



МАТЕРИАЛЫ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОГО
СЕМИНАРА

**«Новые подходы к подготовке производства
в современной литейной промышленности».
17-19 мая 2004 г.**

ООО «Фокад»
Санкт-Петербург
2004

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
<i>АБРАМОВ А.А.</i> История и развитие литейных материалов и технологий в «ЦНИИМ» - «ЦНИИМ-ИНВЕСТ» - «ФОКАД»	5
<i>САБИРОВ Д.Х.</i> Компьютерные технологии в литейном производстве	8
<i>ТИХОМИРОВ М.Д.</i> Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов....	13
<i>ТИХОМИРОВ М.Д., БРОЙТМАН О.А.</i> Система компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон»	28
<i>ТИХОМИРОВ М.Д., ЕРМАКОВА С.В.</i> Обоснование выбора литейной моделирующей программы.....	37
<i>РЯБИНСКИЙ Ю.Б.</i> Применение системы автоматизированного моделирования литейных процессов «Полигон» при освоении изготовления литых деталей ГТД	42
<i>УСТИНОВ А.Г., КАЛАЕВ В.В.</i> Сквозное проектирование отливок с применением систем математического моделирования на ОАО «АВТОВАЗ»	54
<i>МОЛЧАНЮК Р.А.</i> Применение системы компьютерного моделирования «Полигон» на ЗАО "РУСТ-95".	60
<i>ЖЕГЛОВ С.К.</i> Моделирование процесса затвердевания корпусной отливки.	63
<i>МАКСИМОВА Н.В.</i> О внедрении САМ ЛП «Полигон» на ОАО «ТМЗ».....	68

<i>АБРАМОВ А.А.</i> Литейные алюминиевые сплавы и технология получения из них качественных отливок	76
<i>ДЕНИСОВ Л.Ю.</i> Современный подход к изготовлению литейной оснастки.	85
<i>ГЛЕБОВ С.М.</i> Низкотемпературная формовка – процесс изготовления керамических литейных форм и стержней замораживанием водных вяжущих суспензий (шликеров).	88
<i>КУЗНЕЦОВ В.П.</i> Технологические особенности литья методом вакуумной формовки.	94
<i>ГОРДЕЕВ С.К.</i> Новые металлокерамические композиционные материалы	97
<i>ШЕМОНАЕВА Г.А.</i> Литейные высокопрочные материалы. технологические процессы изготовления отливок.	105
<i>РЕБОНЕН В.Н.</i> Изготовление отливок по газифицируемым моделям.....	109
<i>ПИРАЙНЕН В.Ю.</i> Особенности и достижения художественного литья с.петербурга.....	112
<i>ДМИТРИЕВ Э.А.</i> Опыт использования системы компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон» в учебном процессе	116

Введение

Компьютерные технологии в литейном производстве последние два десятилетия получили широкое распространение не только за рубежом, но и на многих предприятиях России. Прежде всего, это относится к компьютерному моделированию литейных процессов.

Фирма «Фокад» занимается компьютерным моделированием литейных процессов 15 лет; продуктом фирмы является система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон», занимающая лидирующее положение на российском рынке. СКМ ЛП «Полигон» постоянно совершенствуется, расширяются возможности системы, добавляются новые модули, накапливается опыт сотрудничества с литейными заводами и цехами, а также с литейными кафедрами высших учебных заведений. В связи с этим разработчики СКМ ЛП «Полигон» приняли решение провести в мае 2004 года семинар для обмена опытом.

В настоящем сборнике приведены статьи не только разработчиков СКМ ЛП «Полигон», но и пользователей, что существенно расширяет информацию о системе и делает ее более объективной.

Вторым направлением компьютеризации литейного производства является технология изготовления литейной оснастки с использованием САД-систем и станков с ЧПУ. Это направление в России пока не получило широкого распространения, по-видимому, прежде всего из-за отсутствия на небольших литейных предприятиях и цехах необходимых специалистов. В связи с этим, по нашему мнению, еще достаточно долго с использованием компьютерной технологии оснастка будет изготавливаться на специализированных фирмах. Именно такой специализированной фирмой является ООО «Фокад», представившая в настоящем сборнике обобщающую статью на эту тему.

Наконец, третий блок статей посвящен некоторым новым литейным материалам, экологически чистым литейным технологиям, таким как вакуум-плenoчная и низкотемпературная формовка, и особенностям изготовления художественных отливок. С этой серией статей выступили специалисты ООО «ЦНИИМ-ИНВЕСТ» и ФГУП «ЦНИИМ».

**ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ ЛИТЕЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ТЕХНОЛОГИЙ В «ЦНИИМ» - «ЦНИИМ-ИНВЕСТ» - «ФОКАД»**
Абрамов А.А, д.т.н. (ФГУП ЦНИИМ)

1. Краткая история института

Центральный научно-исследовательский институт материалов, образованный в 1912 году, в 2002 году отметил свое 90-летие. Институт организован военным ведомством России и является старейшим материаловедческим институтом в России.

С 1920 по 1933 годы институт был Центральным институтом металлов. Руководили и работали в институте академики-металлурги Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, А.А. Байков, М.А. Павлов, Н.Т. Гудцов, М.М. Карнаухов.

Сотрудники института стояли у истоков отечественной большой металлургии и участвовали в создании отечественного производства ферросплавов, производства никеля на Кольском полуострове, производства алюминия на Украине и в России, производства чугуна в крупных доменных печах, отечественного производства огнеупоров и др.

2. Литейная лаборатория до войны

В это же время была создана литейная лаборатория. Первым начальником лаборатории был профессор Петр Петрович Берг.

До войны лаборатория в основном занималась разработкой и внедрением в промышленности формовочных и стержневых смесей, технологии и оборудования для изготовления форм и стержней, изучением литейных свойств чугунов и сталей. Начиная с 1936 года, были развернуты работы по центробежному литью крупногабаритных артиллерийских стволов, а также по литью под давлением цветных сплавов.

3. Разработки литейщиков после войны

Расцвет деятельности литейщиков института пришелся на послевоенный период, когда в стране начало энергично развиваться ракетостроение и атомная энергетика.

Особенность института состояла в том, что специалистами выполнялся весь цикл освоения отливок из новых материалов, а именно - разработка самого материала, разработка технологии изготовления отливок на собственном опытном производстве, проектирование и изготовления оборудования для реализации технологии, выпуск всей необходимой нормативно-технической документации, внедрение техноло-

гии на заводе, сопровождение технологии в течение всего ее жизненного цикла.

Специалистами института в этот период было создано более 60-и новых марок литейных материалов, создана гамма уникального оборудования для оснащения литейных цехов и участков.

Основные из этих разработок следующие:

- серия высокопрочных технологичных марок сталей с уровнем прочности 1300-1950 МПа;
- жаропрочные сплавы на никелевой и железной основе и вакуумная индукционная центробежная установка ВИЦУ-125 для изготовления элементов ЖРД;
- высокопрочные свариваемые алюминий-магниево-магниевые сплавы, в том числе дополнительно легированные цинком и литием, и технология жидкой штамповки для изготовления ответственных отливок;
- литейные титановые сплавы с уровнем прочности до 1080 МПа и вакуумно-компрессионная центробежная установка ВКЦУ-30;
- литейные материалы на основе тугоплавких металлов (W и Mo) и уникальная литейная дуговая вакуумная гарнисажная печь ДВГП-2 для изготовления отливок из этих материалов, работоспособных до температуры 2200°C;
- технология и автоматизированные линии точного чугунного литья в облицованный кокиль.

В это время в институте работали все известные ученые-литейщики профессора Ю.А. Нехендзи, Н.Г. Гиршович, Б.Б. Гуляев, Н.Н. Белоусов, И.А. Шапранов, Ю.Ф. Боровский, а также менее известные по открытым публикациям профессора О.Н. Магницкий, Е.И. Пряхин, Г.П. Анастасиади, Л.М. Постнов, В.П. Кузнецов. Многие из перечисленных ученых продолжили свой творческий путь в высших учебных заведениях, возглавляя литейные кафедры или являясь ведущими профессорами кафедр.

Едва ли еще в каком-либо институте работала такая славная плеяда ученых литейщиков.

4. Новые технологии

Начиная с 1975 года в институте начинает развиваться направление экологически безопасных литейных технологий - вакуум-пленочной и низкотемпературной формовки.

Особенно успешно развивалась вакуум-пленочная формовка (ВПФ). Конструкторами института совместно с технологами создан ряд установок ВПФ с размером опок от 450x350x150 до 3600x1600x600. Освоена технология литья методом ВПФ стали, чугуна, алюминиевых сплавов, бронзы и латуни. Освоен процесс ли-

тя с холодильниками уникальных крупногабаритных зеркал из размерностабильных алюминиевых сплавов.

По методу ВПФ в сборнике имеется отдельная статья.

В институте разработан новый экологически безопасный ресурсосберегающий литейный процесс - низкотемпературная формовка (НТФ), о сути которого и имеющемся уже опыте изложено в статье С.М. Глебова.

Наконец, начиная с 1989 года в институте начало развиваться компьютерное моделирование литейных процессов, которое оказалось довольно плодотворным научным направлением и которому посвящено несколько статей.

5. Конверсия и перестройка

Изменение военной доктрины, конверсия военного производства, уменьшение оборонного заказа и резкое снижение бюджетного финансирования НИОКР существенно отразилось на деятельности литейщиков института. Тот громадный задел, который был сделан в предшествующие годы, до сих пор до конца еще не использован конструкторскими организациями и заводами. В некоторых случаях применение новых материалов привело к замене литых металлических заготовок на полимерные или углерод-углеродные. Например, замена литого вольфрама в ракетных двигателях на псевдосплавы и углерод-углеродные материалы привело к полному сворачиванию работ по литью тугоплавких металлов.

Попытки быстро выйти с качественными литейными сплавами и технологиями на рынок окончились неудачей, т.к. эти сплавы и технологии хоть и обеспечивают высокую надежность систем вооружения, но достаточно дороги для гражданских отраслей промышленности. Конечно, они в свое время найдут применение и в гражданских отраслях и этому есть отдельные примеры.

В аналогичной ситуации оказались и литейные лаборатории других научно-исследовательских институтов.

Литейщики института долго и мучительно искали выход из создавшегося положения и, в конце концов, чтобы окончательно не затеряться в условиях рыночных отношений, создали малые предприятия ООО «Фокад» и ОАО «ЦНИИМ-Инвест».

ООО «Фокад» развивает компьютерные технологии в литейных производствах, ОАО «ЦНИИМ-Инвест» продвигает экологически безопасные литейные технологии.

Осталась группа литейщиков и конструкторов также в институте, поэтому в сборнике имеется статья начальника литейной лаборатории института Шемонаевой ГА.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.

Сабиров Д.Х. (ООО «Фокад»)

Все действующие в настоящее время современные промышленные предприятия находятся в условиях жестокой конкуренции и постоянного давления рынка. Те предприятия, которые хотят выжить должны выпускать продукцию дешевле и быстрее конкурентов. Однако при этом не должно происходить снижения качества товаров. Это все азбучные истины, которые на предприятии знают все. Может быть, не все стремятся им следовать, но знают все.

В этом направлении большую помощь оказывают предприятиям компьютерные технологии, которые получили гигантский скачок. Сквозное проектирование, роботизированные линии, станки с ЧПУ, системы объемного моделирования и многое другое позволяют предприятиям снижать себестоимость и увеличивать производительность труда.

Однако с точки зрения внедрения достижений современной науки и технологии литейное производство стоит далеко не на первом месте. Это, несмотря на то что, на многих предприятиях литейное производство как заготовительное задает ритм работы всего предприятия. Тем не менее, с каждым годом все большее количество литейных производств оснащается новой техникой и программными продуктами.

Для работы в этом направлении многие предприятия имеют стратегические планы развития, увязывающие между собой различные вопросы создания, передачи и обработки информации. Но многие, в основном небольшие предприятия только вступают на этот путь и не имеют опыта внедрения компьютерных технологий в литейном производстве. Наши специалисты в процессе создания и внедрения системы автоматизированного моделирования литейных процессов ПОЛИГОН приобрели опыт использования различных систем в подготовке производства. Кроме того, сейчас мы занимаемся проектированием и изготовлением литейной оснастки. Это расширило наши знания в области использования компьютерных технологий в литейном производстве. Мы убедились, что эта область применения имеет некоторые особенности. Хотелось бы эти вопросы обсудить.

В данном докладе рассматриваются некоторые вопросы применения компьютерных технологий в литейном производстве. Однако мы рассмотрим применение компьютерных технологий только в подготовке производства. Здесь не рассматриваются аспекты применения различных автоматизированных комплексов, контрольно-

измерительных машин, передача данных, использование компьютеров в секретарской деятельности.

Основные принципы информационного обмена в литейном производстве представлены на рисунке 1. Условно выделим три подразделения: заказчик, литейное производство, инструментальное производство. Организационно под этими названиями могут скрываться совсем разные подразделения. Заказчик может быть и внешним и внутренним. Инструментальное производство тоже может быть не инструментальным, а модельным и быть фактически подразделением литейного производства. Функции синтеза и анализа технологии могут выполнять другие подразделения предприятия и даже партнеры вне предприятия.

В общем случае исходной информацией для литейного производства является геометрическая информация об изготавливаемой детали, технические требования, материал. Эта информация может поступать в виде чертежа детали. В некоторых случаях это может быть чертеж отливки, если заказчик уже имеет информацию об отливке. Довольно часто геометрическая информация об отливке или детали поступает в виде объемной геометрической модели. Здесь следует остановиться вот на каком моменте. Довольно часто заказчик и литейное производство имеют разные CAD системы. В связи с этим геометрическая информация передается через общеупотребительные форматы IGES, PARASOLID, STEP и др. В связи с этим могут возникать искажения геометрической модели. Кроме того, при этом теряется параметризация геометрической модели, которая присутствует во многих современных системах объемного моделирования. Особенно часто это возникает в случаях с внешним заказчиком, но иногда и внутри одного предприятия используется несколько различных CAD систем. Кроме того необходимо отметить что чертежи кроме бумажной формы могут передаваться в электронном виде. Тем не менее, это только чертеж, а для дальнейшей успешной работы необходима объемная модель.



Так или иначе, эта объемная трехмерная модель отливки должна быть подготовлена в имеющейся в литейном производстве CAD системе. Затем должен быть произведен синтез литейной технологии. Системы синтеза технологии в качестве конечного результата выдают различные технологические, в том числе и геометрические параметры проектируемой технологии. Программ синтеза технологии крайне мало и они редко используются на предприятиях. Это либо разработанные для конкретного предприятия системы генерации и хранения технологической информации, либо какие то части PDM систем. PDM (Projects Data Manager) система – система управления проектами. Это система обычно охватывающее множество рабочих мест, помогающая технологом и конструкторам работать в одном информационном поле. Некоторые части PDM систем помогают технологу составить технологическую маршрутную карту и работать с ней. Систем реально синтезирующих технологические параметры в настоящий момент не существует. Обычно синтез технологии осуществляет технолог, используя свой опыт, различные справочники, РТМы, ГОСТы.

Синтезированную, т.е. вновь полученную технологию проверяют в системе анализа технологии или моделирующей системе. Технологию в этом смысле следует рассматривать как геометрическую модель отливки и набор технологических параметров. Система моделирования литейных процессов получает на входе необходимую геометрическую и технологическую информацию, а на выходе дает информацию о том, как протекают различные процессы и о месте расположения различных дефектов. Если по результатам моделирования технолог считает, что технология годная, ее отправляют в производство. В противном случае, анализируя полученные дефекты и процессы их возникновения, технолог изменяет литейную технологию и вновь проводит моделирование. Эти изменения могут выражаться в виде редактирования объемной модели, либо в виде изменения технологических параметров. Эти итерации проводятся до получения годной технологии.

После получения годной технологии геометрическая модель годной отливки отправляется в инструментальное производство. При передаче геометрической информации в этом случае могут возникать такие же проблемы, как и те о которых упоминалось выше.

Так выглядят информационные потоки в литейном производстве в общем виде. Теперь о программах используемых в литейном производстве. Ключевую роль, конечно, играет CAD система, поскольку геометрическая модель деталь/отливка/оснастка используется

на всех стадиях производства. Сейчас существуют около десятка различных систем, отличающихся по стоимости, набору модулей, поддержке и пр. Однако для литейного производства обычного машиностроительного предприятия достаточно системы среднего уровня, таких как SolidWorks, SolidEdge и т.д. Эти программы обладают достаточной функциональностью при среднем уровне цен.

Как уже упоминалось программ синтеза технологии крайне мало. Из PDM систем или приравненных к ним можно упомянуть WindChill от фирмы PTC, Компас-автопроект от Аскон. Из программ что то делающих с геометрической моделью известна только одна. Это САПР «Отливка» разработанная в фирме ЛИТАФОРМ (Москва). САПР «Отливка» это надстройка над российской CAD системой T-FLEX и позволяющая и помогающая технологу в интерактивном режиме назначать припуска, уклоны и другие технологические изменения в геометрии. Работает она только в двумерной части T-FLEX.

Моделирующие системы на российском рынке представлены несколькими системами. Российские – это ПОЛИГОН и LVM-FLOW, зарубежные – ProCAST, Magmasoft, SIMTEC. Этим системам будут посвящены еще несколько докладов.

Отдельно стоит упомянуть системы генерации расчетной сетки. Для расчета любой системе анализа требуется дискретизировать расчетную область, т.е. разбить ее на элементы простой формы. Это могут быть одинаковые параллелепипеды для метода конечных разностей (МКР) или более сложные элементы для метода конечных элементов (МКЭ). Программы, использующие МКР, обычно получают сетку самостоятельно в силу простоты алгоритмов получения. А вот программы, использующие МКЭ, чаще получают сетку из специализированных программ – генераторов КЭ сетки. Эти программы, несмотря на их сложность, являются вспомогательными для литейного производства, т.к. они не генерируют новой полезной информации для литейщика, а преобразуют один вид представления геометрической модели в другой. Таких систем несколько, от самых простых “GID” до сложных типа “FEMAP”, “HyperMesh”. Кроме того, некоторые CAD системы, такие как Unigraphics, CATIA, Pro/Engineer имеют встроенные модули по генерации КЭ сетки.

Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов

Тихомиров М.Д. (ООО «Фокад»)

В Европе, Англии и США в настоящее время наиболее распространены две литейные моделирующие системы: **ProCast** (разработчики в США и Швейцарии) и **MagmaSoft** (разработчики в Германии). По данным производителей на каждую из этих систем за период около 10 лет было приобретено не менее чем 400-500 лицензий по всему миру. (В рекламных данных от MagmaSoft декларируется не менее 800 пользователей, однако вероятнее всего к «пользователями» в данном случае «приплюсованы» обновления лицензий и т.п.) В Европе более популярна система MagmaSoft, в США более популярна система ProCast. Кроме того, определенный сегмент рынка в Европе занимают системы WinCast (ранее называлась Simtec, разработчики в Германии, часть из них ранее участвовали в разработке MagmaSoft) и NovaFlow (ранее называлась LBM-3D, на западе распространяется шведской фирмой NovaCast, однако разработчики российские и на отечественном рынке эта система имеет название LVMFlow). Более подробно характеристики ProCast и MagmaSoft будут описаны ниже, что же касается WinCast, то следует упомянуть следующее. Несмотря на то, что в WinCast имеются определенные упрощения при решении таких основных литейных задач, как тепловая (затвердевание) и осадочно-фильтрационная (образование микропористости, макропористости и раковин), тем не менее, в WinCast на достаточно высоком уровне моделируются деформационные процессы в процессе охлаждения отливки, что для ряда литейных производств может быть весьма привлекательным. Причем, в отличие, например, от MagmaSoft, использующей устаревшие разностные методы (т.н. метод конечных разностей), численные решения в WinCast (как и в ProCast) проводятся на базе современного и гораздо более адекватного метода конечных элементов.

В России и СНГ лидером по распространенности является **Полигон** (разработчики в России) - за период около 10 лет на эту систему приобретено более чем 50 лицензий (не считая временных лицензий), в т.ч. в Германии и Южной Корее. В частности, только за 2003 год – было приобретено более чем полтора десятка постоянных и временных лицензий в странах СНГ. Это в т.ч. и те предприятия, которые объявляли тендеры (основные участники таких тендеров - Полигон, ProCast, MagmaSoft), а также предприятия, которые ранее приобретали MagmaSoft, LBM-3D и др. системы, однако в дальнейшем заменили их на Полигон в качестве базовой моделирующей системы. В России ко-

личество лицензий на Полигон превышает все остальные литейные системы вместе взятые, включая ProCast, MagmaSoft и другие менее известные. Для примера - ProCast и MagmaSoft вместе за 10 лет в России и СНГ поставили не более десятка лицензий (около 5-6 у MagmaSoft и 3-4 у ProCast), причем большая часть из них – временные и в настоящее время не используются. В России второе место по распространенности после Полигона в настоящее время видимо занимает LVMFlow (как указывалось выше, ранее назывался LBM-3D, разработчики в России). Более подробно характеристики Полигона будут описаны ниже, относительно же LVMFlow необходимо отметить следующее. В конце 80-ых годов в России/СССР пакет LBM-3D был наиболее известным отечественным литейным пакетом и это вполне заслужено, т.к. на тот момент это был единственный отечественный трехмерный пакет для моделирования литейных процессов. В начале 90-ых годов это лидерство было по объективным причинам утеряно. В отличие от Полигона, который использует адекватные и современные конечно-элементные алгоритмы (как, например, ProCast), система LVMFlow использует относительно устаревший и неточный метод конечных разностей (как, например, MagmaSoft). Однако, несмотря на все недостатки конечных разностей, LVMFlow может вполне адекватно применяться для моделирования литья в малотеплопроводные разовые формы. По таким показателям, как скорость расчетов, удобство интерфейса и некоторым другим важным параметрам, LVMFlow вполне может составлять конкуренцию любым разностным западным пакетам, хотя конечно конечно-элементные пакеты типа ProCast или Полигон объективно имеют более широкий круг применимости по сложности геометрии отливок и способам литья.

