

невозможно применять детали из магниевых сплавов без нанесения дополнительной защиты лакокрасочными системами. Необходимым условием для качественного нанесения ЛКП на металлическую основу является подготовка поверхности. Формирование на поверхности магниевых сплавов защитного неорганического неметаллического покрытия должно обеспечивать не только пассивирование поверхности и ограничить проникновение влаги к металлу, но и хорошую адгезию лакокрасочного покрытия. Испытания адгезии ЛКП, проведенные по ГОСТ 15140-78 методом решетчатых надрезов, установили, что образец без покрытия с поверхностью, подготовленной только химическим обезжириванием, обладает неудовлетворительной адгезией (рис. 4, а). Плохая адгезия не позволит защитить от коррозионного воздействия окружающей среды даже самыми совершенными системами ЛКП. Металл с нанесенной фосфатной пленкой обладает значительно лучшими адгезионными свойствами поверхности, ни один из секторов решетчатых надрезов на ЛКП не имеет сколов, что соответствует 1 баллу по ГОСТ 15140-78 (рис. 4, б).

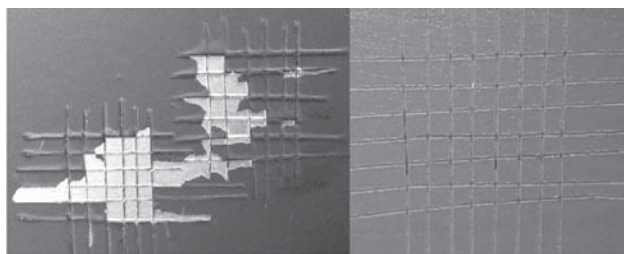


Рис. 4, а, б. Адгезия ЛКП к фосфатным покрытиям на магниевом сплаве МЛ10

#### Выводы

- Для защиты от коррозии жаропрочного магниевых сплавов МЛ10 предложен экспериментальный раствор фосфатирования, состоящий из монофосфатов слабых оснований, имеющих высокую температуру разложения, фторидов и водорастворимых органических ингибиторов коррозии магниевых сплавов.
- Выбран оптимальный режим нанесения неметаллического неорганического фосфатного покрытия для защиты от коррозии магниевых сплавов МЛ10, позволяющий получить на поверхности металла равномерную пленку серого цвета, обладающую прочной связью с подложкой.
- Изучение строения пленки на магниевом сплаве, полученной холодным фосфатированием, показало, что она состоит из мельчайших кристаллов, срос-

шихся между собой, разделенных порами микроскопических размеров.

- Исследования электрохимических свойств системы «магниевый сплав+покрытие» позволили определить стационарный потенциал и сравнить его с потенциалом материала подложки. Электрохимические данные подтверждены ускоренными коррозионными испытаниями в КСТ.
- Определено, что старение при 300°C в течение 4 ч незначительно влияет на защитные свойства покрытия, что подтверждает эффективность его использования.
- Высокие адгезионные свойства поверхности от покрытия, полученного при фосфатировании, позволяют обеспечить надежную защиту от коррозии магниевых сплавов МЛ10.

#### Список литературы

1. Тихова Н.М., Блохина В.А., Антипова А.П. Жаропрочные магниевые сплавы. – М.: Наука, 1978. – С. 55–58.
2. Тимонова М.А. Защита от коррозии магниевых сплавов. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
3. Хаин И.И. Теория и практика фосфатирования металлов. – Л.: Химия, 1973.
4. CHEN Xiao-ming, LI Guang-yu, LIAN Jian-she / Organic-magnesium complex conversion coating on AZ91D magnesium alloy. *Ntrans. Nonferrous Met/ Soc., [CH]* 2010, 643–647.

В. Коровин (Москва, vladimir.korovin@mail.ru), С. Поляков (Технический университет «Горная академия Фрайберг», Германия), А.Ю.Коротченко (канд.техн.наук, заведующий кафедрой «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва), Д. Поляков (Дрезден, Германия), Ю. Баст (Технический университет «Горная академия Фрайберг», Германия)

## Современные тенденции в развитии САПР отливки: компьютерная система синтеза технологических решений

Использование компьютеров при проектировании технологий давно стало правилом, и литейное производство не является исключением. История применения компьютерных расчетов при проектировании литейных технологий насчитывает уже более тридцати лет. За свою историю системы автоматизированного проектирования прошли несколько этапов, и к настоящему времени отчетливо определилась тенденция к интеграции. Первона-

Рассмотрены основные тенденции в развитии систем компьютерной поддержки технолога при разработке технологического процесса изготовления отливки. Отмечена тенденция к интеграции систем. Показана необходимость в системе синтеза технологического решения. Анализируются основные свойства такой системы. Представлен пример возможной реализации.

