каналами сложной формы.

Для фильтрации расплава ЛМ сквозь поры песчаной смеси применяли вакуумирование формы и воздействие жидкого или газообразного теплоносителя.

Экспериментальные исследования влияния остаточного давления при вакуумировании формы на проницаемость газа и воды сквозь пористую среду песка формы при впитывании расплава ЛМ показали необходимость применения минимального перепада газового давления или герметизации контактом с жидкостью во избежание эрозии песчаной поверхности. В результате исследования массопереноса при фильтрации расплава модели при образовании литейной оболочки предложена математическая модель интенсивности массообмена этого процесса, а также математическая модель фильтрации песчаного слоя связующим при получении оболочковых форм по ЛМ. Эксперименты гравиметрии (рис. 27) при фильтрационной формовке - пропитке наполнителя формы массой $3 \pm 0,1$ кг с песком 2К02А расплавом ЛМ массой 100 ± 2 г (исходной температурой -15 °С) показали потери массы вакуумируемой песчаной формы при плавлении и фильтрации в песок расплава ЛМ, включая подсушку формы, за счет уменьшения массы продуктов модели в форме на ~ 45 %, а получение оболочковой формы занимало ~ 20 мин.

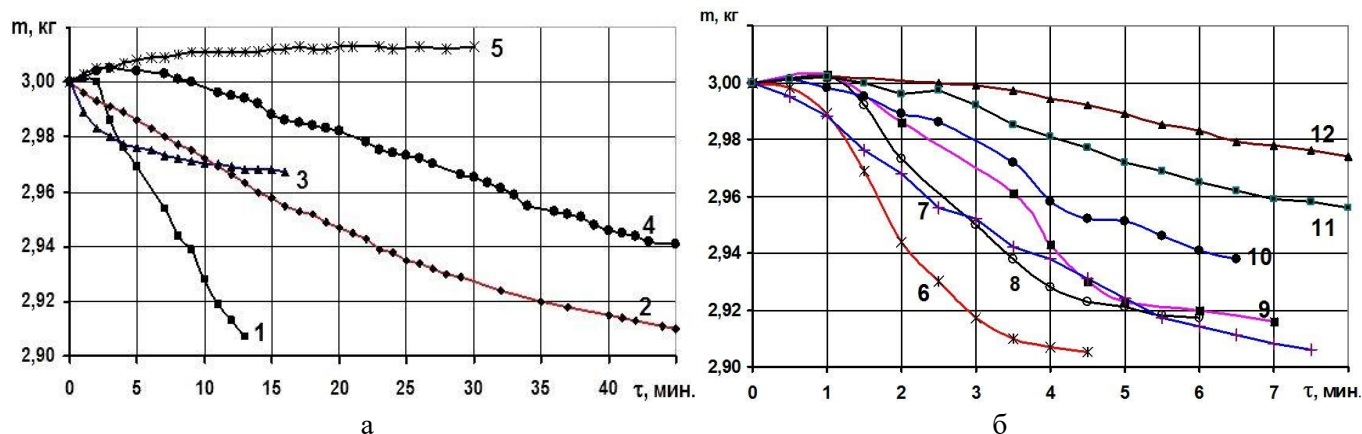


Рис. 27. Изменение массы m формы во времени τ при температуре воздуха $t = 20 \dots 60$ °С (а) и при $t = 140 \dots 200$ °С (б): 1 – таяние ЛМ при 60 °С; 2 и 4 – таяние при $t = 20$ °С и при виброуплотнении песка формы в течение 30 с и 60 с; 3 – форма без ЛМ; 5 – m без образца ЛМ при наличии х/б чехла на вакуум-фильтре; 6 – 200 °С; 7-10 – 140 ± 5 °С, в т.ч. 7 – модель с 10 % ЭКР (крахмалореагент) и облицовкой; 8 – ЛМ из чистой воды; 9 – модель из льда с 10 % ЭКР; 10 – модель из воды с облицовкой; 11 – впитывание ЛМ из воды в песке после продувки до стабильной массы по кривой 5 в форме с фильтром, покрытым чехлом, t воздуха 140 °С; 12 – продувка формы при вакуумировании без модели с подогревом воздуха до 140 °С.

Эксперименты по фильтрации расплава ЛМ при пропитке песка формы показали возможность регулирования ее глубины и скорости при изменении температуры. Методом осаждения (кольматации, аналогично технологии бурения скважин) примесей (связующего или отвердителя) в близком к ЛМ слое песчаной смеси, отработали процесс получения оболочковых форм с минимальным введением таких примесей в ВК модели. В опытно-промышленных условиях отработан процесс получения по ЛМ оболочковых форм с кристаллогидратами твердением их путем гидратации расплавом моделей, определены скорости твердения оболочек (рис. 28). Примеры получения оболочковых форм показали, что добавление в песчаную смесь 15-20 % быстротвердеющего цемента Аквафикс позволило в течение 5-8 мин. образовать твердую оболочку вокруг моделей в контейнерной форме из сухой песчаной смеси (рис. 29). Твердение строительного гипса или цемента рядовых марок с таким же содержанием составляло 20-32 мин.

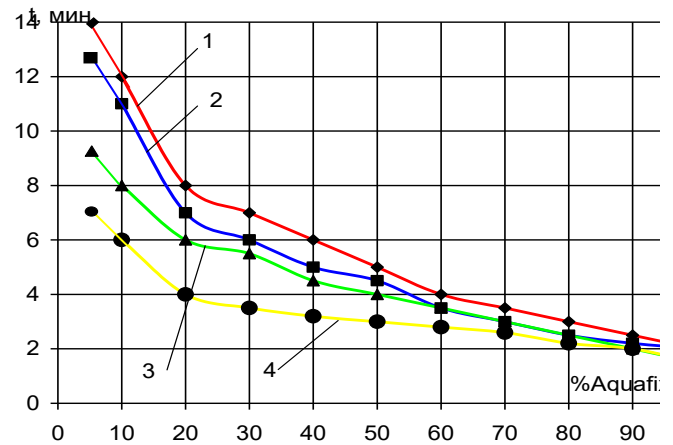
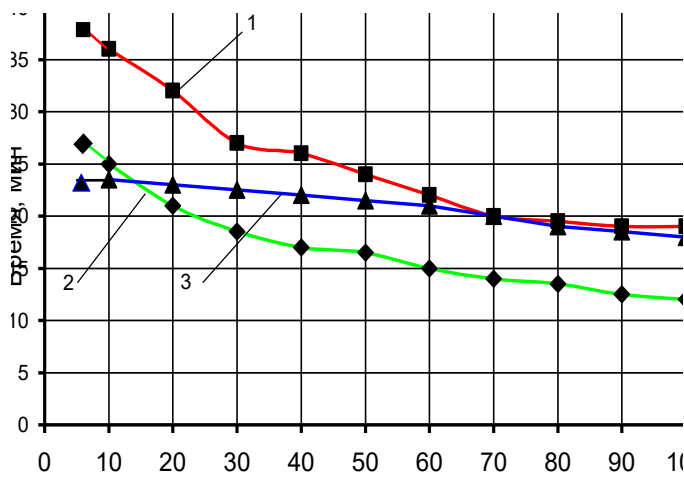


Рис. 28. Зависимость времени t твердения песчаной смеси от количества в ней связующего при составах смесей: 1 – КДСП (дистен-силлиманит) + цемент, смачивание раствором жидкого стекла; 2 – КДСП+гипс, смачивание раствором жидк. стекла; 3 – (ЛСТ+ CrO_3) + кварц. песок, смачивание водой.