Перед тем, как дать более подробную характеристику системам Полигон, ProCast и MagmaSoft, имеет смысл дать некоторые пояснения относительно упомянутых выше методов расчета – методе **конечных разностей** и методе **конечных элементов**. Эти методы серьезно различаются по достоверности решения. Как уже упоминалось выше, Полигон и ProCast используют метод конечных элементов, а MagmaSoft метод конечных разностей. Метод конечных разностей разработан достаточно давно и, несмотря на определенные недостатки при решении граничных задач теории поля, первые успехи численного моделирования с применением вычислительной техники связаны именно с ним. Метод конечных элементов более молодой, более математизированный и содержит гораздо меньше упрощений. Он начал разрабатываться американскими исследователями для решения деформационных задач в космической области, впервые опубликован

ими в 1950 году и затем получил широкое распространение для всех задач теории поля – тепловой, электродинамической, фильтрационной, диффузионной и т.д. Для внешнего наблюдателя эти методы отличаются по представлению геометрии – при разностном методе геометрия представлена «кирпичиками» (параллелепипедами), а при элементном методе используется достаточно гладкая сетка конечных элементов (чаще всего тетраэдров) произвольных размеров и конфигурации. Не всегда это отличие видно в явном виде, т.к. при визуализации не обязательно выводить явно искаженную «кирпичную» геометрию на пользователя, можно проводить визуализацию разностного решения и на гладких поверхностных сетках исходных геометрических моделей, так чтобы «кирпичики» не было видно. Например, в последних версиях MagmaSoft «кирпичная» разностная геометрия скрыта от пользователя, хотя в предыдущих версиях она визуализировалась в явном виде. Однако, дело в основном не во внешнем виде моделируемой отливки, а в существенной разнице в основных постулатах этих методов и, как следствие, в разной достоверности решения. Метод конечных элементов, помимо более точного описания геометрии, в силу принципиально более сложного и адекватного математического аппарата, более точно описывает и процессы, происходящие в рассматриваемой геометрической модели. При моделировании литейных процессов разностные и элементные методы могут иметь существенные отличия в адекватности решения. Следует отметить, что в настоящее время практически все универсальные (не литейные) моделирующие пакеты, такие как ANSYS, Nastran, Patran и т.д. давно отказались от устаревшего метода конечных разностей и используют только метод конечных элементов. По этому же пути пошли наиболее продвинутые литейные пакеты, такие как ProCast, WinCast, Полигон. Дело в том, что разностные методы плохо подходят для сложных геометрий в задачах с существенным влиянием граничных потоков. Для условий литья это означает, что разностные методы могут более-менее адекватно использоваться при литье в малотеплопроводные разовые формы, когда нет скачка моделируемой функции (например, температуры) на границе «отливка-форма». При литье в кокиль, ЛПД, ЛНД и т.п. (особенно при сложных фасонных геометриях) разностные методы всегда будут давать принципиальную систематическую погрешность, которая отсутствует в конечно-элементных методах. Например, для литья тела типа «цилиндр» в холодный кокиль по времени затвердевания разностное решение даст ошибку примерно в 20-30% (в зависимости от начальных температур, свойств сплава и теплопроводности материала кокиля). Это легко устанавливаемый факт, известный вероятно любому непред-

взятому специалисту по численным методам – достаточно проверить соотношение объема и теплоотводящей поверхности при разностном представлении геометрии. Например, площадь поверхности шара в разностном представлении не в зависимости от густоты разностной сетки всегда будет равна площади поверхности куба того же габарита, т.к. все поверхности «разностного шара» будут представлены ортогональными «квадратиками». Помимо этого, элементные методы менее ресурсоемкие и более скоростные, чем разностные. Например, для геометрий типа «куб» оба метода дадут одинаковое решение, но метод конечных элементов при требовании равной адекватности с разностным методом, всегда потребует примерно на порядок меньше вычислительных ресурсов и время расчета будет в несколько раз меньше. Фактически применение разностных методов в моделировании литейных процессов сейчас оправдано только для решения гидродинамических задач при заливке, т.к. величины и направления векторов скоростей меняются с большей дискретностью, чем это можно описать конечно-элементной сеткой без потери преимуществ конечно-элементного метода по скорости расчета. В наиболее «сильных» литейных пакетах, таких как Полигон и ProCast, все основные литейные задачи решаются на базе метода конечных элементов, а специально для гидродинамических задач используется либо собственно метод конечных разностей, либо т.н. «промежуточные» методы (в частности, в Полигоне для гидродинамики используется метод конечных объемов). Часто при этом, визуализация «условно-разностного» решения в таких «базово-элементных» пакетах проводится на конечно-элементной сетке, что быстрее и удобнее. (Это иногда вводит в заблуждение дилеров, плохо знакомых с особенностями моделирования литейных процессов.) Однако, как уже говорилось, такие «разностные отступления» оправданы только в гидродинамических ветвях расчета. То, что в части литейных пакетов до сих пор используются (и пропагандируется дилерами) разностный метод как основной метод расчета, свидетельствует о достаточно обидном факте - наблюдается очевидное отставание среднего уровня пользователя литейного пакета от среднего уровня «прочниста», «деформатора» и т.п. Причем как у нас, так и на западе. Вряд ли специалиста по деформационным процессам (западного или отечественного) сейчас можно было бы убедить купить разностный пакет, каким бы солидным имиджевым капиталом этот пакет ни обладал. Более подробно о соотношении результатов разностных и элементных решений при моделировании тепловых задач в литейной постановке см. [1].

MagmaSoft - немецкий моделирующий пакет, базирующийся

на методе конечных разностей, один из первых коммерческих литейных пакетов, фактически впервые продемонстрировавший, что возможно всерьез моделировать сложные литейные процессы на достаточно высоком уровне. В этом смысле система MagmaSoft имеет заслуженную и прочную положительную репутацию. Численными методами в MagmaSoft решаются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы. Также численно решается задача прогноза макропористости и раковин, хотя используемые при этом модели носят явно упрощенный характер, не отражающий современные представления о сложном и динамическом характере структурированности сплавов в интервале затвердевания. Прогноз микропористости, структурных, механических и других характеристик отливки проводится на уровне критериального анализа. (Критериальный анализ предполагает обработку базовых полей рассчитанных численными методами с помощью относительно простых критериев.) В целом, MagmaSoft более распространена в Европе, однако для наиболее ответственных литейных технологий (типа литья лопаток для турбин самолетов и др. отливок ответственного назначения) в США и Европе применяют в основном ProCast. Это связано с отставанием математических алгоритмов и физических моделей, применяемых в MagmaSoft от аналогичных алгоритмов и моделей в ProCast. К наиболее сильным сторонам MagmaSoft имеет смысл отнести достаточно большое количество "вшитых" критериев, которые на уровне критериального анализа позволяют прогнозировать различные полезные свойства - структуру, механические характеристики и т.д. Кроме того, разработчики пакета большое внимание уделяют экспериментальной работе, определению различных «настроечных» коэффициентов для различных способов литья, сплавов и материалов, которые в скрытом виде интегрируют в систему, что позволяет в некоторой мере компенсировать упрощенность моделей и алгоритмов. Для типовых случаев это облегчает задачи моделирования, хотя затрудняет решение для проблемных отливок.

MagmaSoft имеет собственный хорошо развитый генератор разностных сеток. Как и во всех разностных пакетах, в MagmaSoft генерация расчетной разностной геометрической модели для пользователя не представляет особых затруднений, если исходная геометрия относительно несложна или пользователь не озабочен точным соблюдением соотношений толщин различных «стенок» и достаточным количеством разностных элементов по толщине «стенок». В общем случае ошибка по толщине «стенки» равна локальному шагу сетки. Для сложных геометрий достаточное количество разностных элементов в «стенке» чаще всего просто недостижимо в силу ограниченности вы-

числительных ресурсов. Как показано в [1], количество разностных элементов для адекватного описания температурного распределения должно быть не менее десятка по любой толщине. Для сложной фасонной геометрии, особенно при наличии литейных уклонов и напусков (обычно около 3 градусов) учет всех важных геометрических соотношений в MagmaSoft становится практически невозможным, однако это не недостаток реализации, а просто особенность разностного описания геометрии.

К недостаткам этой системы относятся "закрытый" характер используемых критериев и невозможность их редактировать, настраивать и дополнять, что существенно снижает возможность их адекватного применения. Дело в том, что в отличие от численных решений, критериальный анализ хорошо работает только в достаточно узких пределах, для которых выведен данный критерий и подобранные эмпирические коэффициенты в нем. Для использования некоторого критерия в других производственных условиях необходима его адаптация, которая в MagmaSoft чаще всего практически невозможна, как и невозможно определить, что данный критерий учитывает и от каких технологических параметров зависит. Примерно то же самое относится и к задаваемым начальным условиям – они во многом закрыты от пользователя и их «подстройка» происходит на уровне назначения способа литья и т.п. наиболее общих характеристик, которые не отражают реальный возможный разброс параметров в пределах одного и того же способа литья. Такой подход хорошо подходит для «хорошо настроенных» устойчивых типовых производствах. Однако, поскольку достаточно сложно определить на какие именно параметры производства ориентировались разработчики, соответственно и результаты расчетов часто носят весьма условный характер. К самым большим недостаткам MagmaSoft следует отнести разностный метод расчета, который плохо приспособлен для литья в кокиль, очень плохо подходит для литья тонкостенных отливок типа лопаток, весьма проблематичен для сложных фасонных отливок типа блоки цилиндров и т.п., хотя, разумеется, примеры подобных расчетов дилеры и производители MagmaSoft с удовольствием демонстрируют. Правда, при этом никогда не приводят сравнения результатов базового теплового расчета с решениями в конечно-элементных пакетах даже для относительно простых конфигураций.

В целом MagmaSoft можно отнести к системе «среднего» класса, ориентированную на решение относительно типовых задач при ограниченном наборе адекватно учитываемых факторов. Если отвлечься от цены, то можно было бы рекомендовать MagmaSoft к при-

менению в широком диапазоне литейных производств в качестве надежного, проверенного пакета «среднего» уровня, естественно, исключая усложненные специальные способы литья, «проблемные» технологии и геометрии повышенной сложности. Однако в настоящее время MagmaSoft является едва ли не самым дорогим литейным пакетом. С учетом соотношения «цена/возможности» в качестве литейного пакета «среднего» уровня более выигрышно выглядит, например, LVMFlow. Высокая цена и высокий имиджевый капитал системы MagmaSoft часто вводят в заблуждение и создают впечатление, что MagmaSoft - это т.н. «тяжелый» пакет, ориентированный на решение задач любой сложности. Более того, некоторые дилеры, не обладая достаточными литейными знаниями, опытом моделирования и необходимыми представлениями об алгоритмах и моделях пакета, который продают, часто позиционируют MagmaSoft как «тяжелый» пакет. В результате этого на некоторых заводах складывается негативное отношение к этому пакету, т.к. он не оправдывает завышенных ожиданий. Вряд ли в этом стоит винить саму систему, просто имеет смысл более взвешенно подходить к процессу внедрения, аналогичная ситуация может возникнуть и с действительно «тяжелым» пакетом, если недостаточна квалификация пользователей. При всем этом, для тех производств, где реальную технологическую поддержку смогут обеспечить непосредственно сами разработчики MagmaSoft, которые научат правильно интерпретировать результаты расчетов с учетом погрешностей, смогут «открыть» в явном виде необъявленные используемые модели и параметры, а также обеспечат их коррекцию, эту систему можно будет использовать и для достаточно проблемных задач, фактически в качестве базового «тяжелого» пакета даже в тех случаях, где разностные методы сами по себе уступают элементным. В этом случае, конечно, понадобятся пользователи с достаточно высокой профессиональной подготовкой, хорошо знакомые как с физикой литейных процессов, так и с технологическими особенностями своего литейного производства.

Представленный выше анализ возможностей по использованию пакета MagmaSoft отражает не только материалы, предоставляемые разработчиками этого пакета, но и многолетний опыт моделирования на различных литейных пакетах при разработке реальных технологий, а также их поддержки, внедрения и проведения обучения, в т.ч. и проведение обучения работе с MagmaSoft.

ProCast – американский конечно-элементный пакет (в настоящее время часть разработчиков в Швейцарии), по объективным показателям более мощный, чем MagmaSoft, т.к. помимо собственно преимуществ элементного подхода, в ProCast используются более

сложные и физически-универсальные модели, что существенно повышает адекватность расчетов. В ProCast численными методами моделируются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы, а также процессы структурообразования (кристаллизационные процессы). Критериальный анализ в ProCast представлен достаточно слабо, что, судя по всему, связано с принципиальной позицией разработчиков. Вероятно в тех случаях, когда разработчики ProCast считают ту или иную модель недостаточно проработанной на физическом уровне для того, чтобы ее можно было использовать в численных расчетах, они просто отказываются от ее реализации, считая, что средства критериального анализа не обеспечивают должной адекватности. Возможность проводить в ProCast численные расчеты кристаллизационных процессов весьма привлекательна для тех производств, где существенное значение имеют параметры структуры отливки. Это в первую очередь лопаточные производства, где существуют жесткие требования по этим параметрам. Для сравнения – и MagmaSoft, и Полигон для прогноза структурных параметров используют не численный расчет, а критериальный анализ, который в общем случае конечно менее достоверен. Хотя в защиту критериального подхода можно отметить, что при прогнозе структуры не требуется такой серьезной подготовки пользователя в области теории кристаллизации, как при численном расчете. Для проведения численных расчетов структуры в ProCast необходимо правильно выбрать кристаллизационную модель и правильно назначить ее параметры. Не всякий даже хорошо разбирающийся в физике основных литейных процессов специалист способен на это, однако эта задача не всем и нужна в такой «сильной» постановке, так что в данном случае повышенные требования к квалификации пользователя в этом вопросе вряд ли можно отнести к недостаткам. К главным достоинствам этого пакета следует отнести возможности учета сложных тепловых граничных условий, учет возможности перемещения объектов (например для направленного затвердевания лопаток), возможность учета сложной реологии при деформационных расчетах и, как уже указывалось, возможность численного расчета структуры в отливках. Следует отметить, что «сложная реология» при деформационных расчетах в ProCast включает в себя и возможность моделирования таких сложных процессов, как непластические течения.

ProCast имеет собственный генератор конечно-элементных сеток, которым можно с успехом пользоваться для геометрий средней сложности. Для сложных же геометрических моделей обычно приходится пользоваться специализированными внешними генераторами, которые в настоящее время имеются на рынке. Дело в том, что генера-

ция конечно-элементной сетки – это задача алгоритмически гораздо более сложная, чем, например, разностной. В настоящее время наиболее успешно этот вопрос решается в специализированных системах, предназначенных для получения конечно-элементных моделей на базе импортируемых исходных геометрий в форматах максимально большого количества CAD-систем.

К недостаткам этого пакета можно отнести слабый уровень решения усадочной задачи (расчет раковин, микропористости, макропористости) во всяком случае, в версиях до 2002 года. (Работы по этим направлениям в пакете велись давно, возможно, что в последних версиях этот недостаток более-менее сглажен.) Но, так или иначе, одна из основных задач технолога-литейщика – избежать усадочных и газоусадочных дефектов в ProCast не имеет должной поддержки, что довольно обидно для пакета такого уровня. Кроме того, ProCast имеет устаревший интерфейс при вводе данных и визуализации расчетов, фактически наследующий интерфейс для Unix-версий, почти не изменившийся за последние 5-8 лет. Если при назначении исходных данных с этим можно как-то мирится, то при визуализации и анализе результатов расчетов устаревший интерфейс может существенно снизить эффективность работы технолога-литейщика при принятии тех или иных технологических решений.

ProCast – это типично «тяжелая» система, гораздо более универсальная, чем, например, MagmaSoft и предназначенная для решения сложных задач при разработке литейной технологии с адекватным учетом максимально большого количества действующих факторов. Ее конечно портит отсутствие возможности моделирования на должном уровне образования макропористости, раковин и микропористости, а также явное пренебрежение к интерфейсу и возможностям критерияльного анализа, но зато те задачи, которые в пакете декларируются как «численный расчет» решаются в максимально возможно «сильной» постановке с возможностью управления всеми параметрами, определяющими ход процесса. ProCast можно рекомендовать в качестве базовой «тяжелой» системы для отливок и технологий любой сложности, исключая те случаи, где требуется моделирование образования усадочных дефектов с учетом реального динамического характера структурированности двухфазной зоны (расчет макропористости и раковин) и падения давления за счет фильтрационного течения в двухфазной зоне при усадке (расчет микропористости). Вероятно, особенно эффективен этот пакет будет в тех случаях, когда технологом требуется решение деформационных задач со сложной реологией и задач формирования структуры в отливке, хотя обе эти задачи потре-

буют пользователей с достаточно серьезной базовой подготовкой.

Приведенный выше анализ возможностей ProCast базируется на опыте расчетов на этой системе литейных технологий по заказам заводов, а также обучение работе с этой системой специалистов российских заводов (Обучение проводилось по договорам с разработчиками ProCast.) Параллельно с Полигоном, система ProCast на территории России в течении ряда лет поддерживалась разработчиками Полигона в качестве «системы для рабочих станций». В настоящее время ProCast разработчиками Полигона не поддерживается.

Полигон - российский конечно-элементный пакет, начавший создаваться в конце 80-ых годов в ЦНИИ Материалов по заказу Министерства оборонной промышленности для заводов министерства. (В последствии разрабатывался и распространялся фирмой «Фокад».) В настоящее время наиболее распространен на предприятиях оборонного комплекса, предприятиях АвтоПром, заводах Аэрокосмического комплекса и крупных машиностроительных заводах имеющих литейные производства. В последние 5-6 лет стал активно применяться в технических университетах. Практически каждый год выпускается очередная версия Полигона.

В системе Полигон численными методами решаются задачи моделирования гидродинамических, тепловых и усадочно-фильтрационных процессов. Кроме того, численно решается задача распределения электрических потенциалов в затвердевающей отливке в условиях приложения электрического тока. Методами критериального анализа решаются задачи прогноза прочности, твердости, структурных параметров, размыва форм и т.п. К достоинствам пакета, помимо применения конечных элементов, следует отнести сложные и адекватные физические модели тепловых процессов и возможность учета сложных граничных условий [2], учет возможности перемещения объектов (для направленного затвердевания лопаток), а также возможность полномасштабного решения задачи образования усадочных дефектов [3]. Возможность учета сложных граничных условий для отливок с усложненной геометрией при применении специальных способов литья позволяет применять Полигон в таких сложных литейных производствах, как литье лопаток, в т.ч. методами направленного затвердевания. В частности, для моделирования литья лопаток в условиях приложения электрических потенциалов Полигон много лет успешно используется в АО «Сатурн» (г. Рыбинск) [4]. Возможность учитывать сложные процессы при направленном затвердевании позволяет задействовать Полигон при производстве отливок крайне ответственного назначения, например по заказу Российского Космического Агентства

Полигон использовался для моделирования технологий литых деталей ракетного двигателя носителя «Протон» и носителя «Русь», производимых на ФГУП «Воронежский Механический Завод». Одна из наиболее «сильных» сторон Полигона - это адекватные и современные физические модели процессов образования усадочных дефектов – микропористости, макропористости и раковин. В Полигоне проводится совмещенный расчет образования усадочных дефектов по двум совершенно различным механизмам – «микро» и «макро», с расчетом фильтрационного течения, расчетом полей давлений в отливке, с учетом сложного динамического характера изменения структурированности сплава в интервале затвердевания [3].

Фактически в такой сложной постановке задача формирования усадочных дефектов в численном виде не решается ни в одном другом литейном пакете, хотя задача прогноза усадочных дефектов является чуть ли не основной задачей технолога-литейщика. Такое положение объяснимо, если вспомнить под эгидой какого ведомства начинался Полигон – он сразу должен был давать адекватные решения в наиболее важных вопросах для ответственных и проблемных отливок, иначе были возможны довольно неприятные ситуации. В этом смысле показательным является опыт ФГУП «Салют» (г. Москва), производящий лопасти турбин, в т.ч. для СУ-27 и др. самолетов этой серии. Это предприятие приобрело сетевую лицензию Полигона на несколько рабочих мест и после года эксплуатации Полигона для проверки возможностей других пакетов заказало моделирование одной из просчитанных на Полигоне проблемных отливок дилерам MagmaSoft и ProCast. Ни один из этих пакетов не показал усадочных дефектов там, где их показал Полигон и там, где они действительно присутствовали. Причем выявили их местоположение именно после моделирования на Полигоне. Данный факт был объявлен в докладе представителей ФГУП «Салют» на литейном семинаре в Санкт-Петербурге весной 2004 года, проводимым фирмой «Фокад». Это далеко не единственный пример такого рода, причем для специалистов, знающих суть вопроса, в этом нет ничего удивительного. В других пакетах те процессы, которые моделирует Полигон при формировании усадочных дефектов, вообще не рассматриваются, а используются простейшие модели. Эти простейшие модели более-менее отражают реальность лишь в достаточно очевидных случаях формирования жестко изолированных тепловых узлов.

Для использования возможностей критериального анализа в пакете имеется специальный модуль, позволяющий использовать не только предлагаемые разработчиками Полигона критерии для прогно-

за механических свойств, размыва формы и т.д., но и формировать базу "собственных" сложных критериев с учетом химического состава, логикой перехода от одной формулы к другой и т.п. К тем критериям, которые предлагаются разработчиками, прилагаются полные описания этих критериев, в т.ч. описание методики их настройки на параметры конкретного производства. Это позволяет пользователю наиболее эффективно использовать возможности критериального анализа и, используя исходные численные решения, действительно адекватно прогнозировать различные технологические и эксплуатационные свойства отливки. Более подробно о соотношении численных и критериальных алгоритмах см. [5].

При назначении свойств сплавов, материалов, граничных условий и т.п. пользователь имеет полный доступ ко всем параметрам, может как угодно изменять и дополнять исходные базы по свойствам. К Полигону подключен обширный справочник по свойствам сплавов и материалов форм. Кроме того, можно использовать генератор свойств сплавов по задаваемому химическому составу – для серых чугунов, сталей и алюминиевых сплавов. Одна из сильных сторон пакета - это, несомненно, эффективные и удобные постпроцессоры. Все пользователи Полигона отмечают, что постпроцессоры Полигона, визуализирующие результаты расчетов превосходят аналогичные в MagmaSoft, ProCast и др.

Геометрический препроцессор Полигона предоставляет обширные возможности по работе с конечно-элементной сеткой: редактирование сетки, выделение областей с недостаточной густотой, измельчение в указанных областях, регуляризация сетки (улучшение качества), выявление и автоматическое исправление недопустимых элементов и многое другое. Препроцессор позволяет импортировать сетки практически всех известных генераторов: FEMAP, HyperMesh, GiD, ANSYS, Nastran, Pro/Mesh (модуль ProEngineer), генератор в Unigraphics, StressLab (модуль CADD5), MeshCast (модуль ProCast) и др. Такой подход, исключающий «встроенный» генератор, связан с тем, что в настоящее время генераторы конечно-элементных сеток являются такими же универсальными системами, как например CAD-системы. Как показывает опыт, для быстрого создания качественной элементной модели сложной фасонной отливки требуется отдельная развитая система, основное назначение которой - генерация сетки на базе исходных геометрических моделей импортируемых из CAD-систем. По желанию заказчика совместно с Полигоном поставляется один из таких генераторов - FEMAP, HyperMesh или GiD, различающиеся по цене, удобству интерфейса и возможностям. Однако, доста-

точно часто заводы используют генераторы уже имеющихся на заводе CAD-систем типа Unigraphics и ProEngineer или систем для прочностных расчетов типа ANSYS и Nastran. Описанная выше организация работы с сетками позволяет совместно с Полигоном использовать все наиболее популярные CAD-системы: SolidWorks, Unigraphics, ProEngineer, EUCLID, CATIA, Cimatron, «Компас-3D», CADD5 и др.

К недостаткам пакета следует отнести отсутствие полномасштабной деформационной задачи с учетом сложной реологии (разработчики предполагают выпустить подобный модуль в начале 2005 г.) и, пожалуй, избыточную сложность моделей при решении гидродинамических задач. Вероятно, для литейных процессов можно было использовать менее сложные и универсальные модели за счет чего уменьшить ресурсоемкость и увеличить скорость решения гидродинамической задачи. Кроме того, несмотря на то, что как указывалось выше, Полигон решает усадочную задачу едва ли не лучше, чем все остальные литейные пакеты, даже этого далеко не всегда достаточно. Помимо тех двух основных механизмов, которые моделирует Полигон («микро» и «макро») при образовании усадочных дефектов, в реальности действуют еще и т.н. «промежуточные» механизмы, которые в модели Полигона пока не входят. Помимо этого, в серых чугунах существует еще т.н. предусадочное расширение, иногда полностью компенсирующее усадку. Это предусадочное расширение при моделировании в Полигоне для серых чугунов задается и учитывается, но модель этого учета относительно несложная и не учитывает возможность полной компенсации усадки, т.к. не отражает всего многообразия возможностей протекания процесса предусадочного расширения. Для сложных геометрий это несущественно, в них полной компенсации не происходит никогда, но на простых геометриях это может приводить к завышенным прогнозам по макropористости. За пределами СНГ пакет практически не распространен (исключая продажи на лопаточные предприятия Южной Кореи и «университетские» лицензии в Германии) и дилеров за пределами СНГ не имеет.

На настоящий момент в СНГ Полигон безусловный лидер по количеству приобретенных заводами лицензий. Среди пользователей Полигона много крупных и известных в России заводов: ОАО «Автомобильный завод», АО «УАЗ», АО «Сатурн», ФГУП «Салют», АО «Красный двигатель», ФГУП «ВМЗ», АО «Звезда», АО «Ижорские заводы», АО «Завод турбинных лопаток», АО «Буммаш» и многие другие заводы. В учебных целях «Полигон» используется в Тульском ГТУ, Комсомольско-Амурском ГТУ, Самарском ГТУ, Минской ПА, Тольятинском ПИ, Петербургском ИМ, Петербургском СЗПИ и др.