**Ключевые слова:** САПР, моделирование, технология отливки, синтез технологического решения.

\*\*\*

**Korovin V., Polyakov S., Korotchenko A.Y., Polyakov D., Bast Y.** Current trends in the development of CAD casting: computer system for synthesis of technology solutions.

The main trends in the development of technician computer support systems in the development castings manufacturing process are shown. There is a trend towards integration of systems. There is a necessity of a synthesis system of technological solutions. The main properties of this system are analyzed. An example of possible implementation of such systems is given.

**Key words:** CAD, modelling, casting technology, synthesis of technological solutions.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48

начально автоматизировались отдельные операции проектного процесса (например, геометрическое моделирование, теплообмен, гидродинамика, прочностные расчеты и т.д.) и при этом использовались различные программные средства. На следующем этапе отдельные программы стали объединять и появилось понятие «интегрированной среды проектирования» (ИСП), смысл которого состоит в том, что все необходимые при проектировании действия выполнялись в рамках единой программной среды. ИСП может быть реализована в рамках одной программы или набором программ, функционирующих совместно, т.е. имеющих единый интерфейс. Примерами таких систем являются CATIA, Pro/ENGINEER, SolidWorks и др. В настоящее время ИСП появляются все в новых и новых областях проектирования. Причем их специализация все более углубляется. Тенденция к интеграции затронула и компьютерные системы, используемые в литейном производстве при проектировании литейных технологий, где сразу наметились два основных класса программ – литейные моделирующие системы (ЛМС) и литейные программы синтеза технологических решений (ЛПСТР).

Данная статья посвящена обзору основных тенденций развития компьютерных систем поддержки технолога-литейщика при разработке технологии отливки. Учитывая существенные различия в технологических решениях для разных способов литья, авторы ограничились рассмотрением этого вопроса в основном для гравитационных способов литья (песчаная форма, кокиль, литье по выплавляемым моделям и т.д.).

### Литейные моделирующие системы (ЛМС)

Литейные моделирующие системы – это типичные расчетные программы, реализующие численное решение уравнений математической физики, которые описывают происходящие в литейной форме процессы формирования отливки. В разработке литейных моделирующих систем к настоящему времени достигнуты значительные успехи. Число коммерческих реализаций таких систем во всем мире исчисляется десятками, а число продаж – десятками тысяч. Почти на каждом современном литейном предприятии имеется одна или несколько литейных моделирующих систем. Наиболее известные литейные моделирующие системы [4–8]: MAGMAsoft и WinCast (Германия), ProCast и QuickCast (ESI Group), LVMFlow/NovaFlow и Полигон (Россия), Flow-3D и SolidCast (США) и др. Развитие литейных моделирующих систем шло по нескольким направлениям, в частности расширились число моделируемых процессов и способов литья, совершенствовались сервисные возможности, повышались точность и скорость расчетов.

**Первое направление** – расширение числа моделируемых процессов. Начиналось все с моделирования охлаждения и затвердевания, затем добавилось моделирование заполнения формы и анализ напряженного состояния в отливке. Более детально стали моделироваться затвердевание, фильтрация, структурные изменения в твердом состоянии, эффекты на границе «отливка-форма» и пр.

**Второе направление** – расширение числа моделируемых способов литья. Очевидно, что при литье в песчаную форму и литье под давлением процессы фор-

мирования отливки значительно отличаются. При математическом моделировании это реализуется разными математическими моделями. В результате, в литейных моделирующих системах стали появляться отдельные модули, ориентированные на разные способы литья. В настоящее время развитые системы моделирования литья предлагают специализированные модули для основных способов литья.

**Третье направление** – совершенствование сервисных возможностей. ЛМС оснастили базами данных используемых в расчетах материалов (литейные сплавы и материалы форм), были расширены возможности для просмотра результатов расчетов и пр.

**Четвертое направление** – помощь при поиске оптимального технологического решения, т.е. создание программных модулей оптимизации. Это направление иногда называют «новыми методами моделирования» [4]. Но обычно, все сводится к параметрической оптимизации и использованию математических методов, основанных на эволюционных алгоритмах. Это направление, конечно, надо развивать, учитывая потенциальные практические выгоды.

Практика использования ЛМС говорит, что их применение всегда желательно, приносит большую уверенность в получении качественной отливки и оправдано для приобретения «холодного опыта», т.е. без реального изготовления отливки. Однако трудоемкость подготовки исходных данных и компьютерное время моделирования часто ставят ограничения на охват всей номенклатуры отливок предприятия. Обычно моделирование выполняют только для отдельных отливок, в особо важных случаях, связанных с риском получения брака, или при особых требованиях к качеству. К сожалению, на настоящий момент, подготовка технологического решения полностью основывается на опыте технолога и единственным вспомогательным инструментом являются системы геометрического моделирования, позволяющие этот опыт воплотить в геометрические модели. Для поддержки технолога при генерации технологического решения необходимы программы другого уровня, синтезирующие технологическое решение на основе имеющихся научных знаний в этой области.