Рис. 29. Зависимость времени t твердения песчаной смеси от количества (в %) в ней связующего – цемента Аквафикс: 1, 3 – фильтрация водой цемента с кварцевым песком (1), с КДСП (3); 2, 4 – фильтрация 25%-ным раствором жидкого стекла цемента с кварцевым песком (2), с КДСП (4).

В технологии фильтрационной формовки по ЛМ для оболочковых форм с такими кристаллогидратами, как гипс и цемент, в песчаной смеси их применяли совместно, варьируя с учетом того, что гипс ускоряет твердение цемента, а цемент повышает водостойкость и термостойкость оболочки применительно к различным сплавам и массе отливки. На рис. 30 показаны фрагменты отработки процесса формовки с использованием этих смесей на примере получения отливки «звездочка конвейера» в оболочковых формах разной толщины. На рис. 30 а, б показаны внешний вид и распиленные половинки оболочковых форм толщиной 6-8 мм рядом с блоками ЛМ; на рис. 30 в – примеры отливок и ЛМ; 30 г – залитая металлом форма; на рис. 30 д – ж – распиленные оболочки толщиной 20...25 мм и отливка блока из двух звездочек.

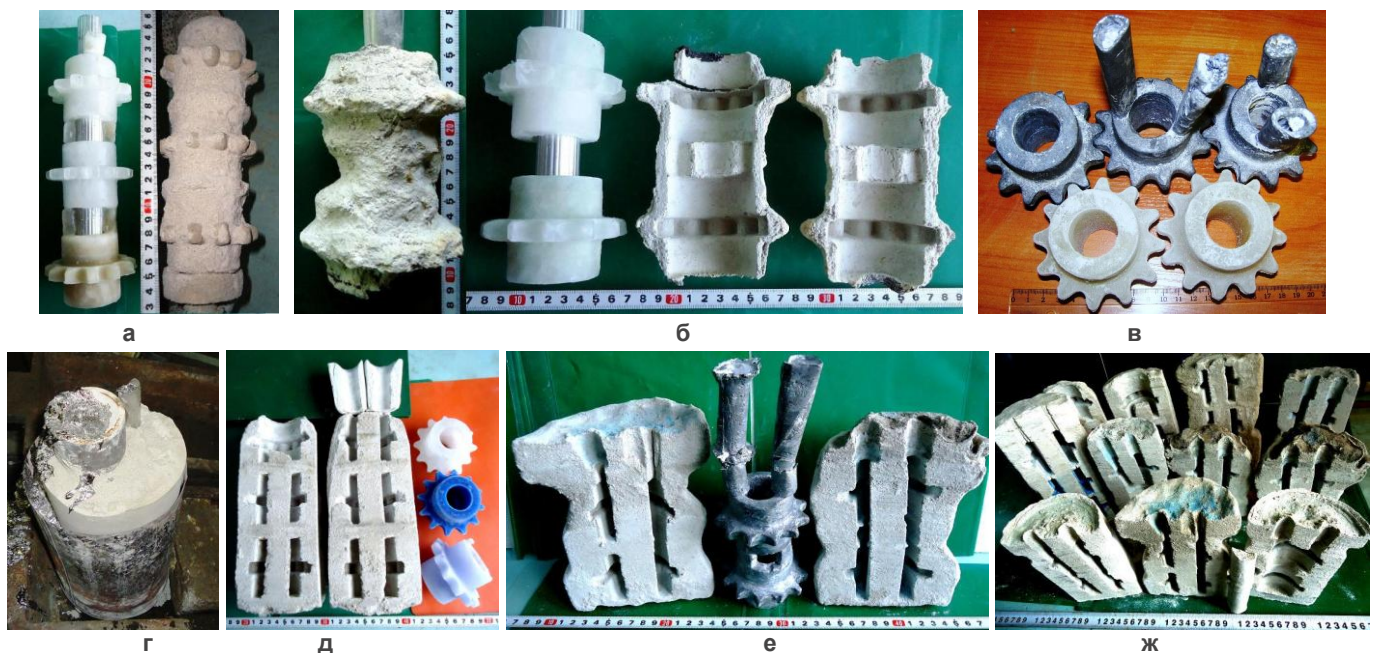


Рис. 30. Примеры ЛМ, оболочковых форм и отливок: а - блок из трех моделей и 3-местная форма; б - блок из двух моделей и распиленная 2-местная форма; в - примеры отливок и ЛМ; г - залитая форма; д - распиленная 3-местная форма и отдельные модели разной окраски; е - распиленная 2-местная форма и отливка по такой форме; ж - распиленные 2- и 3-местные формы.

В ряде способов литья по ЛМ крио-процессы сочетаются с последними достижениями физикохимии формообразования в области холодно-твердеющих смесей, включая оригинальные операции образования связующих композиций и инициирования в них реакции отверждения посредством фильтрации сухой уплотненной формы, а также упрочнения песка без связующего с помощью градиента газового давления. В процессе разработки дистанционного компьютерного мониторинга литейных процессов составлена пооперационная схема (рис. 31) для проектирования трех вариантов литья по ЛМ, установлены контролируемые характеристики процесса литья и их пределы.



Рис. 31. Схема процесса литья по ледяным моделям.

На опытно-промышленном уровне выполнено внедрение в производство литейного процесса с возможностью выбора трех вариантов удаления ледяной модели (с вакуумированием, с использованием теплоносителя, с выстаиванием формы) (рис. 32) и подготовки формы к заливке металлом в опорном наполнителе, с прокалкой или вакуумированием песчаной формы. Разработан проект опытно-промышленного участка литья по ледяным моделям площадью 110 м².