Причем, часть предприятий, приобретающих лицензии на Полигон, делало это в целях замены ранее приобретенного другого пакета. Показателен в этом смысле опыт ОАО «АвтоВАЗ». Ранее этот завод приобрел MagmaSoft. Однако через год эксплуатации MagmaSoft, было принято решение приобрести более эффективный и адекватный пакет в качестве базового. В целях обеспечить обоснованный выбор другого литейного пакета, завод взял на опытную эксплуатацию систему ProCast и одновременно заказал моделирование проблемной отливки «Блок цилиндров а/м ВАЗ» в системе Полигон. По результатам моделирования завод взял на опытную эксплуатацию еще и систему Полигон. По результатам опытной эксплуатации пакетов ProCast и Полигон, было принято решение в качестве базовой литейной системы использовать Полигон, и завод приобрел три полные лицензии Полигона. На литейном семинаре в Санкт-Петербурге в 2004 году проводимым фирмой «Фокад» представители ОАО «АвтоВАЗ» опубликовали доклад, в котором было заявлено, что с помощью моделирования на системе Полигон по некоторым технологиям был достигнут экономический эффект, перекрывающий стоимость Полигона.

По классу Полигон безусловно является «тяжелой» системой, предназначенной для решения задач проектирования литейной технологии для любых способов литья при неограниченной сложности геометрии отливки с учетом максимального количества действующих факторов. Как и всякая «тяжелая» система Полигон хорошо подходит для решения задач по «проблемным» нетиповым технологиям. Однако, это не означает, что на Полигоне неудобно моделировать несложные или типовые отливки. Например, на ФГУП «ВМЗ» (г. Воткинск) по утверждению представителей завода через Полигон проходит около 70% всех проектируемых технологий. Лицензии на систему Полигон могут быть трех типов: Light (легкая), Professional (профессиональная) и Special (специальная). Они различаются по цене и максимальному количеству элементов в моделируемой геометрии, однако все используют одинаково адекватные физические модели и одинаково эффективные математические алгоритмы. Все три вида лицензий могут быть как в обычном, так и в сетевом варианте.

Литература

1. Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей? - М.: Литейное производство.- 2002,

№ 5, с.22-28.

2. Тихомиров М.Д., Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача.- М: Литейное производство.- 1998, № 4, с.30-34.
3. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача -М.: Приложение к журналу Литейное производство.- 2001, № 12, с.8-14.
4. Калюкин Ю.Н., Мальцева Ю.Ю., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х. Высокоэффективная технология литья крупногабаритных лопаток ГТД.- М.: Литейное производство.- 2001, № 11, с.7-9.
5. Тихомиров М.Д., Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования.- М: Литейное производство.- 2004, № 5, с.24-30.

СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИГОН

Тихомиров М.Д., Бройтман О.А. (ООО «Фокад»)

Отработка литейной технологии для едва ли не каждой сложной отливки во многом основывается на металлоемком методе проб и ошибок, эмпирическом опыте работы технологов, которые должны держать в голове массу информации об удачных и неудачных попытках получения отливок и оперировать ею, зачастую опираясь на интуицию и лишь в редких случаях – на строгие алгоритмы. Специфика литейного производства такова, что среди всего многообразия контролируемых факторов фигурируют и состояние заливаемого металла, и способ изготовления формы, и ее предварительный прогрев, и скорость подачи жидкого металла в форму, и, разумеется, конфигурация самой отливаемой детали и литниковой системы, и скорость отвода тепла при затвердевании, и т.д. При этом необходимо отметить, что ещё в 60-е – 70-е годы в нашей стране была достаточно подробно разработана видными учёными-литейщиками теория литейных процессов. Надежное решение тех или иных задач формирования отливки зачастую не может быть получено аналитическим путем, а лишь численно, с реализацией решения на компьютере. По этой причине практическое осуществление подобных расчетов было лишь вопросом времени, вопросом должного развития компьютерной техники.

Система компьютерного моделирования литейных процессов ПОЛИГОН уже давно существует на рынке подобных продуктов и успела снискать популярность и уважение среди многих промышленных предприятий. Первая версия ПОЛИГОНа была разработана в 1989 г. в ЦНИИМатериалов в рамках финансируемой Министерством оборонной промышленности тематики по обеспечению качества отливок для деталей специального назначения. Система ПОЛИГОН на сегодняшний день является мощной современной трехмерной системой компьютерного моделирования физических процессов, влияющих на качество отливки. Она базируется на методе конечных элементов (МКЭ), который является в настоящее время наиболее адекватным численным методом решения задач подобного рода.

Взаимосвязанные ключевые достоинства применения ПОЛИГОНа следующие:

1. система ПОЛИГОН предназначена для проведения отработки наиболее важных технологических параметров процесса литья не на реальной отливке, а на ее компьютерной модели, реализованной на персональном компьютере;

2. это позволяет снизить материальные затраты и время на проектирование и доводку литейной технологии, исключает материальные издержки, связанные с практическим применением неудачных вариантов технологии, увеличивает производительность и качество труда технолога-литейщика;
3. становится возможной компьютерная отработка существующих технологий на предмет устойчивости к изменению технологических параметров, выяснение влияния варьирования тех технологических параметров, контроль которых затруднён в цеховых условиях; возможна оптимизация технологии.

Структурно ПОЛИГОН представляет собой набор программных модулей, ориентированных на работу в едином пакете. Их принято объединять в три большие группы: препроцессор – модули, в которых производится подготовка геометрической модели и вводятся исходные данные по материалам сплава и формы, чему помогает подключенный обширный справочник по свойствам литейных сплавов и материалов, база, имеются средства автоматической генерации свойств некоторых типов сплавов по химическому составу (модули «Мастер-3D», «Оптимизация» и «Сплав»); процессор – модули, выполняющие расчеты, использующие данные, подготовленные в модулях препроцессора (модули «Фурье-3D», «Старт FlowVision»); постпроцессор – модули для визуализации результатов расчетов, выполненных в модулях процессора («Мираж-3D», «Мираж-Л»).

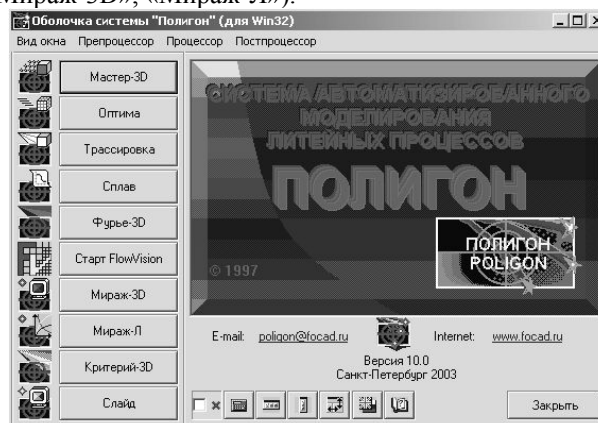


Рис. 1. Внешний вид окна оболочки системы ПОЛИГОН

На рис. 1 показано стартовое окно ПОЛИГОНа – оболочка, из которой производится запуск всех программных модулей.

Работа с программным пакетом предваряется созданием трехмерной геометрической модели отливки и литейной формы со всеми

ее элементами, для чего можно использовать практически любые системы CAD-системы. С помощью генератора конечно-элементной (КЭ) сетки, полученные геометрические модели преобразуются к виду, приспособленному для проведения расчётов в ПОЛИГОН. ПОЛИГОН поддерживает чтение многих форматов, выдаваемых программами, генерирующими конечно-элементную сетку. На сегодняшний день уже некоторые CAD-системы оснащаются КЭ-генератором. Следует отметить, что геометрическая информация при описанном методе подготовки геометрии передается в ПОЛИГОН без искажений.

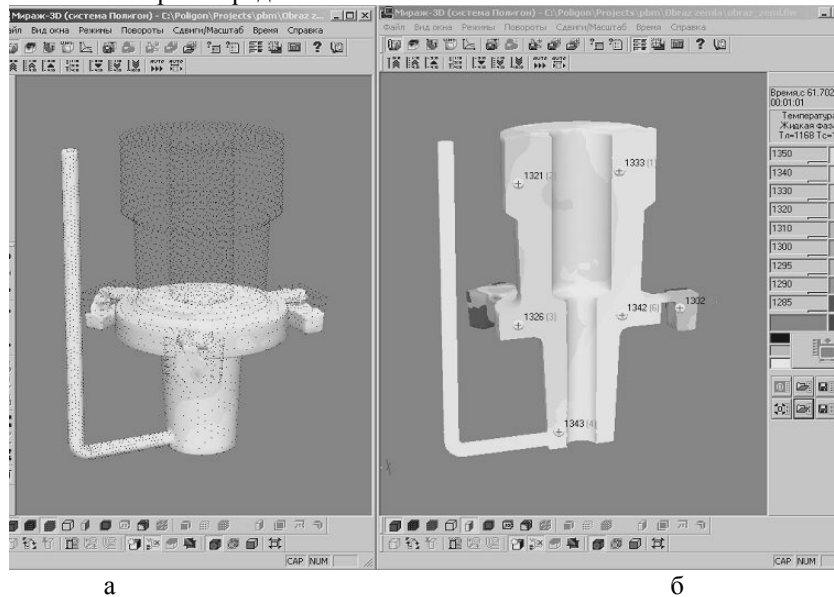


Рис. 2. Этапы гидродинамического расчета: а – поле температур в отливке на 20 с. от начала заливки; б – конечная стадия заливки, полость формы полностью заполнена (62 с. от начала заливки), показаны температуры в характерном сечении

В процессорных модулях ПОЛИГОН моделирует процессы заполнения, затвердевания, образования усадочных раковин и микро- и макропористости.

Модели в гидродинамической задаче предназначены для моделирования широкого класса гидродинамических явлений. Они описывают движение однородной жидкости при различных скоростях с учетом эффектов сжимаемости, турбулентности и теплопереноса. Гидродинамический расчёт позволяет проследить потоки, поля скоростей

и температур при заполнении формы расплавом, а также получить начальное распределение температурных полей в отливке с учетом взаимодействия расплава с формой для последующей передачи в модуль процессора «Фурье-3D» стартовой температурной картины до начала затвердевания. Рис. 2 иллюстрирует некоторые этапы гидродинамического расчета. Различные части отливки на рис. 2 окрашены в разные цвета в соответствии с выбранной цветовой палитрой и поставленной ей в соответствие шкалой температур.

Численное решение гидродинамической задачи производится методом конечных объемов.

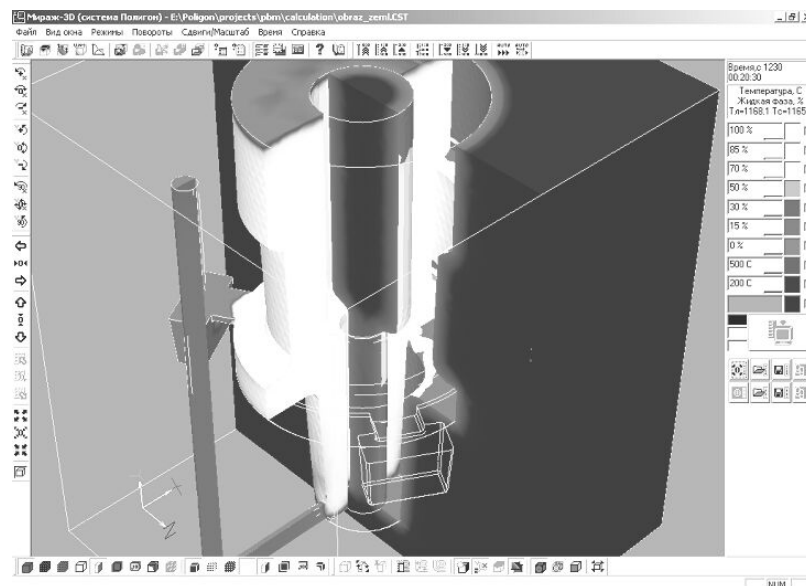


Рис. 3. Поле температур в отливке и форме на 21 мин. от начала затвердевания (форма показана в сечении)

Тепловой расчёт в модуле «Фурье-3D» – это решение основополагающей задачи расчета температурно-фазовых полей в отливке и температурных полей в форме. В алгоритм теплового расчета заложен учет теплопередачи теплопроводностью, конвекцией, лучеиспусканием, неравномерности выделения скрытой теплоты затвердевания, сложный характер тепловыделения на границе «отливка-форма» при возможности наличия межконтактных прослоек (окислы, краски). Модели граничной передачи использует физические представления,

предполагающие одновременное существование распределенных пятен плотного контакта и теплопередачи через зазор. Важным является тот факт, что в ПОЛИГОНе решается сопряженная задача расчета температурно-фазовых полей отливки и температурных полей формы. Однако, расчетные алгоритмы ПОЛИГОНа позволяют для экономии времени и сокращения трудоёмкости моделирования также применять учет формы с помощью тепловой активности, а также комбинированный учет. Рис. 3 иллюстрирует одну из стадий теплового расчета.

В системе ПОЛИГОН расчет тепловых процессов ведется методом конечных элементов.

Совместно с тепловым расчётом в модуле «Фурье-3D» производится решение задачи питания отливки, имеющее целью расчет микро- и макропористости. Алгоритм расчета усадочных процессов и образования усадочных дефектов после заполнения полости формы расплавом основан на следующих представлениях о физике процесса. Образование микропористости связано с недостатком давления в некоторой области двухфазной зоны, находящейся ниже уровня расплава. Образование же в некоторой части объема отливки макропористости и раковин обусловлено падением уровня расплава ниже этой области.

Расчет раковин и макропористости основан на вычислении объемной усадки и движения зеркала расплава в каждой изолированной области питания. При этом решается задача определения на каждом временном шаге всех изолированных зон питания и уровня зеркала расплава в каждой зоне.

На рис. 4 приведены результаты усадочного расчета. При визуализации результатов использован мощный инструмент, встроенный в «Мираж-3D» – возможность вывода зон выше либо ниже или равных определенному значению изоповерхности. Таким образом, при использовании этого инструмента скрываются те части отливки (формы), в которых расчетное значение пористости (температуры, скорости и т.д.) ниже (либо выше – по выбору пользователя) определенного заданного пользователем значения.

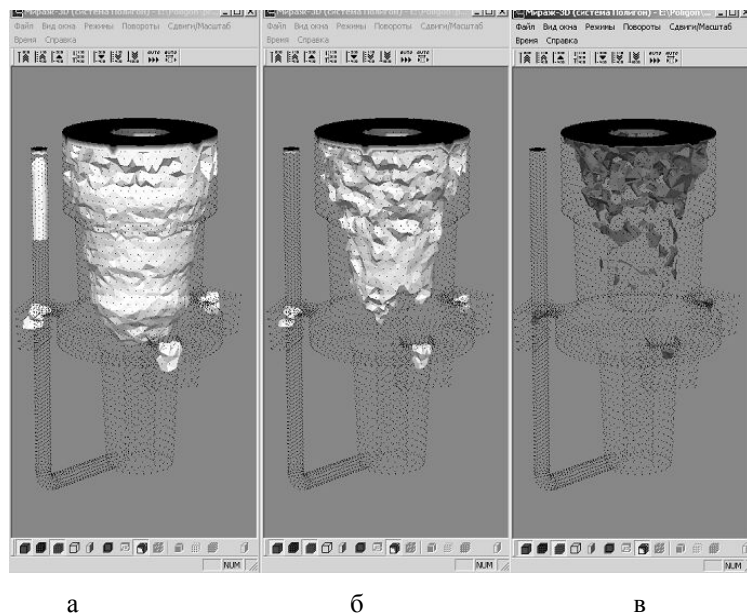


Рис. 4. Дефектные области отливки: а – с пористостью выше 2%; б – выше 20%; в – выше 75%.

Одним из важнейших достоинств ПОЛИГОНа является не только то, что он покажет дефекты в отливке, но и позволит проследить механизм их образования. Система отливка-форма перестает быть «черным ящиком» для технолога. На рис. 5 показано, как при помощи вывода на экран зон, в которых жидкой фазы 50% и выше (к примеру, задались именно этой критической точкой), удастся отследить места, в которых происходит отсечение от питания некоторых областей отливки, возникновение изолированных объемов жидкости в теле отливки.

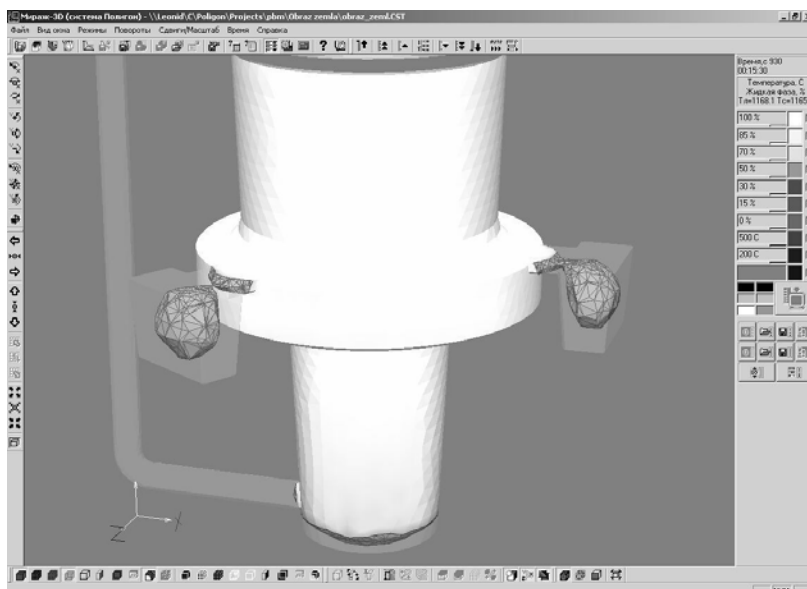


Рис. 5. Момент отсечения от питания некоторых областей отливки

В дополнение к вышеперечисленным возможностям ПОЛИ-ГОНа следует отметить, что недавно в составе программного пакета появился новый модуль постпроцессора «Критерий-3D». Этот модуль критериального анализа существенно расширяет границы применения программного пакета. Модуль предназначен для анализа расчетных полей, полученных в результате моделирования литейной технологии. Производя обработку по соответствующим формулам тепловых или иных полей, можно получить оценочные значения для прочности, склонности к образованию трещин, структуры металла, размыва формы и т.п. Исходными данными для модуля являются результаты моделирования, произведенного в модуле «Фурье-3D», результатом его работы – стандартный файл модуля «Мираж-3D». Помимо использования готовых формул, составленных разработчиками, пользователю предоставляется возможность составлять и использовать для анализа свои формулы.

На рис. 6 представлены результаты расчета в модуле «Критерий-3D»: анализ склонности формы к размыву (рис. 6а, ярким цветом показаны критические места), предсказание полей прочности в теле

отливки (рис. 6б, показана прочность в стандартных образцах, вырезаемых из того или иного места отливки).

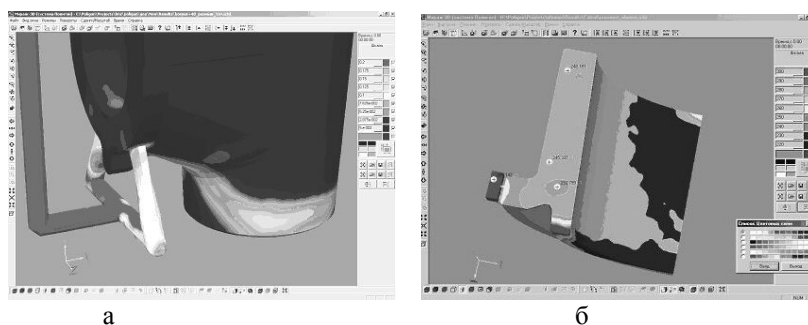


Рис. 6. Критериальная обработка расчетных полей: а – прогноз склонности к размыву литейной формы; б – поля прочности (МПа) в теле отливки

Результаты вычислений технолог просматривает и обрабатывает в постпроцессоре «Мираж-3D», позволяющем загрузить файлы с результатами расчетов, полученных в модулях процессора, и в динамике просмотреть на компьютере тот или иной процесс в жизни отливки: заполнение формы, затвердевание отливки, локализация тепловых узлов и образование дефектов. Интерфейс постпроцессора позволяет пользователю поворачивать объект, делать в нем любые сечения, изменять масштаб изображения, трансформировать цветовую палитру, переходить от зон равных значений свойств к изолиниям, оцифровывать изображения, совмещать на экране одновременно несколько изображений. Счетчик реального времени процесса помимо индикации текущего момента дает возможность быстро перемещаться в любую точку временной оси и просматривать «кино» по-кадрово либо непрерывно (в автоматическом режиме) с любого момента.

Модуль постпроцессора «Мираж-Л» позволяет записывать и строить любые графические зависимости, отражающие ход процесса формирования отливки по результатам расчёта в модулях процессора. Удобный интерфейс модуля позволяет любым образом, в том числе и формульно, обрабатывать полученные кривые, накладывать графики и т.д.

В заключение несколько слов о системных требованиях. ПОЛИГОН будет удовлетворительно работать практически на любой машине класса Pentium. Вопрос лишь в том, сколько времени будет затрачиваться на расчет, чем быстрее и современнее компьютер, тем

меньше будет затрачиваемое на счет время. Поэтому в минимальные требования можно записать даже Pentium 200МГц с 64Мб ОЗУ. Ну а рекомендуемая конфигурация выглядит примерно так: процессор – не ниже Pentium-III, частота – не ниже 1000МГц, ОЗУ – 512Мб. Операционная система – Windows 9x/2000/XP/NT. Обеспечение разумного количества времени, затрачиваемого на расчёт, зависит не только от доступных вычислительных ресурсов, но и от сложности загружаемой геометрической модели, количества элементов в конечно-элементной сетке, задаваемых условий на расчёт.

В настоящее время непрерывно ведётся работа над совершенствованием возможностей пакета и увеличением удобства интерфейса. Кроме того, по заказам отечественных и зарубежных предприятий практически непрерывно осуществляются работы по анализу и оптимизации литейной технологии с использованием ПОЛИГОНа.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЛИТЕЙНОЙ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ

Тихомиров М.Д., Ермакова С.В., к.т.н. (ООО «Фокад»)

В последние полтора-два года на литейных производствах России наблюдается резкое увеличение спроса на системы моделирования. При этом у пользователей нет ясного представления о том, что должна и может делать моделирующая система, а что должны делать другие подсистемы САПР.

Иногда к моделирующим системам предъявляют различные требования, для обеспечения которых они совершенно не предназначены. Поэтому возникает необходимость четко определить место моделирования в программном обеспечении, входящем в САПР ЛТ.

В рамках САПР можно выделить два совершенно различных вида систем: системы *синтеза* технологии и системы *анализа* технологии [1].

Системы синтеза и анализа принципиально различаются по:

- внутреннему устройству,
- по назначению,
- возможностям,
- принципам применения,
- техническим и организационным решениям при внедрении.

Более того, для их успешной эксплуатации чаще всего требуются пользователи с разной специализацией и квалификацией.

В принципе эти системы могут успешно функционировать независимо.

В идеальном случае системы синтеза и анализа могут применяться совместно, используя результаты работы друг друга.

Системы СИНТЕЗА технологии. К системам синтеза обычно относят два вида программного обеспечения:

во-первых это графические системы для создания геометрических моделей или чертежей – так называемые ***CAD-системы***. Это чаще всего универсальные конструкторские пакеты не являющиеся специфическими литейными системами.

во-вторых ***ПО для генерации технологических параметров***, которое должно быть узкоспециализированным и отражать специфику конкретного предприятия.

Для отработанных технологий типовых отливок такие системы позволяют получить на выходе большинство необходимых параметров.

Системы синтеза литейной технологии могут с успехом применяться для производств с ограниченной номенклатурой.

Использование таких систем не требует от пользователя особой подготовки и большого опыта.

Главное назначение систем синтеза

– автоматизировать рутинные операции проектирования, высвободить время технолога для решения действительно творческих задач, которые трудно или невозможно автоматизировать. **существенно снизить процент ошибок** при их проведении.