### Литейные программы синтеза технологических решений (ЛПСТР)

Этот класс программ САПРа литья пока не получил должного развития и на сегодняшний день на практике почти не используется. Чтобы понять причины такого состояния, рассмотрим их чуть подробнее. При проектировании литейной технологии в качестве исходных данных используется геометрия детали и технические требования к ней. В результате проектирования требуется получить геометрию отливки со всеми необходимыми технологическими дополнениями (припуски, уклоны, напуски, литниковая и питающая системы), геометрию всех частей формы (полуформы, стержни, прибыльные вставки, холодильники и пр.). Состав проектных работ определяется способом литья, сплавом, технологией формообразования, особенностями используемого оборудования и пр. Приведенное выше перечисление дано для литья в песчаную форму. Видно, что при проектировании литейной технологии выполняется достаточно большой объем операций. Задачей литейных программ синте-

за технологических решений является поддержка технолога при выработке решений в вопросах литейной технологии (при определении размеров напусков и уклонов, мест установки и размеров прибылей, холодильников и пр.), а также полная или частичная автоматизация выполнения этих операций.

Для большинства операций по проектированию технологии давно существуют методики, построенные на производственном опыте и простейших расчетах. Это позволяет выполнять эти операции без привлечения компьютерных программ, что и является одной из причин, почему литейные программы синтеза технологических решений не получили должного развития. Действительно, если существуют и работают неавтоматизированные методы, то не очень остро чувствуется необходимость их автоматизировать. Вторая причина состоит в том, что автоматизация прежних методик, ориентированных на «ручное» выполнение, не дает существенных преимуществ, а разработка новых методик – это нетривиальная задача, требующая значительных затрат. Эти причины привели к тому, что работы над литейными программами синтеза технологических решений периодически ставились и проводились, но коммерчески успешными результатами, как правило, не заканчивались. Примером разработки, доведенной до коммерческой реализации, может служить программа «Foundry Technology III» шведской компании NovaCast Technologies AB. Для 1980-х гг., когда появилась первая коммерческая версия программы – это была вполне своевременная разработка, в которой был реализован набор традиционных методик, используемых при проектировании литниково-питающих систем. Но сегодняшнему состоянию в области САПРа эта программа уже плохо соответствует, т.к. изначально не была ориентирована на совместное использование с системами геометрического моделирования и ЛМС.

Примером недоведенной до коммерческой реализации разработки, но тоже следующей тенденции к интеграции, может служить описанный в работе [1] интегрированный пакет программ «Компьютерный помощник технолога-литейщика» (рис. 1), в котором объединялся набор литейных программ, предназначенных для технолога-литейщика.

В то время, в начале 1990-х гг., еще не было столь развитых и распространенных систем геометрического моделирования и литейных моделирующих систем и потому единственным критерием интеграции было требование, что именно такой набор программ (функциональности) требуется потребителю. Этот критерий и сейчас остается определяющим. Но ситуация в САПРе изменилась и теперь стало еще необходимо, чтобы новые программы были максимально совместимы с уже используемым ПО.

Приведем еще один пример ЛПСТР – система RHOST, разработанная в Германии [2, 3]. Она задумывалась как система для компьютерной поддержки технолога-литейщика и была на тот момент современной реализацией идей, заложенных в интегрированном пакете программ «Компьютерный по-

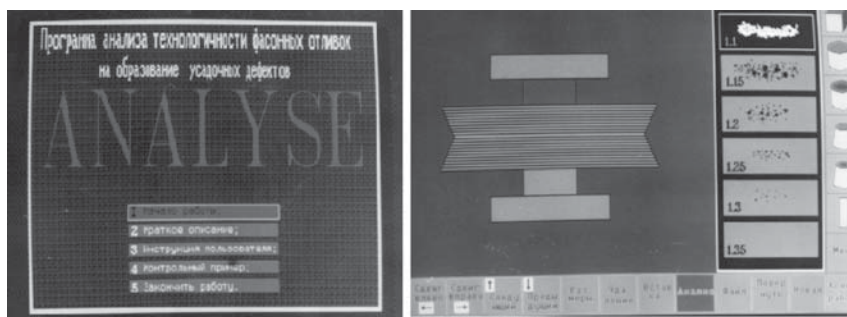


Рис. 1. Модуль анализа технологичности из интегрированного пакета программы «Компьютерный помощник технолога-литейщика» конца 1980-х гг.