Основные показатели технологической новизны литья по ледяным моделям - ЛЛМ				
Предел прочности на изгиб льда ЛМ 2,5-5,6 МПа при T= -20...-15 °C, и выше прочности пенополистирола для ЛГМ не менее чем в 2 раза. Определение экспресс методом	Способы армирования ЛМ, применения газонаполненных и пустотелых моделей, вставок в них и их литниковые системы, модели с направленной пористостью	Модель удаляют фильтрацией в поры литейной формы, расплав ЛМ – реагент, отверждающий оболочку формы. Изготовление ХТС с органическими и неорганическими материалами	Порошковые противопопригарно-герметизирующие покрытия для ЛМ. Послойным нанесением без промежуточной сушки получают оболочковые формы	Самопроизвольные процессы: схватывания порошковой краски, плавления ЛМ, фильтрации в песок формы, твердения формы и регенерации смеси теплом отливки

Рис. 32. Новые технические решения при ЛЛМ, а также способы формовки и литья по легкоплавким моделям.

Способы формовки и литья по ледяным моделям (ЛМ) и легкоплавким моделям с указанием №№ патентов Украины, в которых описаны такие решения										
Расчет времени «жизни» ЛМ на воздухе 80372	Расплавление ЛМ участвует в создании оболочки формы 83891	Засыпая песком ЛМ в контейнере, укрывают ее экраном 81726	ЛМ плавят нагретым расплавом материала модели 89664	Плавнение ЛМ пропусканием через нее электротока 76132	Плавят модель порцией расплава металла 91282	Упрочнение смеси через венты в модели 81013	Плавнение ЛМ и впитывание в песок под давлением 80381	Герметизация формы материалом из расплава ЛМ 80235	Форму упрочняют гидростатическим давлением со стороны ЛМ 74539	Удаление трубок выпоров после плавления ЛМ 85515
Расплавление ЛМ создает реакции для твердения формы 85830	Уплотнение песка циклическим изменением давления газа порами песка 82024	Оптимальное уплотнение песка с контролем его уровня 81014	Формовка с контролем образца формы 79719	Контроль полости формы по ЛМ перед заливкой 74280	Формовка с уплотнением песка с двух контрдавлений формы 82837	Создание направленной пористости ЛМ в песчаной форме 91224	Твердение оболочковой формы по ЛМ при выстаивании 91197	Оптимизация зернового состава смеси по расчету 83018	ЛМ и форма включают реагенты для твердения оболочки 80509	

В пятом разделе описаны новые процессы песчаной формовки, созданные на основе результатов исследований и литейных процессов, описанных в предыдущих разделах (рис 33).



Рис. 33.
Новые процессы формовки из сыпучих смесей и патенты по этой теме.

Они включают 3D-деформирование сыпучих смесей при изготовлении литейных моделей и песчаных изделий, формовку из сыпучих наполнителей на основе взаимодействий различных дисперсных фаз с агрегатными переходами, создание трехфазной дисперсной системы струйным смешиванием в процессах песчаной формовки. Описаны процессы получения песчаных форм с термической обработкой пенополистирола, литье металла под регулируемым давлением в песчаные формы по испаряемым моделям, конвейерный процесс непрерывного действия для литья по разовым моделям в песчаных вакуумируемых формах.

В процессе получения песчаных изделий 3D-деформированием варианты формовки сочетаются с компьютерным управлением, криотехнологией, виброуплотнением песчаной смеси с неорганическими связующими и использованием ее возврата до 90 %, что расширяет потенциал процессов формовки, экономит затраты и способствует экологической безопасности литья. При этом используется вакуумирование сыпучей песчаной смеси с приданием ей регулируемой прочности и пластичности, приемлемых для деформирования, после чего производится твердение отформованного изделия.

Способ смешения сыпучих дисперсных систем с взаимодействием дисперсных фаз с агрегатными переходами позволяет формировать сыпучую смесь, а после плавления зернистого льда в составе смеси вода отверждает кристаллогидраты, также добавленные в состав смеси, что делает ее холодно-твердеющей. Сыпучесть сухой смеси снижает затраты на ее уплотнение без капиталоемких формовочных машин, что повышает ресурсоэффективность песчаной формовки. При реализации способа предварительно смешивали известными способами сухую минеральную основу смеси из песка, гипса и (или) цемента. Затем засыпание формовочной смеси на модель или в рабочую полость стержневого ящика совмещали с введением в эту смесь сыпучего зернистого льда, смешивали путем ссыпания струи зерен льда со струей зерен минеральной основы в один поток с одновременной вибрацией формовочно-модельной или стержневой оснастки. Такой способ струйного смешивания ссыпанием двух зернистых материалов на движущиеся от вибрации поверхности формообразующей оснастки позволяет быстро смешивать и уплотнять зерна в сыпучем виде без или с минимальным таянием льда и с низкими затратами на уплотнение смеси. Взаимодействие различных дисперсных фаз с агрегатными переходами позволяет перевести сыпучую смесь в увлажненное, а затем в связанное состояние в виде литейной формы.

Путем реализации свойств текучести сыпучих песчаных смесей предложен способ получения песчаной формы с дифференциальной прочностью методом струйного смешивания при совмещения двух двухфазных дисперсных систем в одну трехфазную в виде холодно-твердеющей формовочной смеси с последующим нанесением ее на модельную оснастку, включая возможности его автоматизации с помощью 3D-технологий и сочетания с криотехнологиями. Разработан способ литья по термокомпактируемым пенополистирольным (ППС) моделям, удаляемым из песчаной формы после усадки в результате нагревания. Определены характеристики нагревания образцов ППС для удаления моделей и компактирования отходов ППС, описаны примеры и преимущества способа, как методов удаления разовых моделей из формы и утилизации полимерных отходов.

Разработан способ литья по газифицируемым моделям под регулируемым давлением воздуха на металл с обратной связью для оптимизации режима газового давления-разрежения в песчаной форме с управлением процесса газифицирования моделей программируемым устройством, приведены схема установки и расчет характеристик регулирования силового взаимодействия металла с песчаной формой.

Разработан ряд литейных способов, расширяющих технологические возможности вакуумной формовки для получения крупных фасонных отливок и непрерывного литья преимущественно легковесных конструкций, включая литье в непрерывно изготавливаемую песчаную форму по разовым моделям, в том числе составляемым из частей и наращиваемым в процессе движения конвейера. Описана возможность конвейерной формовки по ледяным моделям с ускоренным способом их плавления и впитывания расплава модели в песчаный наполнитель вакуумным всасыванием перед заливкой металла в форму.