Системы синтеза могут существенно облегчить труд технолога, но не могут за технолога решить вопросы проектирования «не типовых» литейных технологий. Кроме того, успешную адаптацию (или точнее создание) системы синтеза литейной технологии на конкретном заводе могут провести только заводские специалисты различного профиля, объединенные общей координацией некоторого отдела САПР или аналогичного ему, который при необходимости может привлекать сторонних разработчиков и специалистов. К сожалению, в условиях реального производства организовать такую работу достаточно трудно.

В настоящее время внедрение полномасштабной системы синтеза ЛТ требует от заводов таких усилий, что это становится невозможным.

Именно по этой причине примеров успешного разворачивания системы синтеза литейной технологии в России практически нет.

Системы АНАЛИЗА литейной технологии. К системам анализа литейной технологии относится ПО для численного моделирования физических процессов происходящих в отливках. В таких программах на компьютере «проигрываются» различные процессы при формировании отливки (тепловые, гидродинамические, усадочные, деформационные и т.д.) на основе которых моделируются процессы образования различных дефектов, прогнозируются различные свойства, эксплуатационные характеристики и т.п.

В структуре интегрированной системы автоматизированного проектирования литейных технологий (САПР ЛТ) моделирующие системы являются одной из подсистем САПР ЛТ [2] и предназначены для :

- отработки сложных или ответственных технологий (как серийных так и разовых)
- определения параметров наиболее важных по влиянию на качество,

- нахождения причин брака в уже применяемых неудачных технологиях,
- определения устойчивости технологии к изменению внешних параметров
- а также для поиска таких технологических решений, которые требуют понимания происходящих в отливке процессов.

Использование моделирующих систем – это не упрощение процесса проектирования, а способ сделать его более интеллектуально емким, более осмысленным, более надежным, более эффективным.

Успешное использование таких систем требует от пользователя достаточной профессиональной подготовки и творческого подхода к процессу проектирования.

Несмотря на повышенные требования, предъявляемые к пользователю, ***литейные моделирующие системы сейчас активно применяются на десятках заводах России.***

Достаточно сказать, что количество приобретенных новых лицензий на наиболее покупаемую и применяемую в России литейную систему моделирования «Полигон» за этот год было в два – два с половиной раза больше, чем за предыдущий. В общей сложности заводы и ВУЗы СНГ приобрели ***только за один год более полутора десятков*** постоянных и временных лицензий СКМ ЛП «Полигон».

Назначение моделирующих систем. Главное отличие от систем синтеза состоит в том, что ***моделирующие системы на выходе не выдают никаких технологических рекомендаций.***

Моделирование должно показать к чему приведет использование заданных технологических параметров.

Важной особенностью моделирующих систем является то, что все параметры моделируемой технологии пользователь-технолог в качестве входных данных должен определить сам.

Моделируя разные варианты технологии, можно подобрать такие технологические параметры, которые обеспечат устойчивую, бездефектную и экономически выгодную (оптимальную) технологию.

Моделирующие системы дают возможность минимизировать затраты на стадии подготовки производства и освоения новой номенклатуры отливок за счет перебора возможных технологических решений на компьютере.

Возможности моделирующих систем этим не ограничиваются. Основное преимущество таких систем и главное их назначение в том, что моделирующая система:

- позволяет технологу пронаблюдать процессы идущие в отливке и понять по каким причинам образовывается тот или иной де-

фект в конкретной отливке при данных конкретных технологических параметрах, т.е. «увидеть» то, что в реальности он увидеть не может.

- помогает технологу целенаправленно искать именно тот вариант, который обеспечит требуемое качество отливки.

- использование технологом-литейщиком моделирующей системы безусловно существенно повышает его квалификацию, причем в достаточно короткое время.

Те представления о ходе реальных процессов, которые раньше технологи нарабатывали десятилетиями, с помощью моделирования можно получить за год, причем гораздо более безболезненно для производства.

Численные алгоритмы. Моделирующие системы используют для решения основных задач затвердевания и образования усадочных дефектов численные методы- метод КЭ и КР. МКР более старый и менее скоростной. МКЭ более современный, прогрессивный и гораздо более подходит для решения *основных литейных процессов*.

МКР требует больших затрат времени и вычислительных ресурсов по сравнению с МКЭ, если добиваться равной адекватности [3].

Критериальные алгоритмы. Совместно с численными решениями, в литейных моделирующих системах часто применяется *критериальный анализ*.

В современных пакетах чаще всего такие сложнейшие задачи как прогноз структуры, механических свойств и т.д. решается именно на уровне использования подобных критериев. Наиболее известным является критерий Наямы, с помощью которого на базе температурных полей можно получить распределение микропористости в объеме отливки. Критериальный анализ при правильном использовании может быть очень мощным инструментом в руках технолога.

Например, в пакете «Полигон» для критериального анализа разработан отдельный модуль. Адаптация критерия к конкретному литейному производству позволяет получить адекватный прогноз.

Подводя итог сказанному можно определить следующие принципы выбора моделирующей литейной программы:

1. Физические модели, используемые моделирующей системой, должны быть открыты для пользователя. Любая самая сложная литейная моделирующая программа всегда содержит определенные упрощения. Чем лучше пользователь представляет себе модели, заложенные в используемую им систему моделирования, тем более надежные технологические решения он сможет принимать с помощью моделирования.

2. Знание наиболее важных особенностей программной реализации СКМ ЛП. Использование системой наиболее прогрессивных и адекватных численных алгоритмов.

3. Наличие профессионального сопровождения разработчиков в период освоения. Поскольку моделирующие системы являются сложным и интеллектуально-емким профессиональным программным продуктом, то ее освоение может быть не таким уж простым.

4. Необходимо учитывать опыт применения пакета в России.

Для осознанного выбора СКМ ЛП заводские специалисты должны сами ознакомиться с системами, выяснить какие модели и алгоритмы системы используют, понять насколько это может быть применимо к тем задачам, которые стоят перед заводом.

Литература

1. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Системы синтеза литейной технологии и их отличие от систем моделирования литейных процессов. «Литейное производство», 2004г., No 2, с.28-31.
2. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования. «Литейное производство», 2004г., №5 , с.24-30.
3. М.Д. Тихомиров, И.А. Комаров. Основы моделирования литейных процессов. Сравнение метода конечных элементов и метода конечных разностей. Что лучше?. «Литейное производство», 2002, No 5, с.22-28.

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ «ПОЛИГОН»
ПРИ ОСВОЕНИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД**

*Федотов Е.Н., Монастырский В.П., Рябинский Ю.Б.,
Монастырский А.В(ФГУП ММПП «Салют»)*

ММПП «Салют» проектирует и производит авиационные газотурбинные двигатели и наземные энергетические газотурбинные установки. Литые заготовки деталей широкой номенклатуры изготавливают в 3-х литейных цехах: литьем в землю, в кокиль, по выплавляемым моделям из чугунов, различных классов сталей, никелевых жаропрочных сплавов и алюминиевых сплавов.

На основании опыта литейного производства «Салюта» выделено две задачи, решение которых требует применения программного обеспечения:

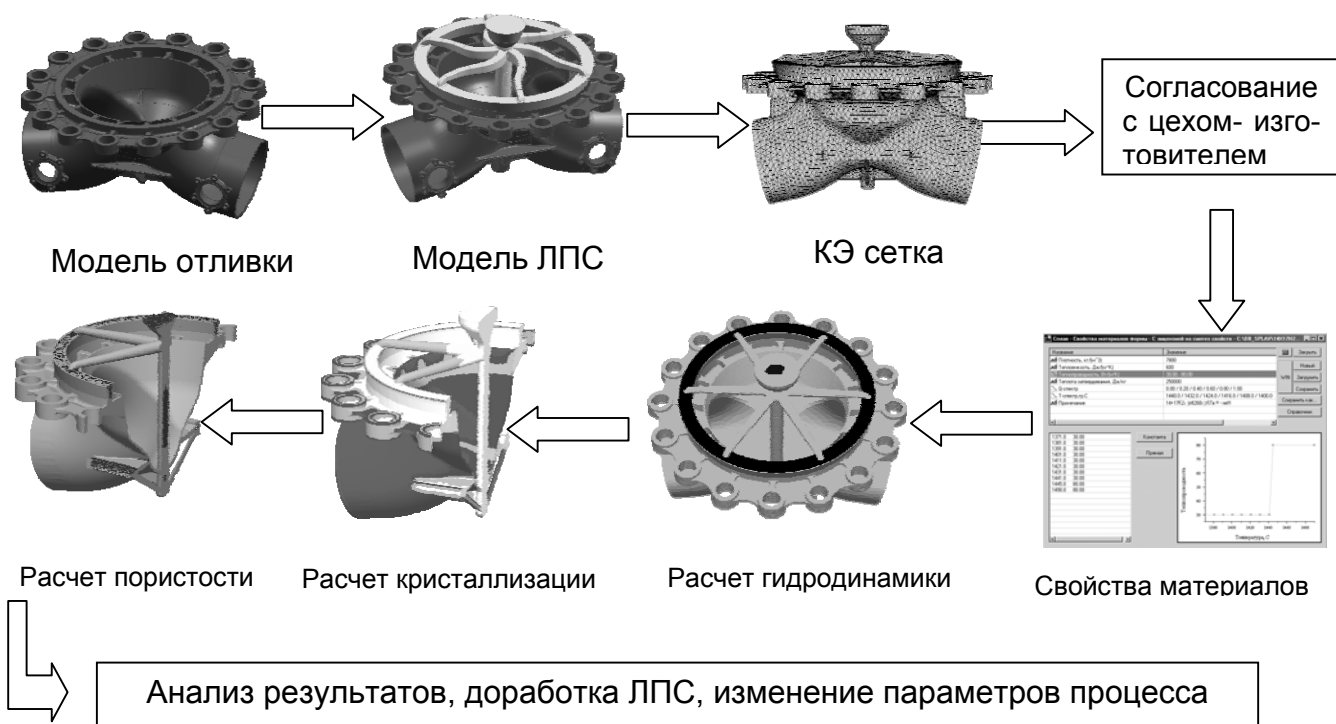
- совершенствование технологии и повышение выхода годных отливок в серийном производстве;
- разработка ЛПС для получения единичных литых заготовок опытных изделий в сжатые сроки без изготовления оснастки.

Для решения этих задач на ММПП «Салют» была приобретена и внедрена САМ ЛП «Полигон».

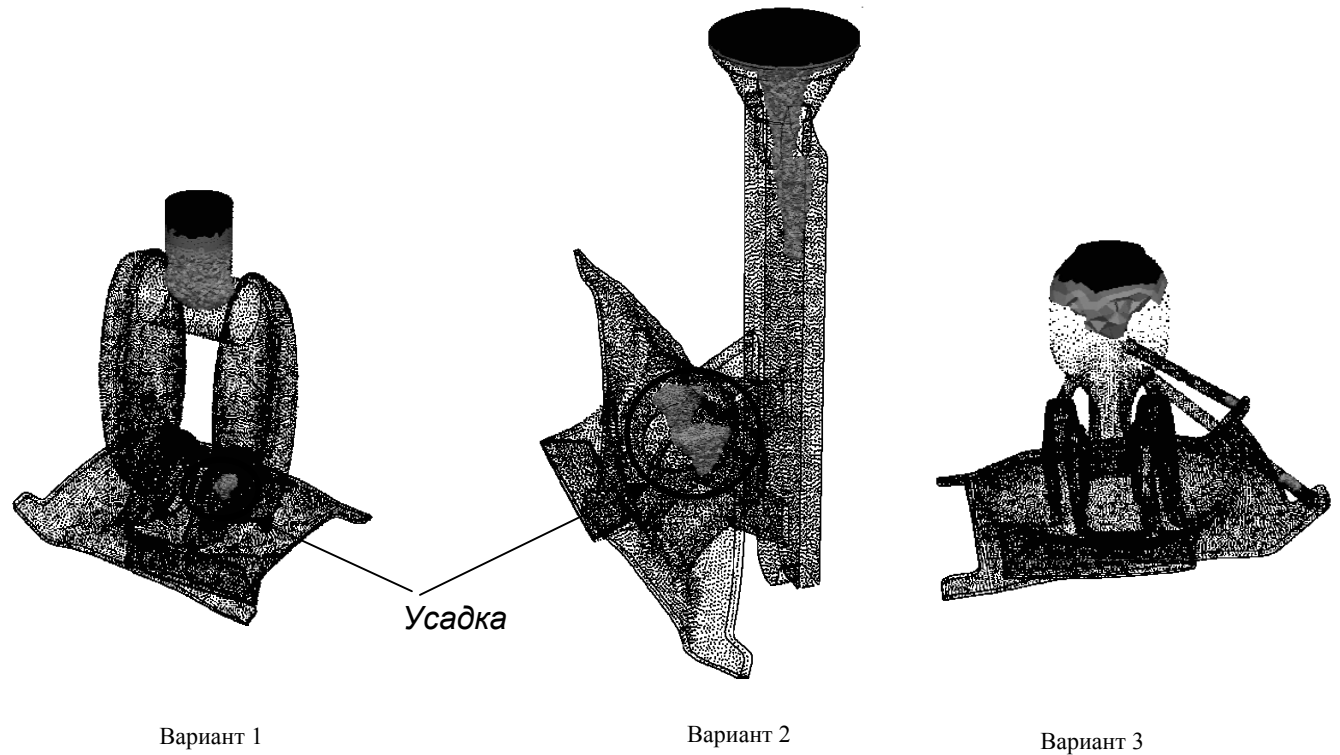
Моделирование с применением системы «Полигон» включает в себя следующие этапы:

1. Создание электронной модели отливки.
2. Создание электронной модели ЛПС.
3. Генерация конечно-элементной сетки по созданным моделям.
4. Согласование с цехом-изготовителем отливки условий заливки: температура металла, температура формы, способ заливки, условия охлаждения формы и т.п.
5. Подбор теплофизических свойств металла и других материалов.
6. Расчет процесса заполнения формы металлом.
7. Расчет процесса затвердевания отливки.
8. Изучение результатов моделирования совместно с технологом, внесение изменений в конструкцию ЛПС, изменение параметров технологического процесса.
9. Повторение п.п. 2, 6, 7, 8 до получения удовлетворительного результата.

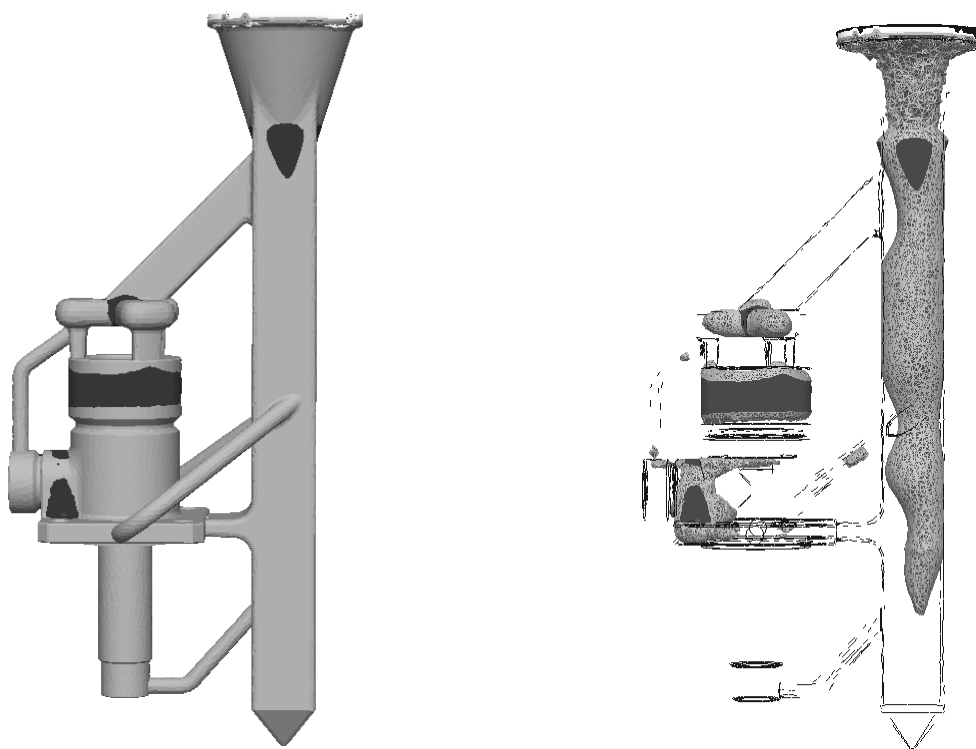
Этапы моделирования с применением САМ ЛП «Полигон»



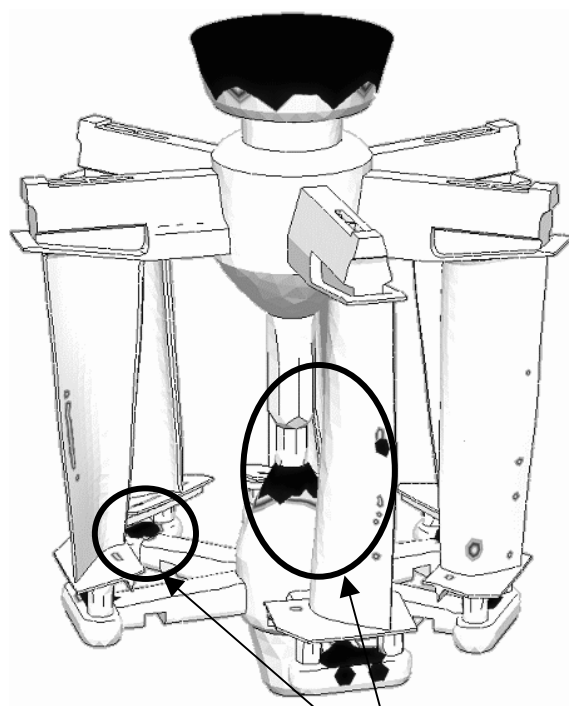
Рыхлота при разных вариантах ЛПС отливки
для фирмы «Снежа»



Прогноз усадочных дефектов в детали «Форсунка»

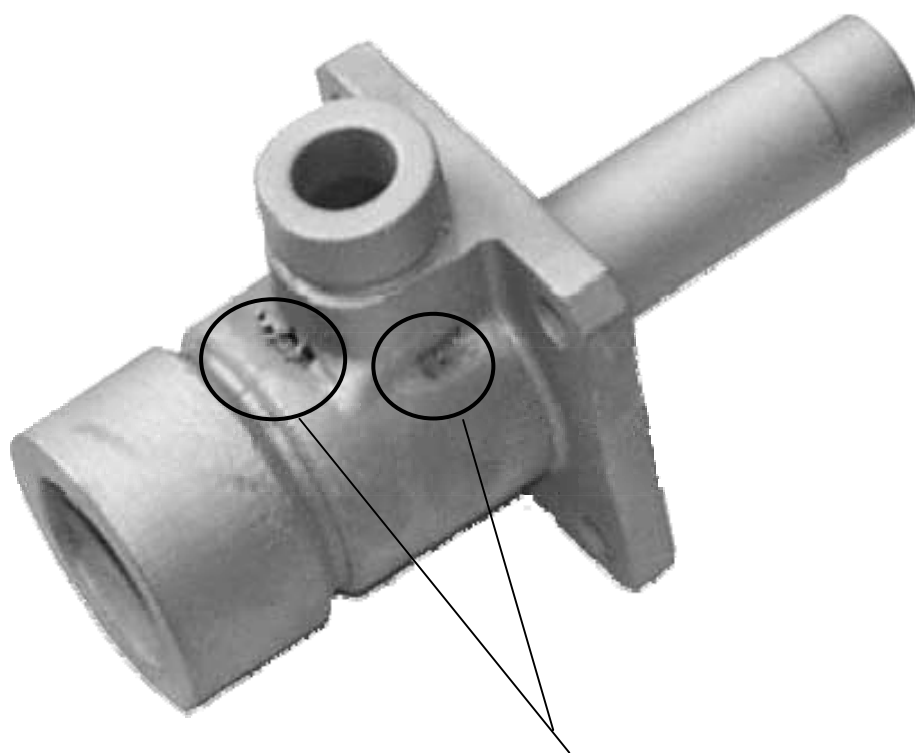


Пористость в отливках лопаток ТНД



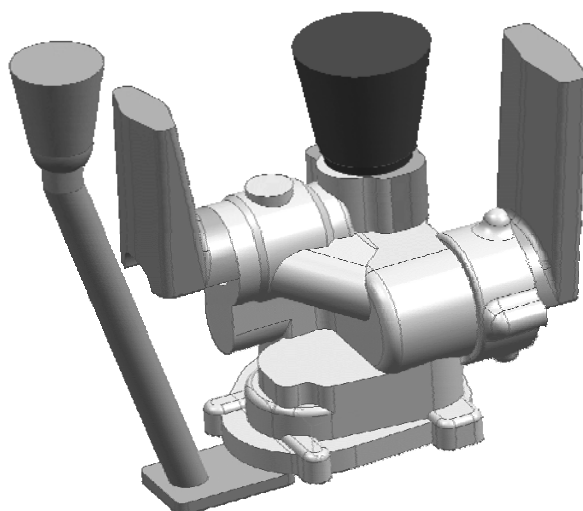
Усадочная рыхлота

Результат заливки в печи УППФ

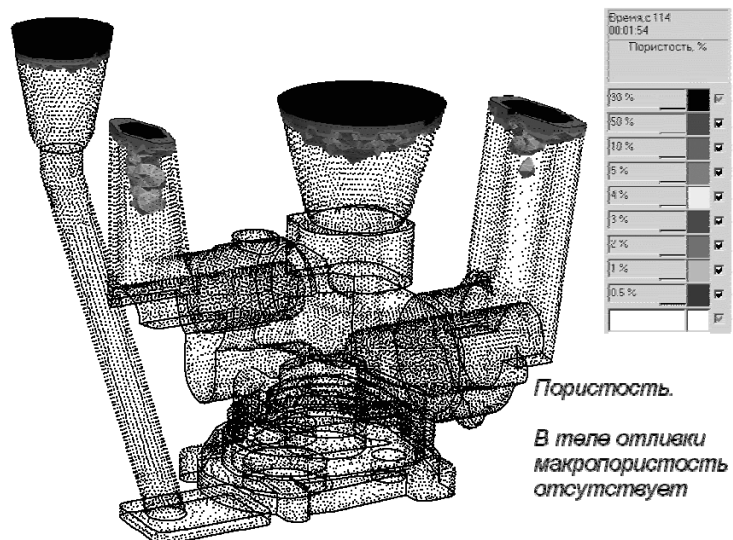


Усадочная раковина

ЛПС детали «Корпус» измененной конструкции

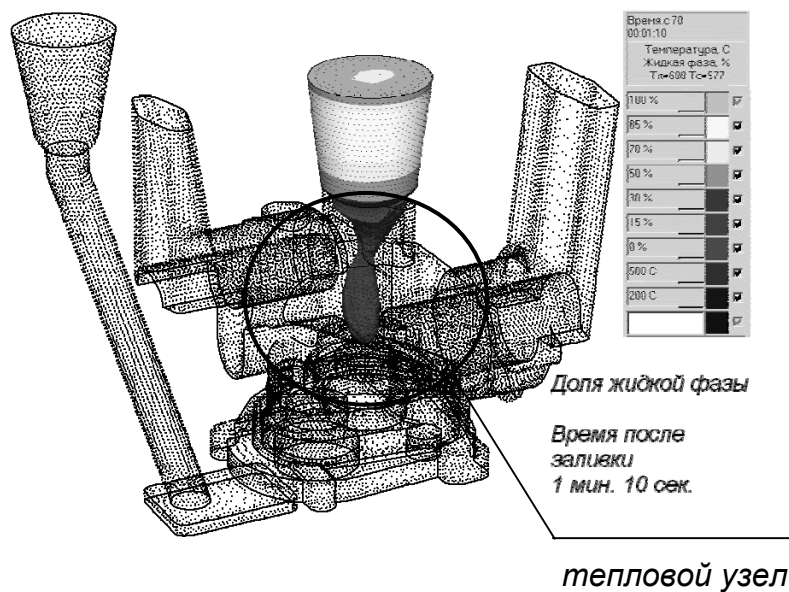


Электронная модель



Прогноз пористости

Анализ ЛПС детали «Корпус» Процесс кристаллизации



Анализ ЛПС детали «Корпус» Усадочная пористость



За время внедрения «Полигона» на ММПП «Салют» было промоделировано в общей сложности до 80 деталей серийного и опытного производства.