мощник технолога-литейщика». В то время, на рубеже столетий, тенденция к интеграции программных средств уже вполне определилась, но понятие интегрированной среды проектирования было еще не очень широко распространено и поэтому при постановке работы понятие ИСП не использовалось. Литейные моделирующие системы и системы геометрического моделирования тоже уже существовали, но опять же, они не были так широко распространены как сейчас. Поэтому, в создаваемой системе не ставилась задача об ее интеграции с существующими программными средствами – ЛМП и системой геометрического моделирования (СГМ), а предполагалось, что все необходимые для поддержки технолога-литейщика модули будут разработаны в рамках самой системы. В результате, в системе RHOST появился модуль моделирования затвердевания и отдельные элементы СГМ. Очевидно, что эти модули проигрывают своим специализированным аналогам по многим компонентам, но благодаря объединению этих модулей с модулями синтеза технологических решений создавалась единая среда проектирования литейной технологии, что и является главным достоинством системы RHOST. В действительности, систему RHOST неправильно относить к классу ЛПСТР, поскольку она, кроме модулей синтеза технологических решений, содержит модуль моделирования и элементы СГМ. Правильнее ее позиционировать как прообраз интегрированной среды проектирования (ИСП). Постановка проекта RHOST описана в статье [2], а официальные результаты разработки опубликованы в статье [3]. Опубликованные результаты, как это часто бывает – только «вершина айсберга», и далеко не самое ценное из того, что было получено в результате разработок. Проект RHOST был одной из «правильных» на тот момент постановок задачи в этой области, но реализация получилась не самой удачной. Кроме того, и до сих пор нет вразумительной маркетинговой политики по продвижению этого программного продукта. В результате – на сегодняшний день система RHOST внедрена только на двух литейных предприятиях в Германии, принадлежащих компании Schmees (<http://www.schmees.com/>).

К настоящему времени ситуация с литейными программами синтеза технологических решений изменилась. Во-первых, в результате ранее проводимых работ в этой области накопился достаточный опыт. Во-вторых, на большинстве литейных предприятий используются литейные моделирующие программы и другие программы САПРа, в частности программы гео-

метрического моделирования. В такой ситуации все большим анахронизмом выглядит «ручное» выполнение операций по синтезу технологических решений. И, в-третьих, общий уровень технологии разработки программ САПР достиг такого уровня, при котором для многих задач ЛПСТР могут быть найдены уже решенные аналоги.

### Литейная технологическая система

Для любой компьютерной программы важно окружение, в котором она должна работать. Это определяет спецификацию требований к ее функционированию. А именно: откуда, какие и в какой форме исходные данные программа получает; куда, какие и в какой форме результирующие данные программа передает; каким образом исходные данные преобразуются в результирующие данные. Рассмотрим типовую схему разработки литейной технологии на современном литейном предприятии. Предполагаем, что при разработке технологии на предприятии используют одну из литейных моделирующих систем. Очевидно, что при этом неизбежно будет использоваться и какая-то система геометрического моделирования. Она необходима, как минимум, для того, чтобы получить 3D модель отливки и формы. Для работы ЛМС нужна именно такая модель, а сами ЛМС, хоть обычно и содержат возможности создания 3D моделей простейших геометрических тел, но этих возможностей явно недостаточно, если иметь в виду реальную фасонную отливку с ее нетривиальной геометрией. Так на практике и происходит – при разработке литейной технологии сейчас используются как минимум ЛМС и СГМ. Типовая схема проектирования приведена на рис.2.

На входе имеем 3D модель детали и технические требования к ней. В системе геометрического моделирования создается 3D модель отливки со всеми технологическими дополнениями, а также 3D модели всех частей формы. Система геометрического моде-

лирования при этом используется только для построения геометрии, а все содержательные действия – расчет напусков, уклонов, припусков, проектирование литниковой и питающей системы и др. – производятся обычно «вручную». Другими словами, те задачи, которые должны решаться литейными программами синтеза технологических решений, из-за отсутствия таких программ, решаются без компьютерной поддержки. После того как все 3D модели формы готовы, они передаются литейной моделирующей системе. Импорт геометрических данных в ЛМС обычно производится в модуле, называемом препроцессором. Этот модуль предназначен для подготовки исходных данных для расчета (моделирования, процессинга – отсюда и название). В препроцессоре, кроме импорта геометрических данных, выполняется дискретизация расчетной области, назначение свойств материалов, а также постановка начальных и граничных условий. Здесь же задаются параметры моделирования: какие процессы моделировать, какие критерии использовать, что и как часто сохранять и пр. Далее выполняется собственно моделирование, в ходе которого записываются результаты. По окончании моделирования просмотр результатов производится в модуле, носящем название постпроцессор. В описанной схеме синтез технологических решений при проектировании литейной технологии распределяется между системой геометрического моделирования и препроцессором ЛМС. В СГМ выполняются геометрические построения, а в препроцессоре ЛМС – назначение свойств материалов и технологических параметров (температура и режим заливки и пр.). Такое «распределение ролей» легко объяснимо и рационально. Моделирование сложной 3D геометрии до сих пор является довольно непростой задачей, поэтому ЛМС не обладают такими возможностями в этой области по сравнению со специализированными программами. Уже упоминалось, что обычно ЛМС могут моделировать 3D геометрию, но возможности эти ограничены простейшими конфигурациями.