В шестом разделе выполнено экономическое обоснование совершенствования литья по разовым моделям путем сравнения технологических процессов по стоимости получения отливок из различных сплавов. В результате проведенных работ по теме III-34-08.570 (гос. регистр. №0212U005039) отработаны процессы изготовления ледяных моделей, формовки и заливки формы, что составляет полный цикл производства отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов по разовым моделям. Выполнено внедрение в производство технологии литья по ЛМ при получении отливок из серого чугуна марок

СЧ20-СЧ25 (ГОСТ 1412-85) звездочек конвейера и полумуфт в объеме 10 тонн в год. Экономический эффект от внедрения состоял в экономии затрат на материалы и энергию при изготовлении моделей и песчаных форм в процессе перехода с технологии ЛГМ на ЛЛМ. Ввиду сравнимого выхода годного в рассмотренных литейных процессах при проведении расчетов затраты, связанные с получением металла, очисткой отливок и другие расходы, не относящиеся к модельно-формовочному производству, считали одинаковыми для этих двух процессов. Экономический эффект при внедрении в 2011 году составил 1248 грн. на 1 тонну литья или в целом на годовую программу в 10 тонн - 12480 грн. Сравнительный экономический анализ затрат на материалы и электроэнергию при изготовлении песчаных форм на 1 тонну литья по газифицируемым и ледяным моделям показал снижение в 4,9 раза таких затрат во втором способе литья благодаря невысокой стоимости льда в модельных материалах, состоящих из воды более чем на 90 %, однако криотехнология дает повышение на 83 % (на 40,4 кВт.ч) затрат на энергию, из которых 24,1 кВт.ч расходуется на обеспечение фазового перехода «вода-лед-вода» при замерзании и плавлении модельной композиции.

Также опытно-промышленные работы по изготовлению отливок из железоуглеродистых и цветных сплавов в песчаных формах с дифференцированными теплофизическими характеристиками позволили сократить время охлаждения отливок, способствуя повышению производительности литейных участков, и по актам опытно-промышленных проверок даст экономический эффект от внедрения этой технологии в сумме 432 120 грн., а разработанные способы опустошения форм от формовочной смеси без пылеобразования улучшат условий труда на производстве.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Впервые экспериментально показано, что формы с дисперсным наполнителем без связующего позволяют увеличить скорость охлаждения отливки в 1,2–2,0 раза (0,068 - 0,138 °C/c) путем изменения теплопроводности, пористости наполнителя и конвективной составляющей теплопереноса при фильтрации газообразного или жидкого хладагента сквозь песчаную среду формы, в отличие от охлаждения отливки в традиционной песчаной форме, которое определяется теплопроводностью песка со связующим в виде монолитной конструкции.

2. Впервые показано, что в производственных условиях эффективными способами повышения теплоотвода в кварцевом песке, традиционно применяемом в процессах ЛГМ и ВПФ, является дозированное увлажнение песка в поле пониженного газового давления вакуумируемой формы, а также конвективные процессы перемещения песка в опоке при охлаждении отливок с определенным экспериментально изменением скорости охлаждения в 1,2–2,0 раза (0,068 - 0,138 °C/c) по сравнению со способами формовки без такого охлаждения, для чего созданы способы снижения температуры песчаной формы в целом и отдельных ее частей путем дифференцированного их охлаждения, поддержания низкой температуры замороженной формы путем пропускания хладагента через поровое пространство формы, а также подачи его в полость формы при помощи удаляемых дозаторов или переносными дозаторами в контактную зону с отливкой при расчете оптимального количества влаги и регулируемого охлаждения избирательных поверхностей отливки.

3. Путем математического моделирования тепловых процессов получено выражение для коэффициента теплоотдачи α , которое позволило по данным впервые проведенных экспериментов калориметрии определить ряд численных его значений для расчета различных способов принудительной конвекции при целенаправленном изменении ее вида и интенсивности в литейной форме из сухого песка при регулировании скорости

охлаждения отливки, а также впервые выполнены сравнительный анализ характеристик форм, упрочняемых с использованием физических явлений, предложено совместное применение вакуумируемой формы и низкотемпературного стержня, показаны преимущества создания общего оборота смеси для форм и стержней указанных видов, а также разработан способ литья в вакуумируемую песчаную форму с применением повышенного газового давления на полость формы и металл отливки для ускорения кристаллизационных процессов в отливке за счет снижения зазора между отливкой и формой.

4. Выполнен анализ интенсификации явлений проницаемости при фильтрации хладагентом или расплавом разовой модели песчаной литейной формы как капиллярно-пористого материала, а также предложена математическая модель интенсивности пропитки хладагентом для проектирования массообменных процессов в капиллярах формы и предложены меры по созданию направленного газового режима литейной формы с ростом градиента газопроницаемости формовочной смеси по мере удаления от границы контакта отливки с формой, а также направленного затвердевания отливки при следующей зависимости коэффициентов теплоаккумулирующей способности вакуумируемых, песчано-глинистых, замороженных форм и форм с чугунным холодильником $b_{ВФ} < b_{ПФ} < b_{ЗФ} < b_{ЧХ}$.

5. Впервые предложены способы создания принудительного конвективного теплообмена между отливкой и формой путем регулируемого гравитационного течения зерен песка для охлаждения отливки в песчаной среде с предотвращением пыления песка, а также регулируемого охлаждения частей отливки и отдельных ее поверхностей путем частичного удаления верхнего слоя песка формы с использованием вакуумного пневмотранспорта.

7. Впервые разработан способ изготовления двухслойных отливок типа валков по газифицируемым моделям с регулируемым охлаждением отдельных частей отливки металлическим холодильником и применением пористой огнеупорной прослойки между слоями отливки для релаксации термо-усадочных напряжений, возникающих между слоями, а также впервые создана технология управления термо-прочностными свойствами песчаной формы с жидкостекольным связующим путем снижения его содержания до 3 % в смеси и добавкой 2 % отходов полистирола в виде 40 %-го раствора в живичном скипидаре в предложенной песчаной смеси, обладающей высокой прочностью и улучшенной выбиваемостью.

8. На основе предложенной концепции о воздействии модели с такими двумя текучими средами, как заливаемый металл, замещающий газифицируемую модель или заполняющий литейную полость, и подвижная песчаная среда, обтекающая модель снаружи в литейной форме, а также возможностей математического и компьютерного моделирования, включая наследование структур природы, как их представляет современное естествознание, впервые разработан ряд легковесных ресурсосберегающих конструкций литых металлоизделий по аналогам строения твердого вещества, отдельных биологических структур и наноматериалов с моделированием их из повторяемых деталей, выполненных преимущественно из газонаполненных полимеров.

9. Впервые предложены методы расчета технологических характеристик формообразования ледяных моделей из водных композиций путем их охлаждения, кристаллизации, переохлаждения, замораживания в различных средах, а также в зависимости от геометрической формы моделей; аналитические выражения в совокупности составляют математическую модель формообразования ледяных моделей; метод расчет тепломассообмена для процесса получения пористой ледяной модели с

использованием сухого льда, а также технология производства моделей из жидкотекучих композиций льда, в контакте с охлажденной оснасткой; отработаны способы получения армированных ледяных моделей, применения газонаполненных вставок для моделей и их литниковых систем, а также сборки моделей в блоки из 2-10 единиц.