Система показала свою высокую эффективность. Прогноз макро- и микропористости в отливках, данный системой «Полигон», практически всегда подтверждался результатами заливки.

В серийном производстве проведение анализа с использованием моделирования в большинстве случаев позволило выработать рекомендации по снижению уровня брака по усадочным дефектам различной номенклатуры деталей и материалов: высоконагруженных лопаток турбин, корпусных деталей собственного производства и по заказам инофирм, фасонного литья.

В опытном производстве использование моделирования позволило получать первые экземпляры опытных отливок в короткие сроки без отработки конструкции ЛПС и параметров техпроцесса на опытных плавках или с минимальным количеством опытных плавов.

Для пользователя немаловажное значение имеет вопрос сроков проведения моделирования для выработки технологических решений.

На время вычислительного эксперимента влияют возможности самой CAD-системы, квалификация пользователя (при построении моделей) и быстрдействие вычислительной техники (проведение расчета)

Как показала практика, самым трудоемким (соответственно долгим) является этап генерации КЭ сетки по CAD-моделям.

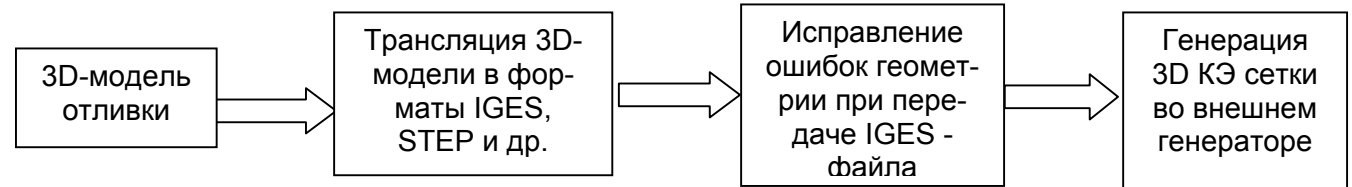
Для сокращения времени генерации КЭ сетки на «Салюте» используется CAD-система Unigraphics, имеющая встроенный генератор сетки. Так удается избежать потерь времени, связанных с исправлением ошибок геометрии, практически неизбежных при трансляции геометрических моделей в универсальные форматы передачи данных IGES, STEP и др. для передачи в сторонние генераторы. За время использования генератора КЭ сетки Unigraphics была отработана схема максимально эффективного его использования.

По результатам внедрения САМ ЛП «Полигон» могут быть сделаны следующие **выводы**:

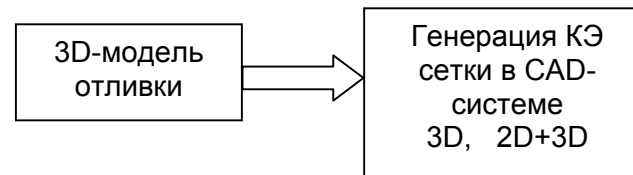
1. САМ ЛП «Полигон» может быть использована для оптимизации конструкции ЛПС для деталей практически любой степени сложности, а также температурно-временных параметров технологического процесса при литье в оболочковые формы, песчаные формы и в кокиль на воздухе и в вакууме.

Схемы генерации КЭ сетки

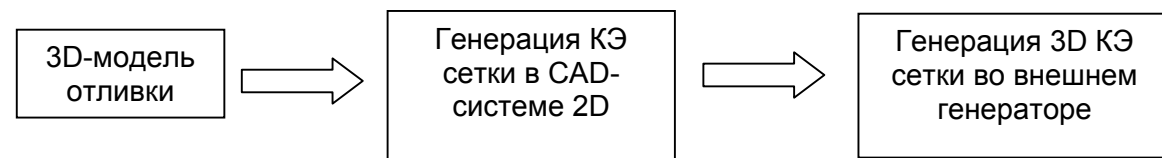
Применение внешнего генератора



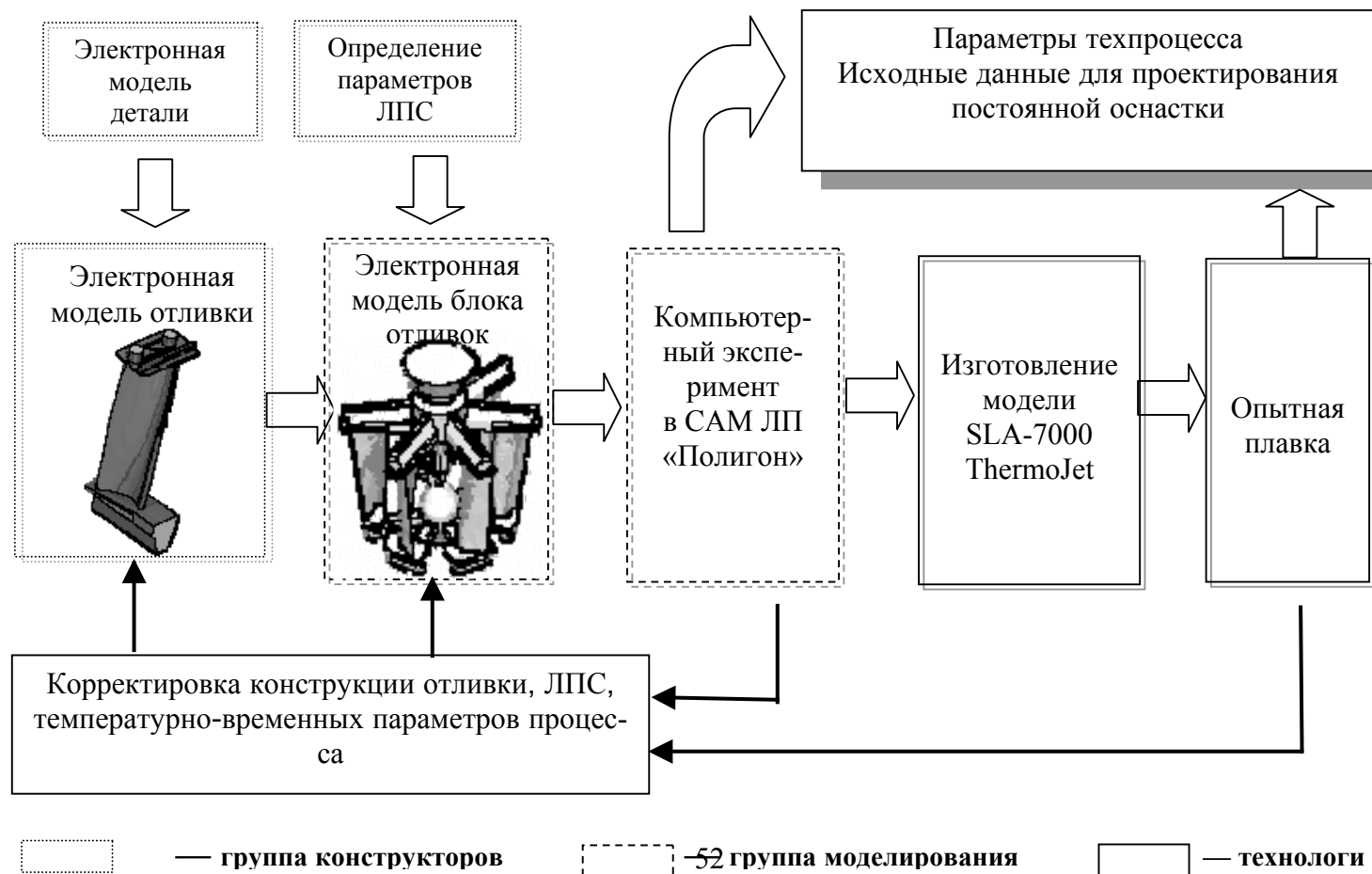
Применение генератора, встроенного в CAD-систему



Комбинированная схема
нескольких сопряженных тел со сложной геометрией



Технологическая схема запуска в производство литых деталей



2. САМ ЛП «Полигон» позволяет оценить эффективность ЛПС, предложенных технологом, на стадии разработки техпроцесса и выбрать наиболее оптимальный вариант для получения качественной отливки, не прибегая к опытным плавкам.

Применение САМ ЛП «Полигон» позволяет существенно сократить время отработки ЛПС, повысить качество принимаемых конструктивных и технологических решений при существенном сокращении материальных затрат на опытную отработку технологии литья.

Заключение.

Для улучшения адекватности результатов при моделировании литейных процессов на ММП «Салют» проводится работа по определению и уточнению исходных данных для расчета – температурных и временных параметров процесса, конструкции технологического оборудования, а также теплофизических свойств материалов.

Для эффективного использования САМ ЛП «Полигон» на ММП «Салют» создано подразделение, укомплектованное специалистами, имеющими знания в области технологии литейных процессов, теории тепло- и массообмена, в области металловедения литейных сплавов, математических методов численного решения дифференциальных уравнений, а также опыт математического моделирования технологических процессов.

На ММП «Салют» внедрена технологическая инструкция, которая определяет порядок освоения и запуска в производство литых деталей по выплавляемым моделям. Она предполагает внедрение передовых приемов отработки технологического процесса с применением систем автоматизированного моделирования литейных процессов.

**СКВОЗНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТЛИВОК С
ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОАО «АВТОВАЗ»**

Устинов А.Г., Калаев В.В. (ОАО «АВТОВАЗ»)

На ОАО «АВТОВАЗ» система автоматического моделирования литейных процессов «ПОЛИГОН» применяется с 2002 года. Технологическая цепочка работ деталь – литейная оснастка (подготовка производства) на ОАО «АВТОВАЗ» представляет собой следующее:

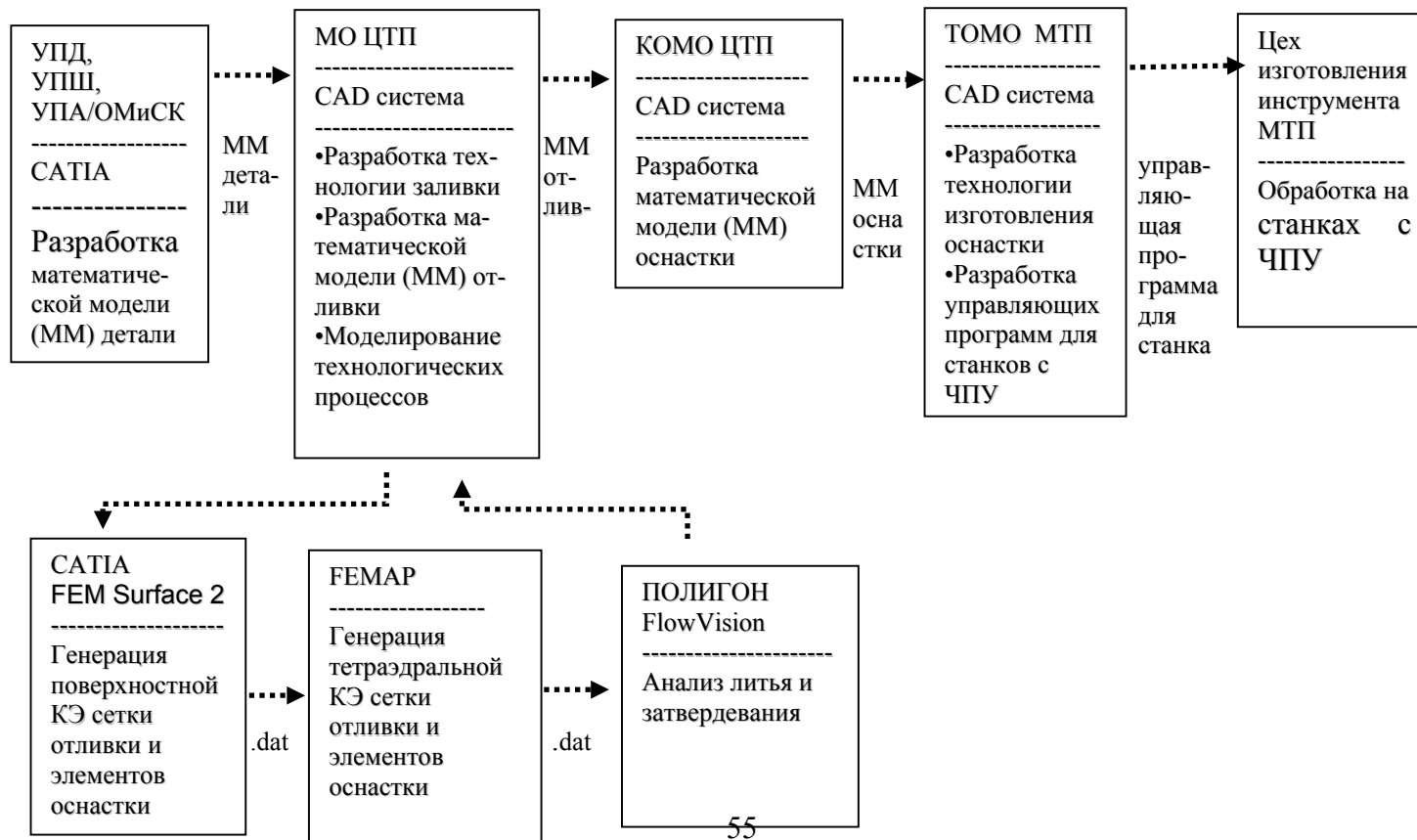
Служба главного конструктора (СГК) – Служба главного технолога (СГТ) – Металлургическое производство (МтП)– Цех оснастки (ЦО).

СГК разрабатывает математическую модель детали, СГТ проектирует отливку и оснастку, МтП разрабатывает технологию изготовления оснастки и управляющие программы, которые передают в цех, где непосредственно изготавливают оснастку. Система «ПОЛИГОН» применяется СГТ при проектировании отливки и оснастки, что позволяет еще на стадии проектирования проанализировать несколько вариантов конструкции отливки и оснастки, и выбрать наиболее оптимальные технологические параметры в каждом конкретном случае. При построении математических моделей отливки и оснастки используется ассоциативная связь между моделями. Данный метод позволяет: обеспечить ассоциативную связь между моделями для автоматизации проведения изменений на всей цепочке деталь-оснастка при проектировании в одной среде и исключить возможность несанкционированного изменения модели детали (разграничение ответственности технолог/конструктор детали).

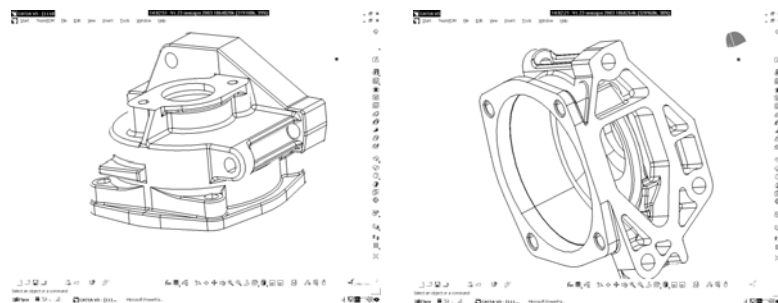
«Пилотным» проектом по внедрению данной системы была отливка «Корпус водяного насоса», изготавливаемая из алюминиевого сплава методом литья под давлением.

Проектирование элементов оснастки велось на основе модели отливки, при этом также использовался механизм ссылок для обеспечения ассоциативности и разделения ответственности технолог/конструктор оснастки. В данном проекте оснастка не была спроектирована полностью, были выполнены только модели стержней, литниковой системы, системы охлаждения.

Технологическая цепочка работ деталь-литьевая оснастка (подготовка производства) с использованием систем CAD/CAE

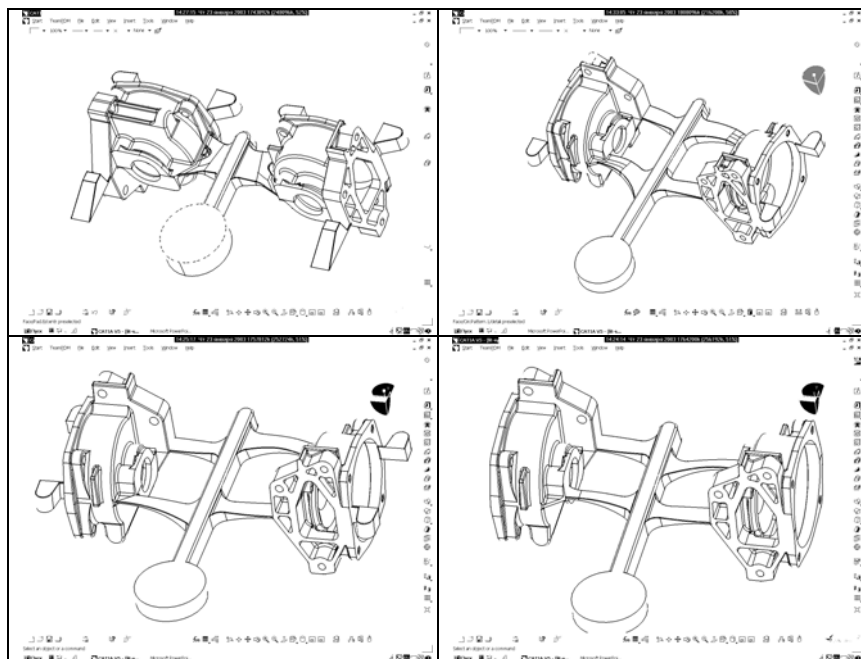


При создании моделей стержней обнаружилось, что одна из их кромок слишком острая. Исходная модель детали была признана непригодной для изготовления, для решения проблемы были согласованы изменения в детали (изменена конфигурация отверстия, формируемого проблемным стержнем). При внесении этих изменений в исходную модель все производные модели (заливки, стержней) перестраивались автоматически благодаря ассоциативным связям между моделями.



На стадии отладки системы сквозного проектирования были устранены ряд неточностей в геометрии детали (устранены ошибки плоского чертежа), устранены острые кромки стержней (потребовалось изменение конструкции), устранен ряд вопросов организационного характера. В процессе работ было предложено четыре варианта детали, каждый из вариантов был проработан на технологичность получения отливки. Из четырех проработанных вариантов был выбран тот, при котором стержни технологичны и конструктивно приемлемы. Выбранная математическая модель передана разработчику детали для выпуска изменений в конструкторской документации. Кроме того, по предложению технологов и с согласия разработчика детали было добавлено ребро в модели детали для улучшения заливки металла в форму.

Для выбранного варианте детали и отливки было разработано четыре варианта литейной оснастки. Каждый из вариантов был промоделирован в системе «ПОЛИГОН» на затвердевание и пористость, а также производилась оценка заполнения формы в системе «FlowVision». Вариант литейной оснастки, который обладал наилучшей заполняемостью формы, с минимальным процентом пористости и был передан в производство для изготовления оснастки.



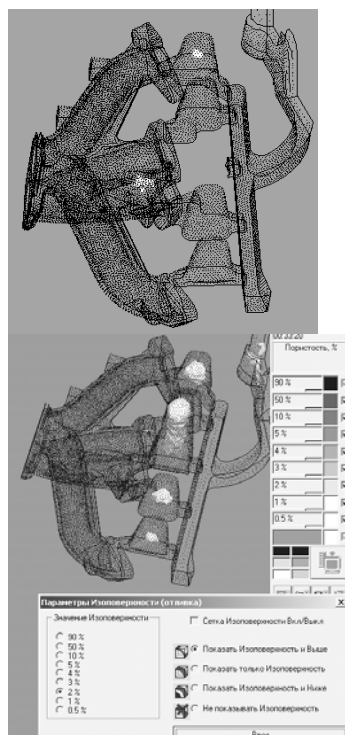
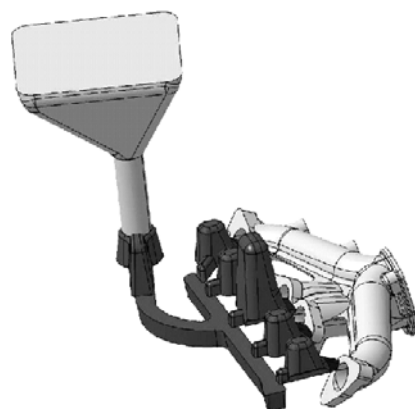
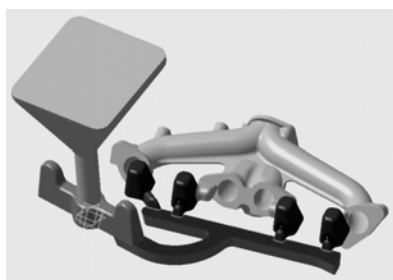
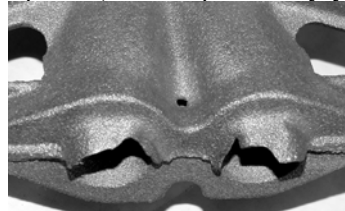
В ходе данного проекта отработаны основные этапы цепочки проектирования деталь-литейная оснастка в рамках одной среды в подразделениях ОАО «АВТОВАЗ». Используемые средства показали свою работоспособность. Использование специализированных модулей **CATIA - Core and Cavity Design 2 (CCV)** и **CATIA - Mold Tooling Design 2 (MTD)** может повысить уровень автоматизации проектирования литейной оснастки. Для полноценного внедрения опробованной технологии работ необходима разработка (или изменение) регламентирующих документов (требования к математическим моделям, определение номенклатуры деталей, описание процесса проектирования и т.п.).

Полноценное внедрение опробованной технологии работ обеспечит: безусловное повышение качества исполнения на всех этапах цепочки, сокращение сроков разработки, особенно существенное при изменениях детали.

С помощью системы «ПОЛИГОН» также возможно выявление ошибок в проектировании уже на изготовленной оснастке (действующее производство). В качестве примера, приведен анализ существующей литейной оснастки на «Коллектор выпускной».

Причиной для проведения математического моделирования литейных процессов в системе «ПОЛИГОН» на отливке «Коллектор выпускной» послужил высокий уровень брака газоусадочного характера. При изготовлении отливок по имеющейся оснастке и технологии имелся дефект в виде усадочной раковины на центральном фланце (брак достигал 17%).

Образование дефектов газоусадочного характера связано с геометрией отливки и свойствами материала (высокопрочный чугун).



Анализ имеющейся литниковой системы отливки показал, что при заданных технологических параметрах значение пористости на центральном фланце достигала 10%.

На основании расчетов пористости и температурно-фазовых полей был выявлен тепловой узел в теле отливки. Для его исключения на центральный фланец отливки была установлена дополнительная прибыль, объем которой был оптимизирован с помощью системы «ПОЛИГОН». Измененная литниковая система позволила полностью исключить образование усадочных дефектов на данной отливке. На сегодняшний день на ОАО «АВТОВАЗ» все оригинальные отливки на новые модели автомобилей проходят через процедуру моделирования в системе «ПОЛИГОН». Хочется отметить следующее: адекватность расчетов в системе «ПОЛИГОН» и реальных результатов, воспроизводимых на литейном участке, напрямую зависит от:

- точности построения математической модели,
- от соответствия оснастки математической модели оснастки,
- от точности воспроизведения технологических параметров, заложенных в расчетах и применяемых на литейном участке,
- от точности теплофизических параметров литейных сплавов и материалов формы, заложенных при расчете и реальных.

От того насколько верно заложены параметры при расчетах и какие реально используются в производстве можно получить совершенно противоположные результаты.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «ПОЛИГОН» НА ЗАО "РУСТ-95".

Р.А. Молчанюк (ЗАО "РУСТ-95")

Предприятие ЗАО "РУСТ-95" является производителем запорно-регулирующей арматуры условного прохода 15 – 250 мм и давления 16 – 160 атм. Отливки, которые выпускает литейный цех, после механической обработки, подвергаются испытаниям давлением воздуха, поэтому дефекты усадочного характера на отливках не допускаются. Одним из способов получения литейной технологии, удовлетворяющей данным требованиям, является использование системы компьютерного моделирования "Полигон".