Учитывая сложившуюся практику проектирования литейных технологий, представляется целесообразным оснастить системы геометрического моделирования возможностями автоматизированного синтеза литейных технологий. Такой вариант представлен на рис.3. В некоторых СГМ в настоящее время есть похожие технологические модули, например, модуль для листовой штамповки и модуль для литья пластмасс и пр. Этот вариант, назовем его «литейная технологическая система в составе СГМ», был бы оптимальным с точки зрения удобства работы технолога-литейщика, и он более полно реализует идею интегрированной среды проектирования. Но у него есть и серьезные недостатки. В частности, число используемых



Рис. 2. Типовая схема проектирования литейной технологии



Рис. 3. ЛТС в составе системы геометрического моделирования



Рис. 4. Отдельно функционирующая ЛТС

Задачи, решаемые литейной технологической системой

Задача	Комментарии
Импорт геометрии детали	Общепринятые в СГМ форматы (например, STL)
Положения отливки в форме	Кроме возможности задать положение отливки в форме предоставляется информация об оптимальном положении отливки по различным критериям
Поверхности разъема формы	Оптимизация по различным критериям: количества стержней с учетом применяемого парка опок и пр.
Стержни	Идентификация поверхностей отливки, оформляемых стержнями. Построение геометрии стержней (в программе геометрического моделирования)
Припуски на механическую обработку	В зависимости от допусков, класса точности и пр.
Литейные уклоны	Идентифицируются поверхности с недостаточным уклоном, рекомендуется величина уклона. Геометрические построения – в программе 3D моделирования
Питающая система	Кроме возможности самостоятельно указать места установки прибылей и холодильников предлагается набор методов автоматизированного построения питающей системы
Литниковая система	Кроме возможности самостоятельно определить литниковую систему предлагается набор методов автоматизированного построения литниковой системы
Экспорт геометрии всех частей формы	Общепринятые в ЛМС форматы (например, STL)

сейчас на литейных предприятиях систем геометрического моделирования исчисляется десятками и оснащение их литейными модулями, как минимум, будет идти долго.

Более конструктивно (рис. 4) выглядит вариант разработки отдельно функционирующей литейной технологической системы (stand-alone). Главное ее преимущество – это возможность использования такой системы практически с любой системой геометрического моделирования. Такая система будет полезна всем литейным предприятиям, независимо от того, какое программное обеспечение на них уже используется. Ее можно даже использовать без литейной моделирующей программы. Плата за такой универсализм состоит в том, что работающая отдельно литейная технологическая система не будет иметь полноценного интерфейса с системой геометрического моделирования, что отражает серая стрелка СГМ ← ЛТС. А именно, результаты работы ЛТС необходимо будет считывать с экрана и затем вводить в систему 3D моделирования. Но это все же лучше, чем это делается сейчас. Кроме того, всегда существует возможность с помощью встроенных в СГМ возможностей расширения их функциональности (API) автоматизировать передачу данных.

Разработка литейной технологии с использованием отдельной ЛТС может выполняться по разным сценариям. Опишем два из них. В общем случае на литейное предприятие поступают 3D модель детали, чертежи и технические требования. 3D модель детали импортируется в СГМ и в ЛТС. Далее работы выполняются

с использованием двух программ: в СГМ выполняются необходимые геометрические построения – нанесение припусков, уклонов, литейных радиусов, построение стержней и др., а ЛТС используется в режиме экспертной системы, т.е. литейная технологическая система обеспечивает разработчика вспомогательной информацией – величина напусков; поверхности, требующие уклонов; поверхности, оформляемые стержнями и пр. Другими словами, ЛТС осуществляет информационное сопровождение, решая специфичные для литейной технологии задачи, а в СГМ полученные от ЛТС результаты используются при геометрических построениях. Поскольку в ходе проектирования геометрия отливки меняется (т.е. появляются новые геометрические объекты: прибыли, технологические напуски, литниковая система и т.д.), то периодически необходимо выполнять обновление 3D модели отливки в ЛТС. В таком режиме можно выполнить проектирование всей технологии изготовления отливки и передать всю геометрическую информацию в литейную моделирующую систему.