10. Впервые разработаны теоретические и технологические основы производства ледяных моделей из водных композиций с технологическими реагентами, экспериментально исследованы кинетика затвердевания льда с примесями связующих материалов в составе модели, характер распределения примесей в микроструктурах льда; аналитическое моделирование кристаллизации с учетом теории кластеров, роста и строения поликристаллических и дендритных микроструктур при исследовании образцов подкрашенного льда с позиций фрактальной геометрии и термодинамики неравновесных процессов показало широкие возможности промышленного производства ледяных моделей.

11. Впервые разработан экспресс-метод измерения предела прочности на изгиб образцов ледяных моделей как конструкционного материала, эта прочность при температуре $-20...-15$ °С достигает 2,5-5,6 МПа и выше такой прочности пенополистирольных моделей не менее чем в 2 раза, показана зависимость такой прочности от температуры модели.

12. Впервые разработаны для промышленного использования и подтверждены экспериментально теоретические и технологические основы создания и применения порошковых противопожарных и герметизирующих покрытий для ледяных моделей с использованием электрического заряда квазжидкого слоя на поверхности льда.

13. Впервые разработан ряд процессов песчаной формовки с удалением из формы ледяной модели путем плавления и фильтрации ее расплава в песчаную среду формы, при которых качество литейной формы обеспечивается соблюдением расчетных значений: продолжительности нагрева поверхности ЛМ воздухом цеха до температуры плавления льда («время жизни») и прочности стенки полый модели с определением минимально допустимой ее толщины, а также условием поддержания песка в статическом состоянии вокруг полости формы при таянии модели.

14. Впервые разработаны сухие сыпучие песчаные смеси для фильтрационной формовки с неорганическими реагентами и оптимизацией по зерновому составу, исходя из уравнения Фуллера, и создан оперативный метод гранулометрической оптимизации составов смесей с возможностью его компьютерного мониторинга.

15. Экспериментальные исследования влияния остаточного давления на проницаемость газа и воды сквозь пористую среду песка вакуумируемой литейной формы при фильтрации расплава ледяной модели показали необходимость применения минимального перепада газового давления или герметизации формы контактом с жидкостью во избежание эрозии песчаной поверхности; предложены математические модели интенсивности массообмена процесса фильтрации песчаного слоя связующим при получении оболочковых форм по ледяным моделям со смешиванием расплава модели с дозированной добавкой жидкости со связующим.

16. Впервые экспериментальным методом гравиметрии определено снижение массы вакуумируемой песчаной формы в период плавления ледяной модели и фильтрации ее расплава в песчаный наполнитель с подсушкой формы, при этом масса продуктов модели в форме уменьшалась на ~45 %, а получение оболочковой формы занимало около 20 мин.

17. Экспериментальные исследования фильтрации расплава ледяной модели при пропитке песчаной формы показали возможность регулирования ее глубины и скорости изменением температуры, а исследование осаждения в близком к модели слое формы

технологических примесей (связующего или отвердителя) в виде нефильтрата при проникновении воды вглубь формы в виде фильтрата легло в основу способа получения оболочковых форм с минимальным содержанием этих примесей.

18. Впервые в опытно-промышленных условиях отработан способ производства оболочковых форм с кристаллогидратами при гидратации их расплавом ледяных моделей на глубину фильтрации, определена продолжительность затвердевания оболочек; примеры получения оболочковых форм показали, что добавление в песчаную смесь быстротвердеющего цемента в количестве 15...20 % позволило образовать твердую оболочку вокруг моделей в контейнерной форме из сухой песчаной смеси в течение 5...7 мин.

19. Впервые предложен ряд процессов литья по ледяным моделям в песчаных формах из холодно-твердеющих смесей, включая ряд оригинальных процессов образования связующих композиций, новых способов уплотнения сыпучих формовочных материалов с помощью градиента давления и «щадящих» модель условий засыпки сыпучих формовочных смесей, а также автоматическое прекращение процесса их уплотнения при достижении максимальной степени такого уплотнения.

20. Впервые разработана пооперационная схема процессов литья по ледяным моделям как техническое задание для проектирования компьютерного мониторинга литейного процесса, определены характеристики для мониторинга и их пределы при трех вариантах удаления ледяной модели и подготовки формы к заливке металлом, спроектирована планировка опытно-промышленного участка ЛЛМ площадью 110 м².

21. Впервые разработан процесс получения песчаных изделий 3D деформированием, в котором сочетаются способы формообразования с компьютерным управлением, криотехнологией, виброуплотнением песчаной смеси с неорганическими связующими и возможностью ее повторного использования до 90 %, а также способ формообразования из сыпучих дисперсных смесей со льдом, включая плавление его при переводе этих наполнителей в увлажненное, а затем в связанное состояние.

22. Впервые предложен способ получения песчаной формы с дифференциальной прочностью на основе струйного смешивания путем совмещения двух двухфазных дисперсных систем в одну трехфазную и холодного твердения полученной формовочной смеси в контакте с оснасткой, а также метод его автоматизации с помощью 3D технологий и возможность сочетания с криотехнологиями.

23. Впервые разработан способ литья по термокомпактируемым пенополистирольным (ППС) моделям, удаляемым из песчаной формы после усадки в результате нагревания; определен режим нагревания ППС моделей и компактирования отходов ППС, описаны примеры и преимущества способа, как метода утилизации таких отходов, а также разработан способ литья с газифицированием моделей под регулируемым давлением воздуха на металл с обратной связью с источником давления для силового воздействия на жидкий металл и регулирования контактного зазора металла с формой.

24. Благодаря невысокой стоимости льда в модельных материалах и покрытия моделей по сравнению с ЛГМ-процессом получен экономический эффект от внедрения опытно-промышленного процесса литья по ледяным моделям в производстве, который составил 1248 грн. на 1 тонну литья в ценах 2011 г. от экономии модельно-формовочных материалов, а расчетный эффект на 1 тыс. т в пересчете на цены 2017 г. составляет 3744000 грн. для производства отливок из серого чугуна; а также опытно-промышленными проверками способов литья в формах с дифференцированными теплофизическими свойствами установлено, что экономический эффект от внедрения этой технологии составит 432 120 грн.