Ввиду сжатых сроков изготовления заказов, не всегда удается помимо тепловой задачи, просчитать гидродинамическую. Здесь, как раз, приведен пример влияния гидродинамики на процесс затвердевания отливки.

На рис.1 представлена отливка, в первой партии которой имел место дефект усадочного характера, в месте присоединения верхней прибыли. Сначала был проведен тепловой расчет с равномерным распределением температур по всему сечению отливки. Как мы видим, дефекты не выходят за границы прибыли (рис. 2). После проведения гидродинамического расчета (рис. 3) было получено распределения температур на момент окончания заливки. Из рисунка видно, что часть прибыли заполнена металлом с более низкой температурой, чем в отливке. Дальнейший тепловой расчет (рис. 4) показал наличие дефектов в прибыльной части отливки.

В качестве вывода можно сказать, что помимо повышения точности расчета, использование модуля гидродинамики позволяет технологу более ясно представлять процессы, происходящие в литейной форме.

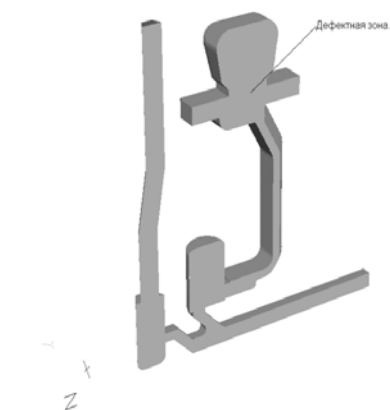


Рис. 1. Исходные данные: Марка стали – 25Л; Температура заливки – 1580 °С; Форма – ХТС.

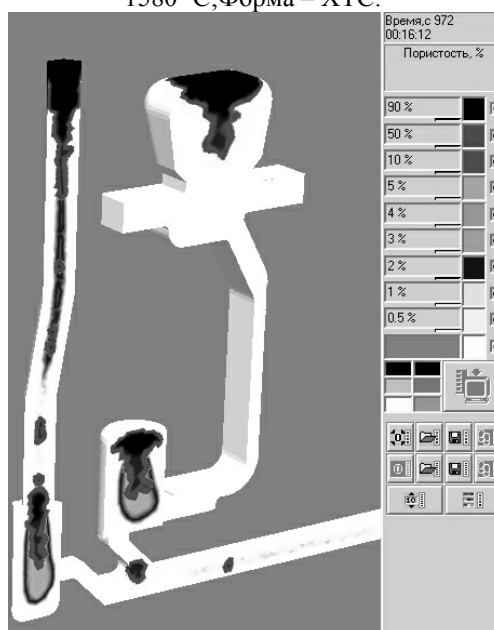


Рис.2. Распределение дефектов

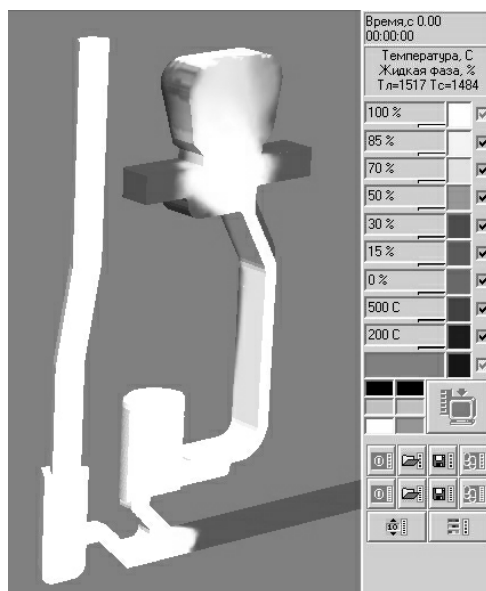


Рис. 3. Результаты гидродинамического расчета

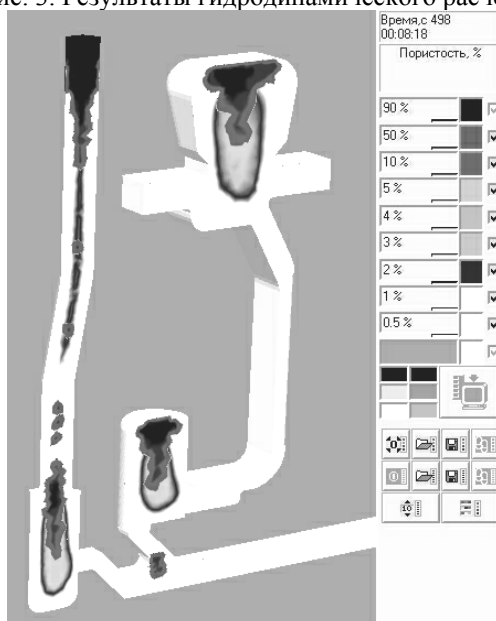


Рис. 4. Результат теплового расчета с учетом гидродинамики.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ КОРПУСНОЙ ОТЛИВКИ.

*Жеглов С.К., аспирант,
(Воронежский государственный технический университет)*

I. Экспертная оценка факторов, влияющих на процесс получения отливки.

В современном литейном производстве отработка технологии изготовления сложных заготовок, как правило, производится методом проб и ошибок [1].

Для того чтобы решить, какие критерии оказывают большее влияние на качество корпусных отливок, изготавливаемых методом направленного затвердевания, был численно реализован метод априорного ранжирования факторов (МАРФ).

Необходимо упорядочить в порядке убывания значимости следующие критерии, влияющие на качество корпусных отливок: 1) конструкция отливки; 2) конструкция литниково-питающей системы (ЛПС); 3) теплофизические свойства оболочки (литейной формы); 4) теплофизические свойства сплава; 5) температура заливки; 6) начальная температура оболочки; 7) температурный режим холодильника; 8) температурный режим печи; 9) динамический режим выведения заливной оболочки из зоны нагрева; 10) наличие вакуума в момент заливки; 11) положение оболочки в момент заливки. Для решения поставленной задачи используем мнения восьми экспертов, полученные ранги занесем в табл.1.

Таблица 1

Первоначальная матрица планирования

Эксперты	Критерии										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I	2	5	5	5	3	3	4	1	1	5	2
II	3	5	6	2	3	5	4	1	1	6	3
III	3	5	2	4	4	2	3	2	1	5	5
IV	2	7	4	5	5	5	3	2	1	6	6
V	3	7	6	6	7	6	5	2	1	7	4
VI	2	6	5	4	3	3	3	1	1	7	3
VII	1	6	3	4	4	5	3	2	1	6	3
VIII	2	5	3	4	3	4	2	1	1	5	3

Наибольшее значение при получении отливок, изготавливаемых методом направленного затвердевания, оказывают динамический режим выведения залитой оболочки из зоны нагрева, температурный режим печи и конструкция отливки (табл.3).

Таблица 2

Значения весовых коэффициентов

Номер	Критерий	Обобщенная сумма	Весовой коэффициент
1	Динамический режим выведения залитой оболочки из зоны нагрева	10,5	0,2855
2	Температурный режим печи	16,5	0,1817
3	Конструкция отливки	27,5	0,1090
4	Температурный режим холодильника	42,5	0,0705
5	Положение оболочки в момент заливки	48,5	0,0618
6	Температура заливки	54	0,0555
7	Начальная температура оболочки	54	0,0555
8	Теплофизические свойства оболочки	55	0,0545
9	Теплофизические свойства сплава	58	0,0517
10	Конструкция ЛПС	79	0,0379
11	Наличие вакуума в момент заливки и выведения залитой оболочки из зоны нагрева	82,5	0,0363

Изменение конструкции отливки в нашем случае не представляется возможным, т.к. существуют жесткие размерные требования. Соответственно по первым двум критериям необходимо проводить дальнейшую оптимизацию технологии.

II. Моделирование процесса затвердевания корпусной отливки.

Расчеты были выполнены на кафедре физики, химии и технологии литейных процессов ВГТУ при участии Воронежского механического завода (ВМЗ) и ЦНИИМ (г. Санкт-Петербург).

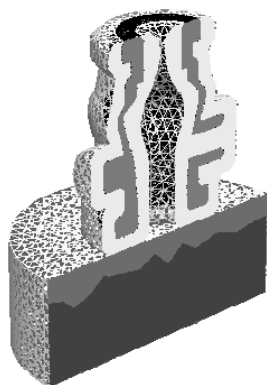
Была разработана база данных по теплофизическим свойствам материалов, используемых в производстве корпусных отливок.

Целью моделирования являлась разработка оптимальной ЛПС и расчет режима вывода формы из зоны нагрева.

Компьютерная модель отливки и формы в разрезе представлена на рис.1. Отливка эксплуатируется при рабочем давлении $\sim 45\text{МПа}$ и представляет собой деталь типа «Корпус» с протяженными тонкими стенками (преобладающая толщина 4 мм), относительно массивными фланцами и бобышкой, что не позволяет обычными способами литья добиться выполнения принципа направленного затвердевания.

Способ изготовления - литье по выплавляемым моделям (ЛВМ). В качестве формы используется огнеупорная керамическая оболочка толщиной $\approx 10\text{мм}$ на основе плавленного кварца.

Высота отливки 130 мм. Сплав 08Х14Н7МЛ (ВНЛ-1).



Температура заливки сплава $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заливка происходит в форму, предварительно нагретую до температуры $1400\ldots 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Особенностью этой отливки является то, что она изготавливается методом протяжки в вакуумной печи из более горячих зон в более холодные с целью обеспечения направленного затвердевания.

Также с этой целью отливка помещается на медный водоохлаждаемый холодильник

Рис.1. Расчетная компьютерная модель

($\varnothing 180\text{ мм}$, высота 75 мм), на выходе из которого температура воды составляет $40\ldots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Изначально был задан следующий режим вывода: $v_1=0\text{ мм/мин}$, $\tau_1=5\text{ мин}$; $v_2=8\text{ мм/мин}$, $\tau_2=6\text{ мин}$; $v_3=0\text{ мм/мин}$, $\tau_3=5\text{ мин}$; $v_4=4\text{ мм/мин}$, $\tau_4=10\text{ мин}$; $v_5=0\text{ мм/мин}$, $\tau_5=5\text{ мин}$; $v_6=8\text{ мм/мин}$, $\tau_6=6\text{ мин}$; $v_7>50\text{ мм/мин}$.

Предварительные расчеты температурно-фазовых полей показали, что начальная выдержка ($\tau_1=5$) мин залитой формы в печи не является оправданной. В этот момент происходят процессы затвердевания нижней части отливки на расстояние порядка 15 мм и

сильный разогрев верхней части оболочки. В области фланцев этот разогрев может впоследствии привести к образованию усадочных дефектов и трещин.

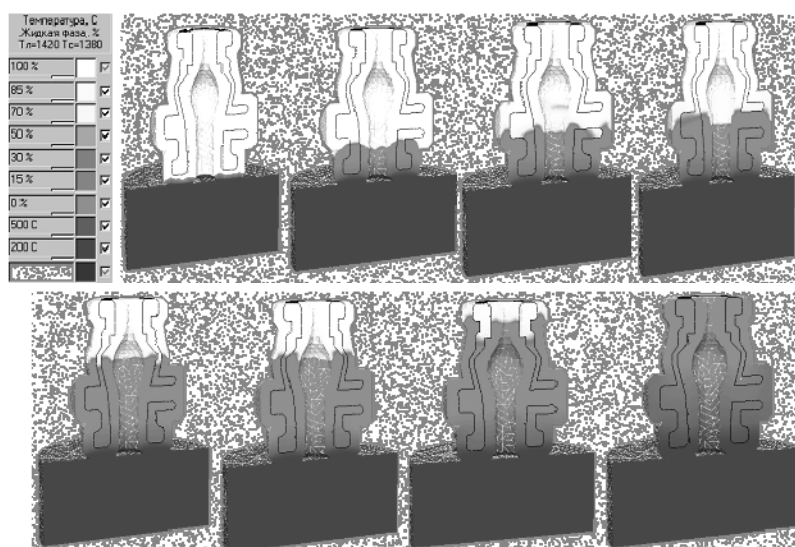


Рис.2. Расчетное распределение температурно-фазовых полей отливки и формы по оптимальному варианту

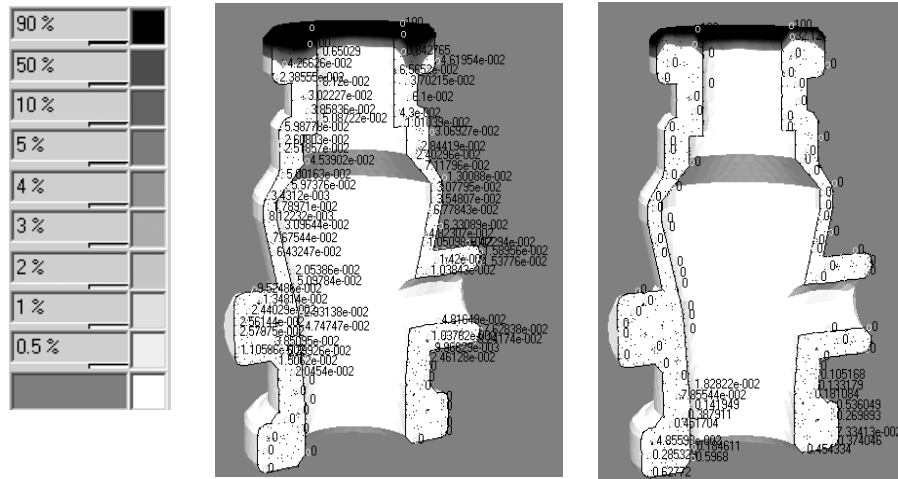
После проведения расчетов с учетом разных температурных и динамических режимов был выбран наиболее оптимальный вариант, рис.2, где видно, что движение фронта затвердевания (температура ликвидуса $T_L=1420$ °C, температура солидуса $T_S=1380$ °C) происходит последовательно и ширина двухфазной зоны минимальна. Темным цветом показана температура ниже T_S .

На основании теплового расчета был проведен расчет усадочных дефектов (рис.3).

Рис.3б отображает результаты расчета пористости по оптимальному варианту после 5 мин с момента заливки. В нижней части фланца (на расстоянии до 7...8 мм от границы раздела с оболочкой) микропористость может достигать до 0,7 %, это связано с очень интенсивным теплоотводом и значительным градиентом температур в начальный момент времени.

На рис.3в показан конечный результат расчета дефектов по оптимальной технологии ($v_1=8$ мм/мин, $\tau_1=6$ мин; $v_2=0$ мм/мин, $\tau_2=5$

B)



Результаты процесса моделирования формирования корпусных отливок были подтверждены заводскими исследованиями литых заготовок, полученных по расчетным температурным режимам и параметрам:

- 67

О ВНЕДРЕНИИ САМ ЛП «ПОЛИГОН» НА ОАО «ТМЗ»

Максимова Н.В. (ОАО «ТМЗ»)

«Турбомоторный завод» - машиностроительное предприятие, в рабочий цикл которого входят различные производства, в том числе и металлургическое. Предприятие отливает сложные корпусные детали для дизелей, а также лопатки для турбин. В производстве литейных деталей применяются различные технологии: в кокиль, по выплавляемым моделям, в оболочковые формы, в песчано-глинястые формы, центробежное литье, литье под давлением. Дана работа посвящена моделированию процессов затвердевания в САМ ЛП «ПОЛИГОН» по технологии по выплавляемым моделям и центробежному литью.

По выплавляемым моделям рассчитывались 2 отливки: «Лопатка турбинная направляющая» и «Вытеснитель». Материал отливки – стальной сплав 20Х13Л, заливка производится в оболочку толщиной 5-6 мм, которая устанавливается в опоку, засыпанную смесью из кварцевого песка и измельченных остатков оболочки. Для увеличения производительности в форму устанавливалось несколько отливок. Температура заливки - 1640°C, теплопроводность формы достаточно низкая, поэтому в первую очередь интересовал вопрос влияния разогрева формы, из-за низкой теплопроводности, на образование пористости в отливках.

Для проверки существующей технологии был проведен расчет в пакете «Полигон». Моделирование показало, что в результате тесного расположения отливок в форме в частях отливок, прилегающих к этой области, образуются локальные зоны жидкого металла, которые изолированы от прибыли, что, естественно, приводит к образованию пористости. На рис.1 показана образовавшаяся пористость. На внешних кромках пористость порядка 50%, что не допускается конструкторскими требованиями к отливке.

Решено было увеличить размер стояка, увеличить припуск на входной кромке и засыпать сверху прибыль материалом из опоки, а для избавления влияния отливок друг на друга оставить только одну отливку в опоке. На рис.2 показан результат нового расчета пористости. Здесь мы видим, что в результате изменения технологии, пористости в отливке нет. После проведения моделирования была проведена опытная заливка в цехе, которая подтвердила правильность расчета.

Таким образом, в результате расчета в системе «ПОЛИГОН» были обнаружены причины возникновения брака.

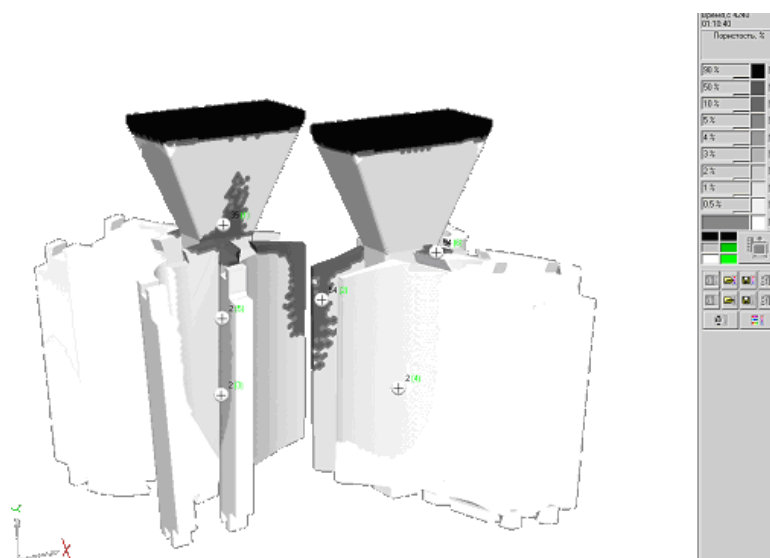


Рис.1. Распределение пористости в отливках

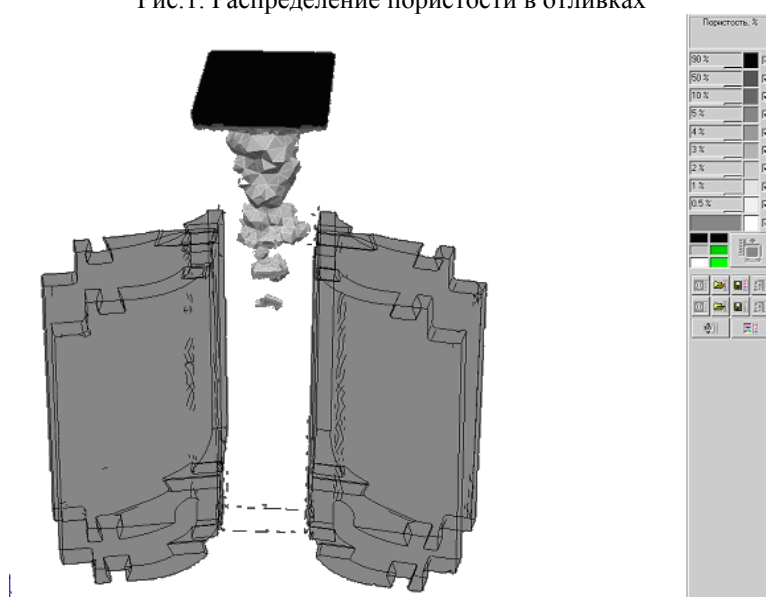


Рис.2. Распределение пористости в отливках по измененной технологии

Аналогично был рассмотрен процесс затвердевания в отливке «Вытеснитель». Так как деталь имеет небольшие габариты, в опоку устанавливалось 5 отливок. В результате середина опоки разогревалась так сильно, что не помогало даже засыпка прибыли смесью из опоки. Все тепло концентрировалось в центральной области, и из-за этого отливка, расположенная в середине, оставалась горячей дольше всего и в ней образовывалась самая большая усадка. Это можно видеть из рис.3. Пористость располагается также, как происходил отвод тепла, т.е. чем ближе к середине, тем больше значение. Засыпание прибылей сверху материалом формы на начальном этапе придает некоторую направленность затвердеванию (снизу-вверх), но в дальнейшем процесс повторяется, т.е. центральная часть формы также разогревается.

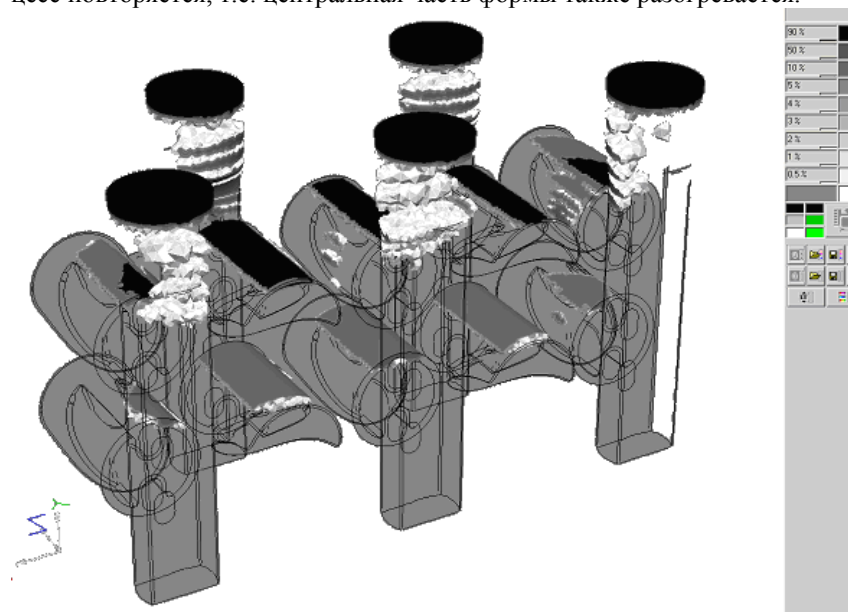


Рис.3. Распределение пористости в отливке

В пакете «Полигон» были просчитаны несколько различных вариантов технологии изготовления отливки.

Для улучшения существующей технологии и получения бездефектных отливок решено было: 1) проверить нормально ли работает стояк и 2) уменьшить взаимное влияние отливок друг на друга при остывании.

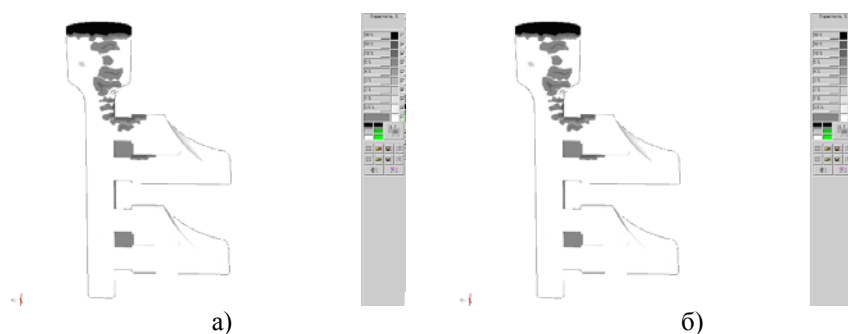


Рис.4. Распределение пористости в отливке в случае расположения одной отливки в опоке: с диаметром стояка по исходной технологии (а) и с увеличенным на 5 мм диаметром стояка (б)

Для уменьшения взаимного влияния отливок друг на друга решено было использовать большую по размерам опоку и изменить расположение отливок в форме: отливки устанавливались стояками к середине формы, а деталями ближе к краю, чтобы увеличить теплоотвод от деталей и создать направленность кристаллизации от детали к стояку.