Если на литейное предприятие поступает 3D модель отливки, а не детали, т.е. припуски и уклоны уже нанесены, плоскость разъема определена и 3D модели стержней имеются или не нужны, то можно воспользоваться другим сценарием. Такая ситуация случается, когда отливка уже производилась на другом предприятии. В этом случае остается разработать только питающую и литниковую системы. Часто элементы литниково-питающей системы формируются из стандартных элементов или элементов простых геометрических

ких тел, поэтому не требуются сложные геометрические построения. Тогда можно обойтись совсем без использования системы геометрического моделирования и выполнить проектирование литниковой и питающей систем в литейной технологической системе, а затем напрямую передать построенные 3D модели литниковой и питающей систем в литейную моделирующую программу.

Очевидно, что круг задач, которые должна решать литейная технологическая система, специфичен для различных способов литья и должен определяться для каждого из них индивидуально. В таблице, в качестве примера, приведен список задач для литья стали в песчаную форму.

Для всех перечисленных задач существуют неавтоматизированные методы решения, которые успешно применяются десятки лет. Для некоторых задач разработаны новые расчетные методы, позволяющие получать более рациональные решения. Один из таких методов описан в приведенном ниже примере.

### Пример использования ЛТС

Проиллюстрируем работу ЛТС небольшим примером – разработкой системы питания для отливки «Крестовина». В примере использован опытный модуль ЛТС для синтеза системы питания (ЗР-CAST).

На рис. 5 представлена 3D модель отливки без литниково-питающей системы, импортированная в ЛТС (ЗР-CAST) с помощью STL файла из системы 3D моделирования. Характеристики отливки: материал – Ст.20Л; вес – 5,3 т; преобладающая толщина стенок – 200 мм. В литейной технологической системе автоматически определяются тепловые узлы отливки и их геометрические модули. Эта информация становится доступной технологу, что помогает ему в принятии решения о местах установки прибылей.

На рис. 6 показана отливка, на поверхности которой представлена «карта дефицита питания отливки». Под этим понимается «отображение» величины тепловых узлов на поверхности отливки. Это позволяет визуально оценить эффективность установки прибылей в то или иное место на поверхности отливки, а также помогает при определении положения отливки в форме. Окраска поверхности от голубого до красного цвета характеризует величину потребности в питании тепловых узлов и, соответственно, содержит информацию о величине необходимых прибылей. Для установки прибыли достаточно кликнуть мышкой в точку поверхности отливки и в открывшемся диало-

ге настроить ее параметры или выбрать прибыль из соответствующей библиотеки. Установка каждой новой прибыли изменяет карту дефицита питания, что помогает выбору положения для следующей прибыли. Пересчет карты дефицита питания осуществляется программой автоматически. Для установленной прибыли, если она выбрана из библиотеки, или ее форма поддерживается возможностями ЛТС, выполняется построение 3D модели, которая в дальнейшем передается в ЛМС или систему геометрического моделирования. Для прибылей сложных конфигураций построение 3D моделей необходимо выполнять по вспомогательным шаблонам или в системе геометрического моделирования.

Для создания эффективной работы прибылей необходимо постоянно контролировать зоны действия уже установленных прибылей. При этом установка холодильников также может изменять зоны действия прибылей и соответственно «карту дефицита питания отливки». Визуализация информации о зонах действия прибылей также построена на цветовой окраске поверхности отливки. На рис. 7 показана 3D модель отливки с построенной в ЛТС системой питания. Построение подобной системы питания с использованием ЛТС выполняется в считанные минуты. От технолога только требуется для каждого создаваемого объекта (прибыли или холодильника) указать, руководствуясь «картой дефицита питания отливки» и зонами действия уже установленных прибылей, место установки и выбрать из предлагаемого перечня желаемый вариант конфигурации. Окончание синтеза технологического решения происходит при достижении предельной величины «дефицита питания» или при достижении полного перекрытия тела отливки зонами действия прибылей, отображаемого в цветовой форме на поверхности отливки.

### Выводы

1. Программы моделирования процессов формирования отливки занимают важное место в технологической подготовке производства отливки. Они позволяют оптимизировать технологию до запуска отливки в производство. Но разработка начального варианта технологии, к сожалению, производится в настоящее время технологом без существенной компьютерной поддержки. Используются только системы геометрического моделирования для отображения технологического решения и последующая проверка работоспособности это-