Публикации по теме диссертации

1. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Методы расчета технологических параметров замораживания ледяных моделей для литья в песчаную форму // *Металл и литье Украины*. 2008. № 1-2. С. 49-52.
2. Дорошенко В. С. Предпосылки создания технологии литья по ледяным моделям в вакуумируемых формах // *Металл и литье Украины*. 2009. № 4-5. С. 18–23.
3. Дорошенко В. С., Шинский И. О. 3D-технологии при литье по газифицируемым моделям // *Металл и литье Украины*. 2009. № 4-5. С. 30–33.
4. Шинский О. И., Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Интенсификация теплообмена отливки с дисперсным наполнителем литейной формы при применении хладагента и вынужденной конвекции // *Процессы литья*. 2009. № 5. С. 74-82.
5. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Получение ледяной литейной модели в контакте с охлажденной оснасткой // *Металл и литье Украины*. 2009. № 6. С. 4-7.
6. Дорошенко В. С., Шинский О. И. Литье в оболочковые формы, полученные пропиткой сухого песка связующим // *Металл и литье Украины*. 2009. № 7-8. С. 16-22.
7. Дорошенко В. С. Пространственные литые конструкции, получаемые в объеме песка // *Металл и литье Украины*. 2009. № 7-8. С. 45-52.
8. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Постепенное обновление парадигмы в теории лит. процессов по теме взаимодействия металла с песчаной формой // *Металл и литье Украины*. 2009. №10. С. 28-33.
9. Дорошенко В. С., Кравченко В. П. Структура литейной ледяной модели с точки зрения теории фракталов // *Металл и литье Украины*. 2010. № 3. С. 33-37.
10. Дорошенко В.С. Проблемы конструирования пространственных каркасных отливок и моделей для литья по газифицируемым моделям // *Металл и литье Украины*. 2010. №8. С. 24-26.
11. Дорошенко В. С. Многовариантность использования ледяных моделей при литье в песчаные формы // *Металл и литье Украины*. 2010. № 12. С. 17-26.
12. Дорошенко В. С. Высыпание сухого песка из литейных форм без пылеобразования // *Металл и литье Украины*. 2011. № 2. С. 22-25.
13. Дорошенко В. С. Нанесение порошковых красок на ледяные литейные модели, применяемые для получения отливок из металла // *Экология и промышленность России*. 2011. № 3. С. 10-13.
14. Дорошенко В. С. Получение по ледяным моделям оболочковых форм с кристаллогидратами // *Металл и литье Украины*. 2011. № 6. С. 23-28.
15. Doroshenko V. S. New Possibilities of Developing of the Lost Foam Casting Process // *Revista de Turnatorie*. 2011. Part I, № 3-4. P. 14-16. Part II, № 5-6. P. 20-22.
16. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Конвейеры непрерывного действия для литья по разовым моделям в песчаных формах, упрочняемых под воздействием вакуума // *Процессы литья*. 2011. № 5. С. 49-56.
17. Doroshenko V. S. Continuously Casting of the Cast Parts and Blank by “Process V” // *Revista de Turnatorie*. 2011. № 9-10. P. 20-22.
18. Дорошенко В. С. Экологичная технология получения по ледяным моделям оболочковых лит. форм с гидратационными вяжущими // *Экология и промышленность России*. 2012. № 2. С. 10-13.
19. Дорошенко В. С. Что может быть экологичнее воды? Криотехнология получения металлических отливок по ледяным моделям // *Литье и металлургия*. 2012. №2. С. 45-50.
20. Дорошенко В. С. Математическое проектирование каркасно-ячеистых отливок // *Литейное производство*. 2013. № 2. С. 9-12.

21. Дорошенко В. С. Криотехнология литья по ледяным моделям // Литейное производство. 2013. № 3. С. 16-20.
22. Дорошенко В. С. Трехмерная формовка из сыпучих материалов // Литейное производство. 2013. № 4. С. 8-11.
23. Дорошенко В. С. Газодинамическое уплотнение сухих формовочных наполнителей // Литье и металлургия. 2013. № 2. С. 15-22.
24. Дорошенко В. С. Криотехнология – получение металлических отливок в песчаных формах по ледяным моделям // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 83-85.
25. Дорошенко В. С. Регулирование охлаждения отливки в вакуумируемой форме фильтрацией хладагентов и движением частиц песка // Литейное производство. 2013. № 10. С. 32-37.
26. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Совершенствование оборудования для производства моделей из пенополистирола // Литейное производство. 2014. № 1. С. 32-34.
27. Дорошенко В. С. Ледяные модели в производстве металлоотливок // Строительные и дорожные машины. 2014. № 3. С. 36-43.
28. Дорошенко В. С. Оптимизация гранулометрического состава сухих сыпучих формовочных смесей // Литье и металлургия. 2014. № 2. С. 15-19.
29. Дорошенко В. С. О системе мониторинга процесса литья по ледяным моделям // Литейное производство. 2014. № 5. С. 11-16.
30. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Новые процессы песчаной формовки на основе взаимодействий различных дисперсных фаз // Процессы литья. 2014. № 4. С. 49–56.
31. Дорошенко В. С. 3D технологии изготовления отливок как примеры аддитивного производства // Металл и литье Украины. 2014. № 12. С. 4–9.
32. Дорошенко В. С. Воспроизведение структур природы как метод получения ресурсосберегающих металлоконструкций // Вісник ДДМА. 2014. № 1. С. 43-49.
33. Дорошенко В. С. Оптимизация гранулометрического состава песчаных смесей для фильтрационной формовки // Процессы литья. 2015. № 1. С. 47–53.
34. Дорошенко В. С. Создание трехфазной дисперсной системы струйным смешиванием в процессах песчаного формообразования // Металл и литье Украины. 2015. № 3. С. 24–32.
35. Дорошенко В. С. О послойном печатании песчаной формы с дифференцированной прочностью // Литейное производство. 2015. № 4. С. 19-25.
36. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Моделирование отливок как оболочковых конструкций с целью металлосбережения // Металл и литье Украины. 2015. № 6. С. 30-34.
37. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Особенности литья высокопрочного чугуна в вакуумируемые формы // Металл и литье Украины. 2015. № 9. С. 18–21.
38. Дорошенко В. С. 3D-технологии для формовки и литья // Литье и металлургия. 2015. № 3. С. 30-39.
39. Дорошенко В. С. Материалы, разрушающиеся после выполнения своих функций в формовочных процессах // Литейное производство. 2015. № 9. С. 15-17.
40. Дорошенко В. С. Анализ и идентификация литых легковесных металлоконструкций с использованием теории минимальных поверхностей // Металл и литье Украины. 2015. № 11. С. 24-28.
41. Дорошенко В. С., Шинский В. О. Примеры расчетов технико-экономических показателей процессов литья по разовым моделям // Процессы литья. 2015. № 6. С. 35-47.
42. Дорошенко В. С. Литье по газифицируемым моделям с кристаллизацией металла под давлением // Литейное производство. 2016. № 1. С. 25-28.
43. Дорошенко В. С. Автоматизация изостатического прессования затвердевающей отливки при литье по газифицируемым моделям // Процессы литья. 2016. № 1. С. 33-37.