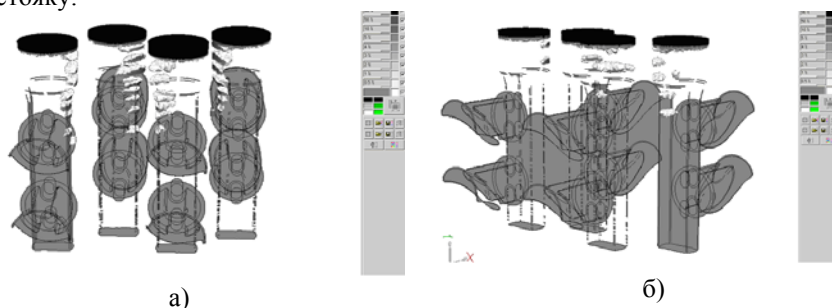


Рис.5. Распределение пористости в отливке

Из рис.5а видно, что результат, полученный по этому варианту гораздо лучше, так как дефекты в основном выходят в стояк практически во всех отливках (кроме одной, о которой говорилось ранее). Направленность затвердевания - от края отливка к стояку при данной технологии выполняется, но стояк все-таки слишком рано затвердевает сверху, что не позволяет до конца подпитывать отливку.

Для того чтобы стояк затвердевал снизу вверх возможно нужно увеличить высоту насыпанного слоя или закрыть отливку менее теплопроводящим слоем, например, асбестом. Решено было заменить

насыпку слоем асбеста такой же толщины (рис.5б). В этом случае мы получили еще более хороший результат: пористость больших значений (более 3%) вся выходит в стояк.

Следовательно, для уменьшения дефектов в отливках «Вытеснитель» необходимо использовать большую по размерам форму, изменить схему расположения отливок и, для уменьшения скорости теплоотвода от границы «отливка-среда», применить менее теплопроводный материал в качестве засыпки.

Таким образом, мы рассмотрели две технологии литья по выплавляемым моделям на предмет взаимного влияния отливок друг на друга при остывании и, как следствие, образования пористости при таких условиях. Выяснилось, что при использовании в качестве материала формы смеси из кварцевого песка и расположении в опоке двух или более отливок (в зависимости от габаритов) происходит сильный разогрев формы в центральной части и расположенных здесь же частей отливки, в результате чего в этих местах отливки образуется значительная пористость.

Центробежное литье анализировалось на отливке «Втулка». Материал отливки - чугун марки ЧВГ. Заливка производится в центробежную машину со скоростью вращения 900 об/мин. Отливки формовались в цилиндрическую земляную форму, которая помещалась в центробежную машину. Сверху для охлаждения форму поливают холодной водой с температурой 16°C. После заливки деталь вращается еще 50 минут.

Так как деталь заливается центробежным способом необходимо учитывать, что на внутреннюю поверхность действует центробежная сила, направленная от центра по радиусу. От горячего металла воздух сильно разогревается внутри центробежной машины и поэтому он достаточно быстро вытягивается из внутренней области. На его место поступает холодный, поэтому температура внутри примерно одинаковая и составляет по нашим расчетам 1000°C.

Учитывая все вышеизложенное, мы создали отдельную область разогретого воздуха внутри детали с постоянной температурой. Для учета центробежной составляющей силы, действующей на внутреннюю поверхность детали, мы построили не всю деталь, а только ее четвертую часть и расположили в пространстве таким образом, что вектор силы притяжения был направлен перпендикулярно к внутренней поверхности, т.е. так, как показано на рис. 7. Так как отливка симметричная, то процессы, происходящие во всей детали симметричны тем, которые будут рассчитаны в этой части.

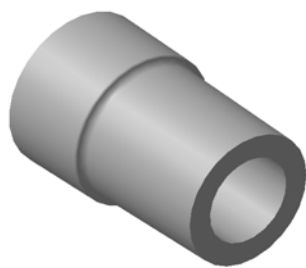


Рис.6. Деталь «Втулка»

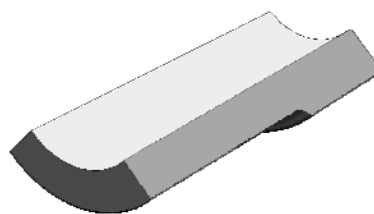


Рис.7. Расположение детали «Втулка» для расчета в системе «ПОЛИГОН»

При таком расположении детали вектор силы тяжести совпадает с направлением вектора центробежной силы, но суммарное значение этих векторов больше, чем вектор силы тяжести, поэтому для учета этого мы увеличили значения коэффициентов теплопередачи β_1 на границе между разогретым воздухом и отливкой до 50, на границе – «отливка-форма» до 1200. Охлаждение формы водой происходит очень неинтенсивно и форма очень сильно разогревается, поэтому в расчете учли как начальную температуру формы - 16°. Результат расчета приведен на рис.8.

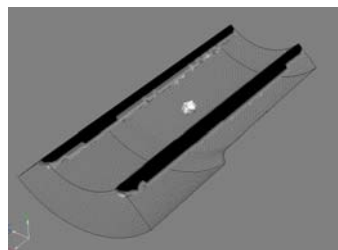
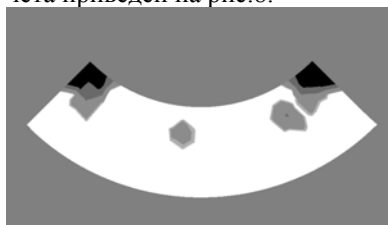
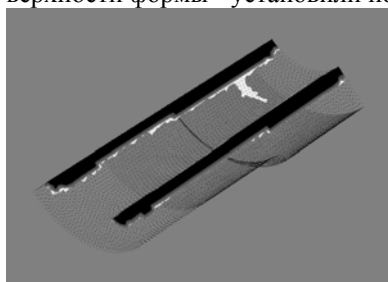


Рис.8. Распределение пористости в отливке

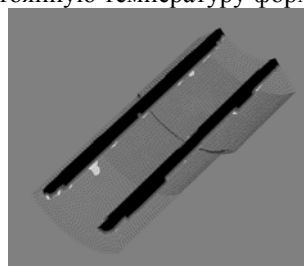
При расчете мы получили, что брак образуется под внутренней поверхностью небольшими «пятнами», в районе, где заканчивается холодильник. Причем значение пористости примерно 30-40% (пористость, образующуюся на краях, мы не учитываем, так как это погрешность нашей модели). В реальных условиях брак образуется именно в этой области, и при обработке детали этот брак обнаруживается.

Для выбора оптимальной технологии была проведена серия расчетов с различными вариантами технологии изготовления отливки:
- с увеличенным размером холодильника - 326 мм;

- с размером холодильника 300 мм;
- с засыпкой утепляющего слоя на внутреннюю поверхность отливки после заливки. В качестве засыпки использовали сварочный флюс;
- с использованием более интенсивного охлаждения по поверхности формы - установили постоянную температуру формы 16°C.



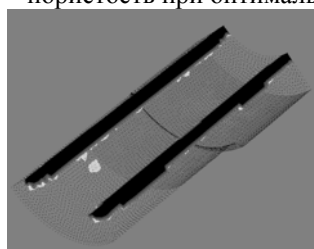
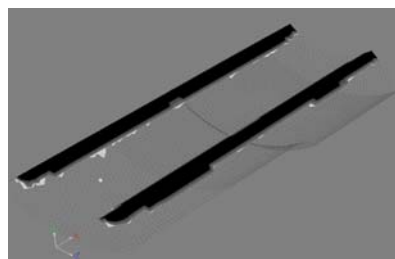
пористость при размере холодильника 326 мм.



пористость с интенсивным охлаждением



пористость при оптимальном размере холодильника 300 мм



пористости в отливке при засыпке утепляющего слоя



Рис. 9. Распределение пористости в отливке втулка при различных вариантах технологии.

При использовании более интенсивного охлаждения по поверхности формы пористость более 2% в отливке отсутствует, остается

только пористость около 1% на внутренней поверхности, что не влияет на качество (этот брак удаляется при обработке).

В результате проведенной работы мы выяснили, что в случае центробежного литья невозможно получить отливку совершенно без брака. Проблема заключается в том, чтобы минимизировать возможные дефекты и получить по возможности технологию, которую можно применить к существующим условиям, т.е. без больших капиталовложений. Поэтому решено было использовать технологию с оптимальным размером холодильника 300 мм, так для ее внедрения необходимо изменить только холодильник, и нет необходимости менять саму центробежную машину или конструкцию охлаждения.

ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗ НИХ КАЧЕСТВЕННЫХ ОТЛИВОК

А.А. Абрамов, д.т.н. (ФГУП «ЦНИИМ»)

Сплавы на основе алюминия привлекательны, прежде всего, из-за низкой плотности и высокой коррозионной стойкости алюминия и получают все большее применение в промышленности. Однако, если принять во внимание весь комплекс свойств основных конструкционных материалов на металлической основе, включая и цены, (табл. 1), то становится ясным, что конкурировать по объемам использования в машиностроении сплавы на основе алюминия не могут со сталями и чугунами. И дело не только в цене, но и в таком основополагающем свойстве для конструкционного материала как модуль нормальной упругости, обеспечивающий жесткость любой конструкции. Тем не менее, алюминиевые сплавы и, в том числе литейные, широко применяются практически во всех отраслях машиностроения.

Таблица 1

Свойства основных литейных конструкционных материалов

Свойства	Железо	Медь	Алюминий	Титан	Магний
Температура плавления, °С	1535	1080	660	1665	650
Плотность, г/см ³	7,86	8,94	2,7	4,51	1,74
Модуль упругости, МПа	20000	12250	7250	11200	4550
Уровень прочности литейных сплавов, МПа	500-1500	250-650	200-450	600-1000	200-350
ТКЛР, °С·10 ⁶	11,9	16,4	24	8,9	25,7
Электро-сопротивление, мкОм·см	10	1,72	2,68	55,4	4,4
Теплопроводность, кал/см·с·град	0,17	0,92	0,57	0,04	0,35
Цена листа, \$ за кг	0,5	3,0	2,0	15	4,0

ФГУП «ЦНИИМ» в соответствии со спецификой отрасли последние 30 лет активно занимается разработкой свариваемых коррозионностойких алюминиевых литейных сплавов на основе металлических систем Al-Mg (АЛ23-1), Al-Mg-Zn (АЛ24П), Al-Mg-Li (АЛ23-3),

Al-Si (АЛ9М). Механические свойства и эксплуатационные характеристики перечисленных сплавов в сравнении с наиболее распространенным деформируемым сплавом Д16Т приведены в таблице 2.

Если такие свойства высокопрочных литейных сплавов как временное сопротивление (σ_b), предел текучести (σ_{02}), твердость (НВ) мало отличаются от аналогичных свойств деформируемых сплавов, то свойства, определяющие надежность изделия или детали – пластичность (δ), ударная вязкость (ККУ), предел усталости (σ_{-1}) – существенно ниже у литейных сплавов и это объясняет, почему конструкторы в ответственных узлах предпочитают использовать деформируемые сплавы. В этом отношении исключением, пожалуй, являются только алюминиево-магниевого литейные сплавы (см. сплав АЛ23-1 в табл. 2).

В тоже время всегда есть большая номенклатура деталей, которые возможно изготовить только методами литья, поэтому литейные материалы и технологии и в настоящее время и обозримом будущем будут достаточно востребованными.

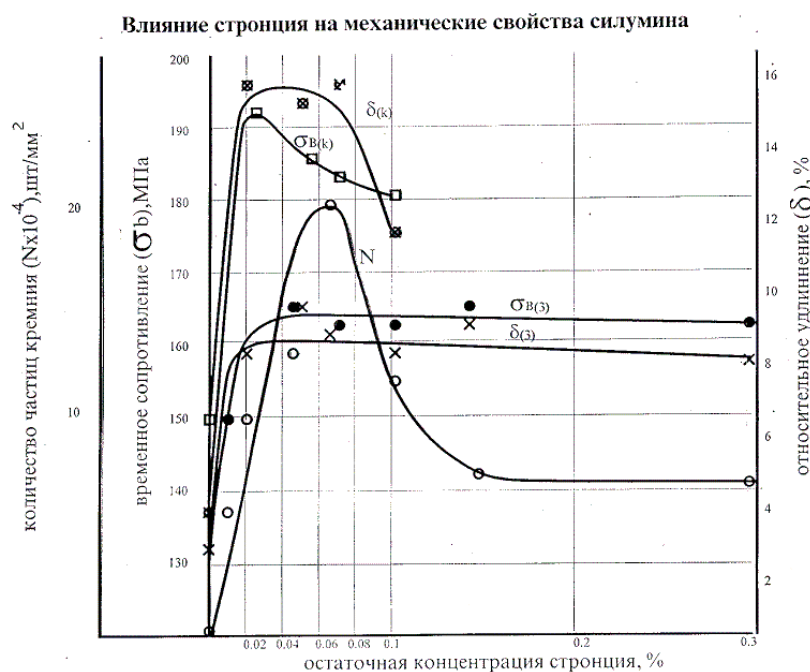


Рис.1.

Таблица 2

Марка сплава	γ , кг/м ³	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	HB	KCU, КДж/м ²	K _{1c} , Мн/м ^{3/2}	σ_{+1} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пор}$, МПа
АЛ23-1	2550	70,0	130	250	10,0	60	200	60	160	51	130
АЛ23-3	2470	77,1	277	380	4,0	121	25	22	50	51	70
АЛ24П	2750	68,9	372	460	6,0	140	100	24	200	51	95
АЛ9М	2660	71,0	250	340	3,0	100	80	18	200	65	240
Д16Т	2780	69,0	300	440	20	130	250	44	180	120	90

Таблица 3

Влияние содержания водорода на свойства алюминиевых сплавов

Сплав	Содержание водорода, см ³ /100г	Механические свойства		
		Прочность, МПа	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, кДж/м ²
АЛ9М	0,18	282	4,3	25
	0,05	350	7,1	40
АЛ23-1	0,40	276	9,8	230
	0,10	300	22,5	450
АЛ311	0,46	302	15,8	250
	0,25	355	18,3	600

Сравнительная эффективность технологий рафинирования

Технология	Остаточное содержание, % от начального	
	Водород	Оксиды
Вакуумирование	38	72
C ₂ Si ₆ (Дегазал)	12	31

Приготовление качественных алюминиевых сплавов предполагает безусловное выполнения ряда условий, обеспечивающих ограниченное содержание металлических (прежде всего, железа) и неметаллических (водорода и оксида алюминия) примесей, а также обработку расплава с целью получения заданной структуры сплава в твердом состоянии.

Примесь железа (а для сплавов на основе системы Al-Mg также примесь кремния) существенно снижает, прежде всего, пластичность и ударную вязкость сплавов (рис. 1). Для ограничения примеси железа необходимо в шихте использовать алюминий высоких марок (не ниже А8), а также ограничить применение железного литейного инструмента. Использование в плавильных и раздаточных печах чугунных тиглей недопустимо.

Примеси водорода и оксида алюминия, попадая в сплавы в основном из влаги в шихте, из атмосферы пламенных печей, из влаги воздуха, приводят к снижению всех механических свойств (табл. 3). Технологических приемов, снижающих содержание примесей водорода и оксида достаточно много, но для литейных алюминиевых сплавов, по

нашему мнению, наиболее эффективной и простой является обработка препаратами «Дегазер» или «Дегазал 200» в виде таблеток (табл. 3).

Наконец, одной из важнейших технологических операций является модифицирование. Сплавы на основе системы Al-Si (силумины) вообще нашли применение как конструкционные материалы только после открытия явления модифицирования кремния, то есть изменения морфологии кремния от пластинчатой к волокнистой.

Поначалу модифицирование силуминов проводили металлическим натрием, затем флюсами на основе смеси солей натрия, таких как хлористый и фтористый натрий. Однако обработка жидких силуминов флюсами довольно не стабильный процесс, требующий наличия в цехе участка приготовления и хранения флюсов, а при длительной разливке через каждые 30 минут требуется повторное модифицирование из-за испарения натрия. В настоящее время довольно широко применяется процесс модифицирования силуминов лигатурой алюминий-стронций. Модифицирование лигатурой простой и стабильный процесс; эффект модифицирования при использовании стронция сохраняется в течение 7-8 часов. Необходимая остаточная концентрация стронция в сплаве составляет 0,05-0,07 % масс. (рис. 2).

Не менее важным является и процесс модифицирования (измельчения) зерна в сплавах типа твердого раствора систем Al-Mg, Al-Mg-Zn, Al-Mg-Li и эвтектической колонии в силуминах. Самым распространенным модификатором зерна в алюминиевых сплавах является титан в виде лигатуры Al-Ti, иногда, особенно для литейных сплавов, используется флюс, содержащий бор. Однако в последние годы сначала для деформируемых сплавов, а затем для литейных сталей использоваться тройная лигатура Al-Ti-B. Эффективность тройной лигатуры в сравнении с двойной лигатурой и с флюсом демонстрирует таблица 4.

Отливки из силуминов могут изготавливаться всеми видами литья, поскольку эти сплавы имеют хорошую технологичность, то есть имеют достаточную жидкотекучесть и не склонны к образованию кристаллизационных трещин.

Высокопрочные сплавы типа твердого раствора менее технологичны и более чувствительны к скорости охлаждения при кристаллизации, поэтому при литье в песчано-глинистую форму или в вакуум-плечную форму необходимо широко применять холодильники.

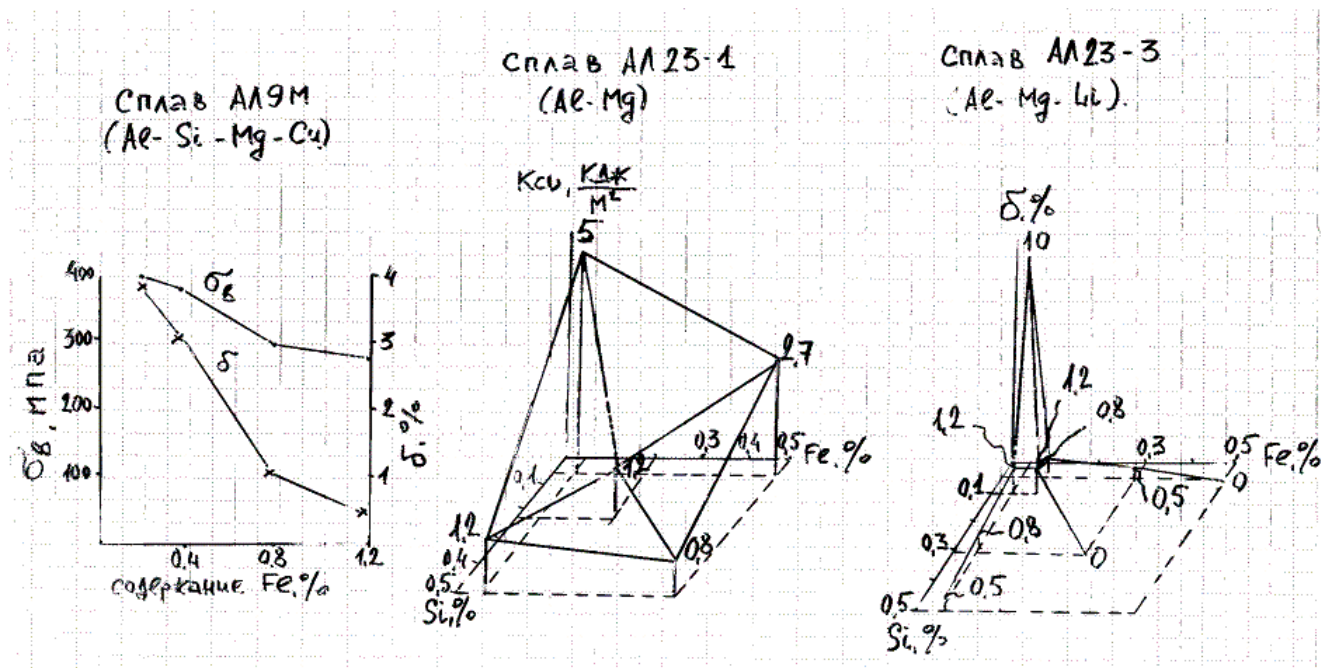


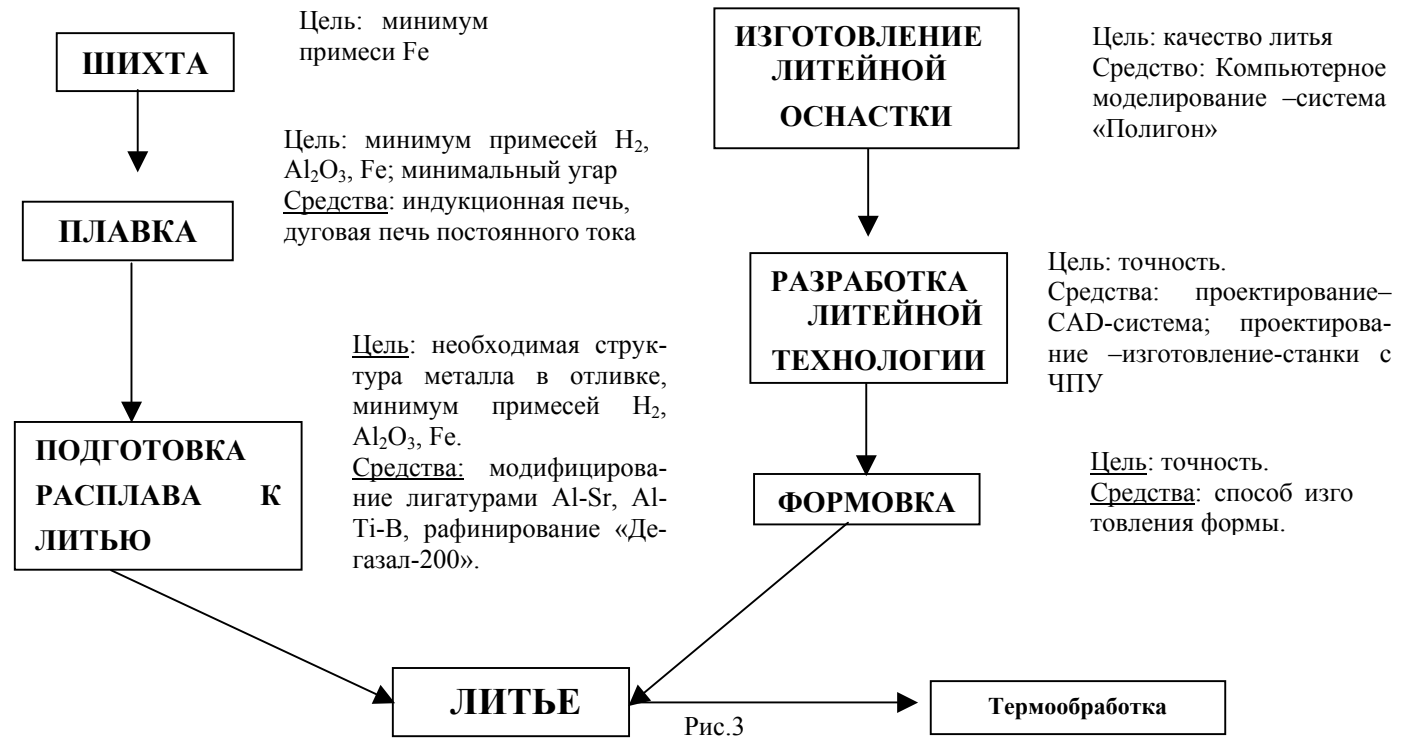
Рис.2

Таблица 4

Свойства высокопрочных алюминиевых сплавов, модифицированных тройной лигатурой Al+5%Ti+1%B

Марка сплава	Способ модифицирования	Механические свойства					Характеристика микроструктуры	
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B	δ , %	KCU, КДж/м ²	K _{IC} , Кгс/мм ^{3/2}	Дендритный параметр, мкм	Размер зерна, мкм
А99	—	—	—	—	—	—	—	970
	Al+3%Ti	—	—	—	—	—	—	155
	NaCl+KBF ₄	—	—	—	—	—	—	118
	Al-Ti-B	—	—	—	—	—	—	104
АЛ9М	NaCl+KBF ₄	320	375	4.0	60	125	32.8	—
	Al-Ti-B	320	375	4.2	60	125	21.3	—
АЛ24П	NaCl+KBF ₄	390	445	5.4	70	83	—	70.9
	Al-Ti-B	395	450	7.6	80	83	—	50.9
АЛ23-1	Al+3%Ti	140	295	22.0	570	158	—	109.1
	Al-Ti-B	140	300	28.0	700	195	—	70.5

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ОТЛИВОК



Особенно высокие свойства могут быть получены на сплавах типа твердого раствора при литье в кокиль и, особенно, при изготовлении отливок методом жидкой штамповки (табл. 5). В этом случае даже эксплуатационные характеристики (ударная вязкость, вязкость разрушения) литых заготовок приближаются к свойствам деформируемых заготовок.