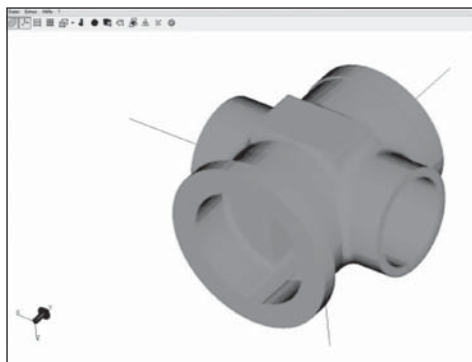


Рис. 5. 3D модель отливки



Рис. 6. Карта дефицита питания

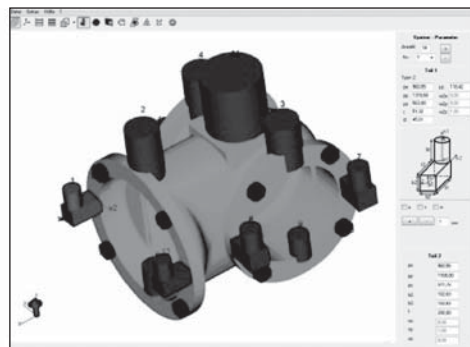


Рис. 7. Отливка с системой питания, синтезированной в модуле ЗР-CAST

го решения с помощью литейных моделирующих систем.

- Для создания полноценной интегрированной среды компьютерной разработки технологии отливки необходима система синтеза технологического решения, т.е. специализированная литейная технологическая система (ЛТС). К настоящему времени накоплен достаточный опыт и получены технические решения для создания такой системы. Существуют отдельные программы, реализующие некоторые функции синтеза технологического решения, например, программа RHOST.
- Технологические решения для разных видов и способов литья существенно рознятся. Поэтому целесообразно разрабатывать варианты литейной технологической системы для групп способов, имеющих определенную общность, например, гравитационное литье, охватывающее литье в песчаные формы, кокиль, по выплавляемым моделям и т.д.
- Для повышения технической и коммерческой эффективности использования литейной технологической системы целесообразно делать ее независимой от систем геометрического моделирования и литейных моделирующих систем. А взаимодействие с этими системами реализовывать через интерфейс обмена данными. В этом случае ЛТС будет вписываться в уже сложившиеся усло-

вия использования компьютерной поддержки технолога на предприятии без дополнительных затрат на новые компьютерные системы.

#### Список литературы

- Оборин Л.А., Черепанов А.И., Цветков А.Е., Коровин В.М., Поляков С.Н., Попков В.А. Интегрированный пакет программ «Компьютерный помощник технолога-литейщика» // Литейное производство. – 1991. – № 12. – С. 17–18.
- Хартман Р., Поляков С., Попков В., Коровин В., Бадиков Г., Койнов И., Мартин А. Многокритериальная оптимизация конструкций стальных отливок // Литейное производство. – 2000. – № 8. – С. 40–43.
- Hartmann R., Popkov V., Poliakov S. Rapid casting design for steel casting // Giessereiforschung. – 58(2006) N1. – С. 38–47.
- Bast J. Kotova Y. Using of the simulation system «PolygonSoft» for analysis of a temperature field of aluminum alloys. Freiburger Forschungshefte A 892, 2007, p. 107–113.
- Тихомиров М.Д. Сб. Компьютерный анализ литейной технологии: проблемы и перспективы / Материалы семинара 15–19 октября 2007. – СПб.: ЦНТИ «Прогресс», 2007, с. 20–29.
- Hahn I., Hartmann G. Automatic computerized optimization in die casting processes. Casting Plant & Technology 4/2008, 2–14.
- Melendez A., Anglada E. Tecniaia propone la segunda generacion en simulacion basada en la simulacion avanzada. FUNDI Press, Septiembre 2010, 27–28.
- Adi Sholapurwalla, Sam Scott. Foundry Rejects Old Conventional Approach of Trial and Error and Adopts Computer Simulation. Die Casting Engineer, Juli 2010, 38–41.

В.А. Кукарцев (СФУ, г. Красноярск, alex230348@mail.ru)

## Применение первоуральского кварцита в кислой футеровке для индукционных чугуноплавильных печей

Активное применение индукционных тигельных печей промышленной частоты для выплавки чугуна в нашей стране началось с середины 1960-х гг. В качестве футеровки в основном применяется состав из кварцита и борного ангидрида или борной кислоты. Кварциты, используемые для изготовления футеровки, должны удовлетворять следующим требованиям:

- минимальное содержание примесей, особенно слюды, сланца. Содержание SiO<sub>2</sub> в кварците должно быть не менее 97,5%;
- мелкозернистое строение;
- плотная структура;
- небольшое разрыхление при обжиге;
- медленная скорость перерождения полиморфных превращений кварца;
- достаточная огнеупорность (не ниже 1730°C).

Проведен анализ использования первоуральского кварцита для футеровки индукционных печей промышленной частоты при получении синтетического чугуна на стальном ломе. Приведены новые режимы прокаливания кварцита.