44. Дорошенко В. С. Самопроизвольные процессы, реализуемые в условиях градиентов термодинамических и физико-химических характеристик литейной формы // *Металл и литье Украины*. 2016. №1. С. 18-22.
 45. Дорошенко В. С. Предложения по металлосбережению при литье высокопрочного чугуна в песчаных формах // *Металл и литье Украины*. 2016. № 2. С. 28-35.
 46. Дорошенко В. С. Примеры 3D-технологии в литейном производстве. Снижение металлоемкости отливок // *Литье и металлургия*. 2016. № 1. С. 34-39.
 47. Дорошенко В. С. Варианты твердения формовочных смесей при литье по ледяным моделям // *Литейное производство*. 2016. № 3. С. 29-34.
 48. Дорошенко В. С. Примеры гармонизации с природой технических и декоративных отливок // *Литейное производство*. 2016. № 9. С. 30-37.
 49. Дорошенко В. С. Примеры металлосбережения при литье высокопрочного чугуна в песчаные формы // *Литейное производство*. 2016. № 11. С. 19-24.
 50. Дорошенко В. С. Структура исследований и технологических разработок по регулированию скорости охлаждения отливок и переход к конструированию легковесных отливок // *Металл и литье Украины*. 2016. № 8-10. С. 58-63.
 51. Дорошенко В. С., Кравченко Е. В. Новые способы отбора проб при идентификации свойств металла методом термоанализа, с возможностью оптимизации конструкций отливок // *Литейное производство*. 2017. № 2. С. 28-33.
 52. Дорошенко В. С. Структура исследований по разработке технологии литья по ледяным моделям с использованием ряда особенностей и природных явлений // *Процессы литья*. 2017. № 1. С. 39-46.
 53. Шинский О. И., Дорошенко В. С. Процессы песчаной формовки с использованием градиентов давления, температуры и концентрации реагентов в формовочной смеси // *Процессы литья*. 2017. № 5. С. 56-65.
 54. Дорошенко В. С. Предпосылки встраивания термообработки в процесс литья высокопрочного чугуна по газифицируемым моделям // *Металл и литье Украины*. 2017. № 6-7. С. 10-16.
 55. Дорошенко В. С. Возможности литья чугуна с шаровидным графитом по газифицируемым моделям с изотермической закалкой отливок // *Литейное производство*. 2017. № 11. С. 7-14.
 56. Дорошенко В. С. Структура базы данных на основе концепции регулирования скорости охлаждения отливки в форме – структура металла – металлосберегающие конструкции отливок // *Литейное производство*. 2018. № 1. С. 28-34.
 - 57-89. Публикации в сборниках тезисов конференций (полный список – в диссертации).
- Патенты України №№: 70286, 74539, 77595, 77659, 79267, 80072, 80235, 80372, 80381, 80509, 80656, 81012, 81013, 81014, 81726, 82025, 82026, 82028, 82154, 82837, 83018, 83882, 83891, 83892, 83921, 85234, 85515, 85830, 86634, 87782, 88304, 89664, 90494, 91197, 91282, 92163, 92226, 93723, 95319, 96915, 99422, 106005. Патенты России №№: 2029653, 2026127, 2020027, 2026126, 2020028, 2017559, 2043824, 2020029. Авторские свидетельства СССР №№: 1766588, 1792791, 1785770, 1818169.

АННОТАЦИЯ

Дорошенко В. С. Теоретические и технологические основы получения песчаных форм из сухого дисперсного наполнителя для производства легковесных литых конструкций. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.04. – Литейное производство. – Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, 2018.

Диссертация посвящена развитию теоретических основ и технологий формообразования из песчаных смесей при изготовлении форм с дифференцированными теплофизическими характеристиками, поскольку условием получения отливок с заданными структурой металла и свойствами является управление интенсивностью теплоотвода в литейной форме. Исследованы и использованы следующие закономерности фильтрационных явлений и свойств текучести дисперсной среды песчаной формы, которые позволили увеличить скорость охлаждения отливки в 1,2-2,0 раза путем изменения теплопроводности, пористости наполнителя и конвективной составляющей теплопереноса в разработанных способах литья с фильтрацией газообразного или жидкого хладагента через песчаную среду формы и перемещением этой среды, в отличие от охлаждения отливки в традиционной песчаной форме со связующим, как цельной конструкции. Путем математического моделирования тепловых процессов получено выражение для коэффициента теплоотдачи α , что позволило по данным экспериментов калориметрии определить изменение его величины во времени для расчета изменения интенсивности принудительной конвекции в новых способах литья в вакуумируемых формах из кварцевого песка (ЛГМ, ВПФ) с методами дозированного увлажнения формы или перемещения песка, что повысило скорость охлаждения отливок в 1,2-1,5 раза по сравнению со способами формирования без таких методов охлаждения.

Исходя из концепции взаимодействия конструкции литейной модели с двумя текучими средами: металлом, который заливается в форму и замещает газифицируемую модель (для способа ЛГМ) и заполняет литейную полость, и песчаной средой вокруг модели, созданы методы физического, математического и компьютерного проектирования легких пористых металлоизделий путем подражания ресурсосберегающим структурам природы, как их представляет современное естествознание.

На основе анализа структур неорганических веществ разработаны, включая компьютерное проектирование по методу построения структур материалов, ячеистые конструкции отливок по аналогам строения кристаллических и аморфных структур, квазикристаллов на основе мозаики Пенроуза и углеродных нанотрубок, а также способы изготовления для них разовых литейных моделей. Разработаны конструкции отливок и способ монтажа модельных кластеров на многоярусных стойках-коллекторах по принципу ботанического явления филлотаксиса, на основе математических моделей из фрактальной геометрии, по аналогии с древовидными структурами, а также со структурой ДНК. Предложен ряд математических концепций проектирования каркасно-ячеистых отливок, оптимально заполняющих пространство в объеме песка литейной формы, с использованием теории минимальных поверхностей, по аналогии со строением пены с ячейками в виде пентагональных додекаэдров, как прообразов легковесных металлоизделий при составлении разовых моделей из повторяемых деталей. На основе таких методов получено 11 патентов Украины на легковесные конструкции отливок и их литейные модели с составлением таких разовых моделей из серийно изготавливаемых повторяющихся деталей.

Разработана технология литья металла по ледяным моделям в песчаные

оболочковые формы. Для этого предложены математические модели формообразования ледяных моделей в виде аналитических выражений для расчета характеристик их производства из жидкоподвижных композиций путем охлаждения, кристаллизации, переохлаждение, замораживание в различных средах и в зависимости от геометрической формы таких моно-, многослойных, полых и армированных разовых моделей. Получены экспериментальные данные кинетики замораживания и прочности на изгиб в зависимости от температуры ледяных моделей. Установлены условия образования квазижидкого слоя на поверхности таких моделей, и присущий ему электрический заряд использован для создания и нанесения порошковых противопригарных и герметизирующих покрытий ледяных моделей. Применение таких закономерностей, присущих льду, стало научной основой технологии порошковых красок, наносимых методом электроосаждения одним или несколькими слоями на разовые модели; эти покрытия проверены на натуральных образцах и отработаны для использования.

Научно обоснованы и разработаны способы создания прочности дисперсных сыпучих формовочных смесей путем перевода материала разовой модели в жидкое состояние (расплав или раствор), фильтрации его в формовочную смесь со стороны литейной полости формы и образования адгезионно-когезионного комплекса в объеме оболочковой формы на глубину фильтрации такого расплава, раствора или реагента, пропитываемого песчаную форму. При этом такой материал модели в жидком состоянии или указанный реагент вступает в химические реакции с материалом формовочной смеси или подвергается гелеобразованию, что приводит к формированию пространственной структуры пленок связующего в твердом состоянии. Такой процесс создания прочности в формовочном материале в результате фильтрации жидкого реагента с последующим взаимодействием с сыпучими компонентами виброуплотненного формовочного материала относится к новой технологии фильтрационного формования.

Установлено влияние вакуумирования песчаной формы на потерю ее массы в период времени плавления и фильтрации в песчаный наполнитель расплава ледяной модели при подсушивании формы, влияние температуры на глубину и скорость фильтрации, закономерность осаждения в близком к модели слое формы технологических примесей (связующего или отвердителя) в виде нефильтрата при проникновении воды вглубь формы в виде фильтрата. Эти экспериментально установленные явления положены в основу способа получения оболочковых форм с минимальным содержанием этих примесей, образующих связующую композицию в песке оболочковой формы. Продолжительность твердения оболочковой формы с ледяной моделью с начала увлажнения и гидратации песчаной смеси, содержащей быстротвердеющий цемент в количестве 15-20 %, составила 5-10 мин. В технологию литья по ледяным моделям экологический эффект достигался заменой органических модельно-формовочных материалов на неорганические с преимущественным использованием в смесях песчаных форм кристаллогидратных связующих, которые способны к дегидратации при нагревании теплом отливки и подлежат несложной регенерации для повторного использования.

Разработаны технологии получения песчаной формы с дифференцированной прочностью по методу аддитивного заполнения формовочной оснастки песчаной

смесью холодного твердения со смешиванием ее из двух двухфазных аэрозолей в одну трехфазную дисперсную систему, а также формования песчаных изделий деформацией в трех измерениях; в этих способах сочетается формообразования с криотехнологией, компьютерным управлением, вибрационным уплотнением песчаной смеси с неорганическими связующими и возможностью ее регенерации.

Ключевые слова: отливка, ЛГМ-процесс, ледяная модель, литейная песчаная форма, охлаждение формы, фильтрационная формовка, хладагент, теплообменные процессы, вакуумирование формы, теплофизические характеристики, сбережение металла.

ABSTRACT

Doroshenko V.S. Theoretical and technological foundations for the production of sand molds from dry dispersion fillers for the production of lightweight cast structures. - Manuscript.

The Dissertation on competition for scientific degree of the Doctor of Technical Science in specialty 05.16.04 – Foundry. – Physical-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kiev, 2018.

The thesis is devoted to the development of theoretical foundations and technologies of molding from sand mixtures in the preparation of molds with different thermophysical characteristics, since the condition for obtaining castings with the specified structure and properties is the control of the intensity of the heat dissipation in the mold. Such regularities of the filtration phenomena and flow properties of the sandy dispersion medium have been studied and used, which allowed to increase the cooling rate of the casting by 1.2-2.0 times by changing the thermal conductivity, the porosity of the filler and the convective component of heat transfer in the developed methods of casting with filtration of gaseous or liquid refrigerant through the sandy medium of the mold and the movement of this medium, in contrast to the cooling of the casting in the traditional sand mold with the binder. Using mathematical modeling of thermal processes, formulas were obtained for calculating the cooling rate of the casting and the heat transfer coefficient α , which made it possible to determine a number of their values from the results of calorimetry experiments for the first time to calculate the methods of forced convection with a change in its form and intensity in the mold from dry sand, castings by methods of dosed mold wetting or sand movement, increased the cooling rate of castings by 1.2-1.5 times in comparison with the methods of formation without such methods of cooling. Based on the concept of the effect of the construction of the casting pattern with two fluid media: the metal that is poured, replaces the gasification pattern and fills the casting cavity, and the sand environment around the pattern, creates methods for the physical, mathematical and computer design of lightweight porous metal products by inheriting the resource-saving nature structures, modern natural science.

When creating the technology of casting on ice patterns, mathematical models of their shaping in the form of formulas for calculating the characteristics of their production from liquid-mobile compositions by cooling, crystallization, supercooling, freezing in various media and depending on the geometric shape of such mono-, multilayered and reinforced single patterns are proposed. Experimental data on the kinetics of freezing and bending strength are obtained as a function of the temperature of the ice patterns. The conditions for the formation of a quasi-liquid layer on the surface of such patterns are

established, and the electric charge inherent in it is used to create and apply powder non-stick and sealing coatings of ice patterns. The application of such regularities inherent in ice has become the scientific basis for the technology of powder paints applied by electrodeposition on single patterns; these coatings are tested on-site and tested for use. These developed methods for creating the strength of dispersed free-flowing molding mixtures have been scientifically substantiated by transferring a single-pattern material into a liquid state (melt or solution), filtering it into a molding mixture from the mold cavity side and forming an adhesive-cohesive complex in the shell-shaped volume to the filtration depth of such a melt, solution or reagent in sand mold. In this case, such a melt or said reagent enters into chemical reactions with the material of the molding mixture or undergoes gelling, which leads to the formation of the spatial structure of the binder films in the solid state. The established effect of evacuation of the sand mold on the loss of its mass during the time of melting and filtration into the sand filler of the melt of the ice pattern when the mold is dried, the effect of temperature on the depth and the filtration rate, the regularity of precipitation in the mold of technological impurities (binder or hardener) close to the pattern nonfiltrate at penetration of water deep into the mold in the form of a filtrate, are the basis for the process of obtaining shell molds with a minimum content of these impurities. The duration of hardening of the shell mold with the ice pattern from the beginning of moistening and hydration of the sand mixture containing quick-setting cement in an amount of 15-20 % was 5-10 minutes. Methods of additive molding processes for producing sand products with deformation have been developed, and sandy molds have been obtained with differential strength when mixing materials as disperse systems with cold curing of the resulting molding mixture, combining molding with computer control, cryotechnology, consolidating sand mixture with inorganic binders and the possibility of it regeneration.

Keywords: casting, gray iron, ductile iron, gas supply pattern, foundry sand mold, mold cooling, heat and mass transfer processes, vacuuming mold, thermal characteristics, the preservation of the metal.