**Ключевые слова:** первоуральский кварцит, проковка.

\*\*\*

**Kukartsev V.A.** Application of firstural quartzite in acid fettling for the induction melting furnaces

The analysis of Pervouralsky quartzite use for lining-up of inductive kilns with commercial frequency in the process of synthetic cast iron production from steel breakage is carried out in this article. New regimes of quartzite baking are showed.

**Key words:** pervouralsky quartzite, baking.

Таблица 1. Марки кварцита, их применение

Обозначение марки	Наименование марки и ее применение
ПКМИ-1	Первоуральский кварцит, молотый для индукционных крупнотоннажных чугуноплавильных печей
ПКМИ-2	Первоуральский кварцит, молотый для индукционных чугуноплавильных и других печей
ПКМИ-3	Первоуральский кварцит, молотый для индукционных печей

Таблица 2. Физико-химические показатели кварцита

Наименование показателя	Норма для всех марок
Массовая доля, %:	
SiO <sub>2</sub> , не менее	97,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более	1,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , не более,	0,6
в том числе железа металлического, не более	0,3
Огнеупорность, °С, не ниже	1730

В нашей стране основное применение получил первоуральский кварцит (горы Караульной), который выпускается Первоуральским динасовым заводом. В соответствии с ТУ 1511-022-00190495-2003 завод выпускает кварцит с содержанием влаги не более 0,3% с поставкой в металлических оборотных контейнерах, а по согласованию сторон, – с содержанием влаги не более 3% с поставкой в мешках емкостью 800–1000 кг. В зависимости от зернового состава кварцит подразделяется на марки, указанные в табл. 1.

Кварцит по физико-химическим показателям отвечает требованиям, указанным в табл. 2.

Зерновой состав соответствует требованиям, указанным в табл. 3.

Более мелкий зерновой состав предназначен для тяжелых условий службы в печах большой вместимости (более 10 т). Кварцит, получаемый в мешках, при начальной влажности не более 3% транспортировался в полувагонах в течение 2–3-х недель и при его получении имел влажность выше 3%, что недопустимо при изготовлении футеровки. Ранее, когда кварцит поступал в полувагонах, навалом в сыром виде, применялась технология прокалики кварцита. Для этого в проектируемых литейных цехах предусматривались тер-

мические печи. Прокалка велась при температуре 700–800°С в течение 6–8 ч, при этом происходил переход β-кварца в более легкие модификации с увеличением объема, что компенсировало усадку футеровки при спекании.

В 2003–2004 гг. на печах ИЧТ-1 в литейном производстве Сибирского инструментального завода участились случаи преждевременного выхода футеровки из строя (стойкость уменьшилась на порядок). Проведенная проверка кварцита на его соответствие показала, что он соответствует марке ПКМИ-2 по всем показателям, указанным в ТУ 1511-022-00190495-2003. Никаких нарушений в технологии подготовки кварцита, изготовления футеровки, плавки и технической эксплуатации оборудования обнаружено не было. Проверка кварцита на повышенное содержание в нем зерен крупнокристаллического жильного быстроперерождающегося кварца, приводящего к значительным объемным изменениям при модификационных превращениях кварца, также ничего не дала, так как его содержание не превышало 25%.

Затем при прокалке очередной партии кварцита по существующей технологии было обращено внимание на изменение его цвета: кварцит приобретал красноватый оттенок и футеровка, изготовленная из такого кварцита, быстро выходила из строя. Наши обращения в службу контроля качества на Первоуральском заводе закончились ничем: кварцит соответствует ТУ.

Было решено провести лабораторные исследования таким образом, чтобы избежать изменения его цвета. В результате был подобран режим прокалки, который позволял получить необходимую влажность без изменения его цвета (табл. 4).

Внедрение этого режима прокалки кварцита дало положительный эффект – стойкость футеровки вернулась к прежним показателям.

#### Список литературы

1. Сасса В.С. Футеровка индукционных электропечей. – М.: Металлургия, 1989.
2. ТУ 1511-022-00190495-2003. Кварцит молотый Первоуральский для тиглей индукционных печей.

Таблица 3. Зерновой состав кварцитов

Наименование показателя	Норма для марки		
	ПКМИ-1	ПКМИ-2	ПКМИ-3
Зерновой состав, массовая доля: остаток на сетке №2, в том числе,	6–13	8–14	6–13
остаток на сетке №3,2, не более	5	5	5
проход через сетку №0,5, в том числе	52–59	46–51	50–59
проход через сетку №01	33–39	27–32	31–41

Таблица 4. Режим прокалки кварцита

Марка кварцита	Температура прокалки, °С	Время выдержки, ч	Влажность, %	Состояние цвета
ПКМИ-2	250	12	<0,3	Не меняется