Таблица 5

Сплав	Способ литья	Механические свойства					
		σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	δ , %	KCU, КДж/м ²	K _{IC} , МН/м ^{3/2}	НВ
АЛ24П	кокиль	328	425	7,1	69	44,4	121
	ЖШ	315	435	12,0	290	66,2	121
АЛ23-3	кокиль	262	388	5,1	30,3	70	107
	ЖШ	234	425	19,3	250	98	107

В целом технология получения высококачественного литья из алюминиевых сплавов может быть представлена схемой, изображенной на рис. 3.

Современный подход к изготовлению литейной оснастки.

Л.Ю. Денисов (ООО «Фокад»)

В настоящее время отмечено повсеместное продвижение на промышленных предприятиях компьютерной техники и технологий. Не стали исключением и литейные производства, на которых всё чаще можно встретить современные системы объёмного проектирования. В связи с этим представляет интерес опыт, накопленный специалистами компании ФОКАД по внедрению так называемой «сквозной» CAD-CAE-CAM технологии проектирования и изготовления модельной оснастки. При этом применительно к литейному производству специфичной является только компьютерная система для инженерного анализа (т.н. CAE –система) литейных процессов, две другие составляющие универсальные и как правило более широко распространены. Суть этого подхода заключается в том, что технолог работает с компьютерной моделью отливки – на её основе происходит построение элементов литейной технологии, её анализ и оптимизация, проектирование элементов оснастки и, наконец, создание управляющих программ для обработки на станках с ЧПУ. Такой подход имеет ряд преимуществ перед традиционными методами, когда технолог-литейщик на чертеже детали наносит элементы технологии, конструктор выпускает комплект конструкторской документации на литейную оснастку, технолог по механической обработке пишет технологию изготовления деталей оснастки и т.д.

Во-первых, сведена к минимуму «бумажная» стадия на этапе проектирования – вся работа ведётся на компьютере в трёхмерной CAD-системе – результатом являются трёхмерные модели отливки и элементов литейной оснастки. Во-вторых, использование системы компьютерного анализа литейной технологии «ПОЛИГОН» позволяет промоделировать на компьютере предполагаемые варианты технологии и избежать возможных дефектов отливки, а, следовательно, доработок (или переделок) оснастки, до того как эта оснастка будет изготовлена. И, наконец, современное обрабатывающее оборудование с ЧПУ выполняющее объёмную обработку одновременно в трёх координатах даёт возможность сократить количество элементов оснастки за счёт получения сложнопрофильных поверхностей в одной детали, при этом качество поверхности и точность изготовления практически исключают трудоёмкую операцию ручной доводки. Таким образом, существенно сокращается время от получения заказа (чертежа детали) до выхода модельного комплекта. Этот фактор подчас является весьма существенным - заказ на литьё получает тот завод, который предлага-

ет минимальные сроки выполнения. Что касается стоимости оснастки, то почти 3^{-х} –летний опыт работы и более двухсот различных комплектов оснастки показали, что при кажущейся на первый взгляд дороговизне подхода, наша продукция вполне может конкурировать с традиционной и по этому параметру.

Более конкретно особенности нашего подхода рассмотрим на примере отливки получаемой литьём по выплавляемым моделям. По чертежу детали полученному от заказчика строится 3D модель отливки со всеми технологическими элементами (уклонами, припусками, литниками, усадкой и т.д.). Мы используем в работе CAD-систему “Solid Works”. Модель отливки представлена на рис.1 На основе этой модели генерируется электронный чертёж с указанием технических требований к отливке и согласовывается с заказчиком. В некоторых случаях согласовывается сама модель отливки. Затем строится модель формы – в случае ЛВМ это корка и опорный наполнитель (если он используется). В системе ПОЛИГОН моделируется литейная технология – проводятся гидродинамический, тепловой и усадочный расчёты с соблюдением температурных, временных и других параметров. Свойства сплава и материалов формы берутся из обширной базы ПОЛИГОНа. Результаты усадочного расчета, обработанные в постпроцессоре ПОЛИГОНа, представлены на рисунке 2.

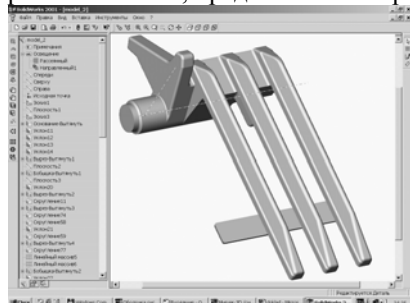


Рис.1. 3D модель отливки

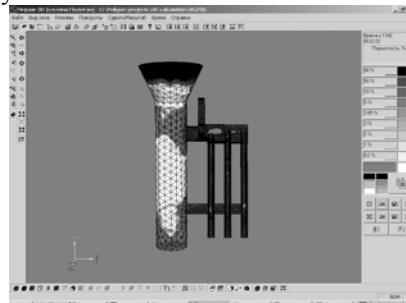


Рис.2. Результат усадочного расчёта

Как видно, все дефекты сосредоточены в стояке, а в теле отливки присутствует лишь незначительные области с микропористостью не превышающей 1% об., что удовлетворяет техническим требованиям предъявляемым к этой отливке. Теперь, когда мы уверены в годности технологии, приступаем к проектированию пресс-формы. На рисунке 3 показана промежуточная модель сборки пресс-формы. Полученные модели элементов пресс-формы передаются в САМ-систему для генерации управляющих программ обработки для станка с ЧПУ.

После чего формообразующие поверхности обрабатываются на трёх-координатном фрезерном станке – мы используем немецкий станок «DECKEL». На рисунках 4 и 5 представлены полуматрица и вкладыш, а также пресс-форма в сборе с контрольной восковкой.

Время, затраченное на разработку, согласование и изготовление пресс-формы составило 3 недели.

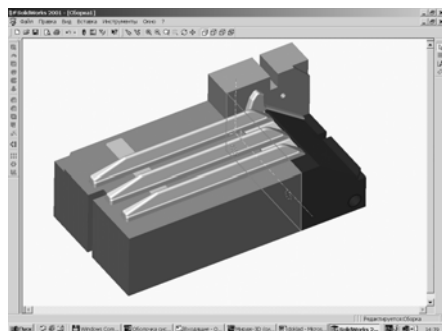


Рис.3 Модель сборки пресс-формы

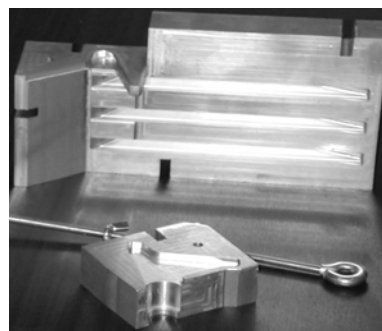


Рис.4 Детали пресс-формы

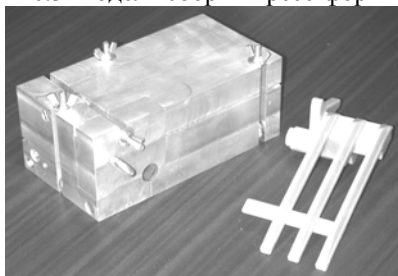


Рис.5 Пресс-форма и контрольная восковка

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ФОРМОВКА – ПРОЦЕСС
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ И
СТЕРЖНЕЙ ЗАМОРАЖИВАНИЕМ ВОДНЫХ ВЯЖУЩИХ
СУСПЕНЗИЙ (ШЛИКЕРОВ).**

С.М. Глебов (*ЦНИИМ-Инвест*)

Факт коагуляции водных растворов коллоидного кремнезема при замораживании был описан еще в 1889 году Н. Любавиным. При этом отмечалось, что коагуляция может носить необратимый характер. Изучению этого явления было посвящено много работ.

Считалось, что формирование твердых структур при замораживании гидрозолей происходит в результате механического сжатия твердой фазы между растущими кристаллами льда и увеличения объема жидкости (воды) при фазовом переходе [1, 2]. Это представление было опровергнуто при изучении воздействия замораживания на коагуляты, где в качестве интермицеллярной жидкости использовался бензол, не расширяющийся при фазовом переходе [3]. Известно мнение о решающей роли электролитов, концентрация которых увеличивается при вымораживании жидкой фазы [4].

Попытки применения замораживания для формования изделий из кварцевой керамики [5] не получили дальнейшего развития из-за высокой пористости материала, по сравнению со шликерным литьем в гипсовые формы.

Специфической особенностью керамических изделий, отверждаемых замораживанием, является сквозная ориентированная пористость, что при изготовлении литейных форм и стержней является скорее преимуществом чем, недостатком. Но, способ изготовления форм и стержней замораживанием суспензий на основе гидрозоля двуокиси кремния [6] не доведен до практического применения. Вероятно, это связано с отсутствием единых представлений о механизме процесса, особенно его необратимости.

Исследования воздействия замораживания на различные категории воды в составе вяжущих суспензий (шликеров), проведенные специалистами ОАО «ЦНИИМ- Инвест» в 1987...1990 годах, позволили определить закономерности, приводящие к необратимому отверждению суспензий не только на основе гидрозоля двуокиси кремния.

Оптимальные параметры замораживания, приводящие к необратимому отверждению водных вяжущих суспензий, легли в основу низкотемпературной формовки (НТФ - процесса).

НТФ – процесс включает небольшое число простых по движе-

ниям технологических операций (рис. 1). Приготовление суспензии, которая по своей сути состоит из огнеупорного материала и воды, осуществляют смешиванием пылевидного наполнителя с гидрозолем в быстроходных лопастных смесителях (1500...2000 об/мин) или мокрым помолом огнеупорного материала в шаровой мельнице.

Изделия изготавливают замораживанием керамической суспензии в контакте с охлаждаемой формообразующей оснасткой. После отделения от оснастки, замороженный полуфабрикат подвергают сушке и обжигу для обезвоживания и придания требуемых физико – механических свойств, которые зависят, главным образом, от влажности исходной суспензии (рис. 2) и температуры обжига изделия. (рис. 3)



Рис. 1 Принципиальная схема НТФ - процесса

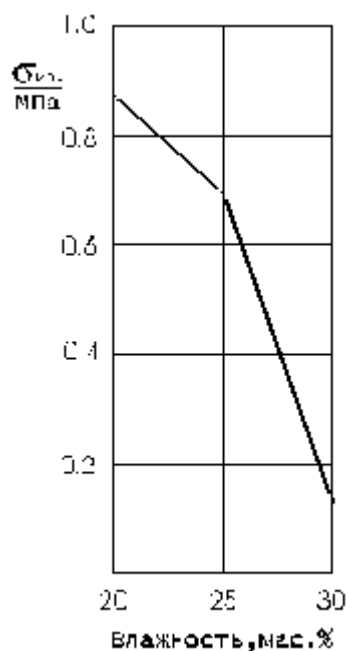
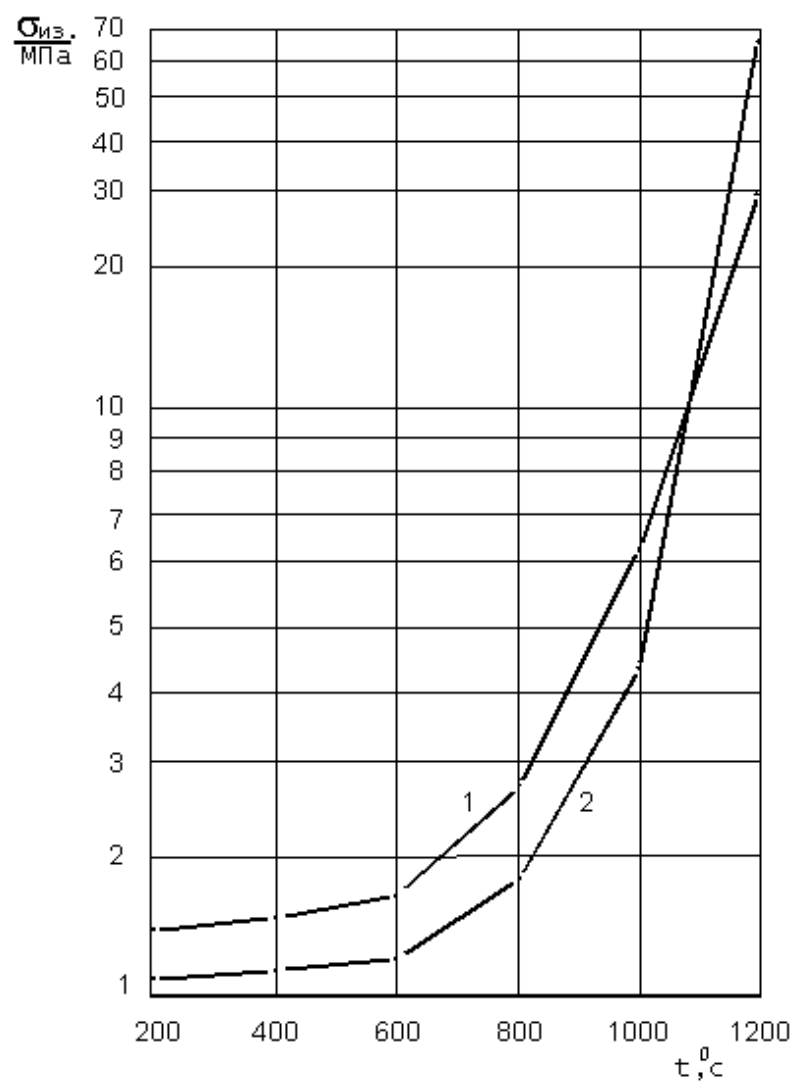


Рис. 2. Зависимость прочности кварцевой керамики при изгибе от влажности исходной суспензии.

Для изготовления форм и стержней используют преимущественно металлическую оснастку из сплавов с хорошей теплопроводностью. Не исключается использование постоянных моделей из пластмассы, резины и разовых моделей из пенополистирола или замороженной воды.

Увеличение объема суспензии при замораживании обеспечивает точное воспроизведение конфигурации и размеров формообразующей оснастки. Эта особенность НТФ – процесса в сочетании с небольшой, в пределах 0,5 %, и стабильной усадкой керамики при обжиге позволяет получать отливки 4-7 классов точности по ГОСТ 26645 – 85 с поверхностью, оцениваемой параметрами шероховатости R_a на уровне 1,35...3,20 мкм. Возможность использования широкого спектра огнеупорных материалов, а также возможность изменения физико – механических свойств керамики в широких пределах для достижения оптимального сочетания прочности форм и стержней при заливке с выбиваемостью, делают НТФ – процесс применимым при изготовлении отливок из любых литейных сплавов.



1-кварцевая керамика
 2-корундовая керамика, приготовленная
 на гидрозоль SiO_2 .

Рис. 3. Зависимость прочности керамики от температуры обжига.

В современных условиях важным преимуществом низкотемпературной формовки является высокая стабильность технологических операций во времени. Процесс не подвержен влиянию таких внешних факторов, как сезонные колебания температуры воздуха в литейном цехе, что имеет место при использовании формовочных материалов химического отверждения. Все параметры процесса управляемы и легко контролируются, удовлетворяя достаточно жестким требованиям системы качества по международным стандартам ISO серии 9000. В сочетании с небольшим количеством и простотой технологических движений создаются условия для достижения высокого уровня автоматизации производства.

Особенно следует отметить экологическую безопасность НТФ – процесса. При изготовлении литейных форм и стержней не используются материалы, загрязняющие окружающую среду и атмосферу в литейном цехе. Применение низкотемпературной формовки не требует проведения специальных мероприятий по охране окружающей среды и не создает проблем с утилизацией отходов.

Использование однородных по химическому составу огнеупорных наполнителей и связующих материалов (гидрозолей) позволяет регенерировать огнеупорный наполнитель простым дроблением и сепарацией.

Рассматривая область применения низкотемпературной формовки, следует выделить номенклатуру отливок с повышенными требованиями к размерной точности и шероховатости поверхности. Например, рабочие колеса центробежных насосов, компрессоров и т.п. Возможно использование керамических стержней при литье в сухие песчаные формы (вакуум – процесс, оболочковое литье и т.п.), при литье по выплавляемым моделям, при литье в металлические формы.

НТФ – процесс может успешно конкурировать с технологиями изготовления стержней из ХТС при формовке по вакуум - процессу. При сравнительно высокой стоимости формовочных материалов, оболочковые керамические стержни обладают меньшей массой, упрощают задачу разделения формовочного песка и стержневой смеси, устраняют проблемы с образованием пригара на отливках со стороны стержня, при заливке не выделяют газообразных продуктов способных, растворяясь в воде, образовывать щелочи и кислоты, вызывающие коррозию деталей водокольцевых вакуумных насосов, особенно при замкнутой системе водооборота.

Кроме литейных форм и стержней, низкотемпературной формовкой можно изготавливать элементы теплоизоляции, тигли и ряд других керамических изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hazel F. Effect of freezing on the Stability of Colloidal Dispersions. J. Phys. 2 Coll. Chem., 1947, 51, p. 415-425
2. Айлер Р. Химия кремнезема. – М.: Мир, 1982, 2 ч. 1106 с.
3. Вольхин В.В., Пономарев Е.И. Действие замораживания на свойства коагулянтов гидрозолей металлов. – Коллоидный журнал, 1965, т. 27, с. 14
4. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. – М.: Химия, 1964, с. 331.
5. Суздальцев Е.И. Закономерность формирования заготовок кварцевой керамики при намораживании из водных суспензий. – Огнеупоры, 1982, № 4, с. 52-54.
6. Phels E.H. low temperature Formation of investment wolds. – Modern Casting, 1968, V.54, № 2, p. 80-83

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИТЬЯ МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ФОРМОВКИ.

В.П. Кузнецов, д.т.н.. (ЦНИИМ-ИНВЕСТ)

Рост потребности в высококачественных отливках для различных отраслей промышленности заставляет предприятия, выпускающее литье, проводить реконструкцию действующих производств на основе новых технологий и с заменой морально и физически устаревшего оборудования. При этом во главу угла ставятся не только объемы производства и качество литья, но и технико-экономические показатели производства: объем инвестиций и сроки окупаемости затрат, текущие затраты на выпуск единицы продукции, экологическая безопасность.

В связи с этим существенно обострилась конкурентная борьба между фирмами, поставляющими различные виды оборудования для изготовления форм и стержней по разным технологиям. В основном идет конкуренция между технологиями литья в песчано-глинистые формы (ПГС), в формы из нескольких типов холодно-твердеющих смесей (ХТС), в формы, изготавливаемые методом вакуумно-пленочной формовки (ВПФ), за рубежом получившим название как "литье по вакуум-процессу". При этом каждый сторонник той или иной технологии упирает на достоинства этого процесса, но умалчивает его недостатки.

Нами и фирмой "Генрих Вагнер Синто", производящей оборудование по всем трем технологиям, был проведен, как нам кажется, достаточно беспристрастный анализ преимуществ и недостатков каждой технологии формообразования. Причем этот анализ проведен как для мелкосерийного, так и для крупносерийного производства. Результаты этого анализа в условных баллах представлены в таблице (балл 1 означает "отлично", балл 5 - "плохо").

Результаты качественного анализа убедительно свидетельствуют, что по всем показателям технология литья по вакуум-процессу имеет существенные преимущества. Практика применения этой технологии при мелкосерийном (на отдельных участках с производительностью 2...4 формы в час) и серийном производстве литья на автоматизированных линиях с производительностью 20...45 форм в час показала, что суммарная себестоимость литья снижается на 20...35%.

Какие доводы в основном выставляют противники применения технологии литья методом ВПФ? В первую очередь это касается "большого выделения пыли" при формовке и выбивке отливок. При этом в основном идет ссылка на работу отдельных установок, спроект-

тированных недостаточно профессионально и без достаточной конструкторской проработки устройств для заполнения форм песком, без обеспечения необходимой герметизации и вентиляции мест возможного пылеобразования. В конструкциях современного оборудования, выпускаемого фирмой "Генрих Вагнер Синто", все это учтено и системы заполнения форм сухим песком и выбивки отливок защищены достаточно надежно.

Таблица

Качественный анализ вариантов технологии изготовления отливок

Процессы изготовления песчаных литейных форм	V-процесс (вакуумно- плечный)	"Альфасет" (Alfaset)	"Фуран"	CO ₂ и ваку-	ПГС
Анализ по следующим параметрам					
1. Производительность (высок.)	1	4	4	2	2
2. Миним. требования к уровню классификации персонала	1	3	2	4	3
3. Возможность массового производства отливок	1	2	2	4	1
4. Стоимость модельной плиты	1	2	3	4	1
5. Стоимость формовочной смеси	1	5	4	2	2
6. Стоимость облицовочного или наполнительного песка	1	2	3	4	2
7. Мин. стоимость зачистки и мехобработки отливок	1	2	3	4	3
8. Общие затраты на энергию, включая затраты на формовку, регенерацию и очи- стку отливок	2	3	1	4	3
9. Мин. процентная доля отходов формовочной смеси	1	3	2	4	2
10. Простота выбивки	1	3	2	4	3
11. Чистота поверхности отливки	1	2	3	4	4
12. Размерная точность	1	2	3	4	4
13. Протяжка модельной плиты	1	2	3	4	4
14. Горячие трещины	1	4	5	2	3
Общий балл	15	39	40	50	37
Приведенный балл	0	24	25	35	22

В целом нужно заметить, что суммарное количество пыли, попадающей в атмосферу литейного цеха, при ВПФ на порядок мень-

ше, чем при изготовлении отливок в ПГФ. Только в последнем случае этот процесс практически неуправляем из-за постоянных просыпей на формовке, на выбивке, в смесеприготовительном отделении, на участке регенерации. Но к этому все привыкли и это не вызывает негативной реакции.

Вторым обстоятельством, усложняющим по мнению оппонентов применение технологии ВПФ, является сложность и трудоемкость изготовления модельной и опочной оснастки. Но это вызвано только неосведомленностью с фактической технологией изготовления оснастки. Технические требования к модельной оснастке для ВПФ практически не отличаются от требований к оснастке для других технологий. С учетом того, что оснастка при эксплуатации не изнашивается, доля ее стоимости в себестоимости литья значительно меньше, чем при других технологиях.

Третья претензия к технологии ВПФ заключается в том, что в России якобы не выпускается синтетическая пленка требуемого качества. Это тоже заблуждение. Технология производства пленки "сэвилен" в 1980 г. была освоена на трех предприятиях Минхимпрома и поставлялась предприятиям по техническим условиям ТУ 6-05-05-166. Эти предприятия и сегодня готовы поставлять эту пленку при условии, что объем заказа будет не менее 10 тонн.

Четвертое возражение основывается на мнении, что применение этой технологии требует высокой квалификации персонала. Ситуация здесь прямо противоположная. Поскольку для уплотнения сухого формового песка используется вибрация, при которой равномерное уплотнение песка по всему объему опоки достигается без участия рабочего и не зависит от качества смеси, квалификация формовщика практически не имеет никакого значения. Обучение рабочего персонала практически всем технологическим операциям осуществляется в течение нескольких часов непосредственно на рабочем месте. Разумеется, инженеры-технологи для квалифицированной разработки техпроцесса должны изучить особенности технологии, научиться вносить коррективы в конструкцию и размеры литниково-питающих систем, правильно формулировать требования к модельной оснастке.

Все перечисленные выше возражения оппонентов против использования в литейном производстве технологии ВПФ при ближайшем рассмотрении оказываются несостоятельными.

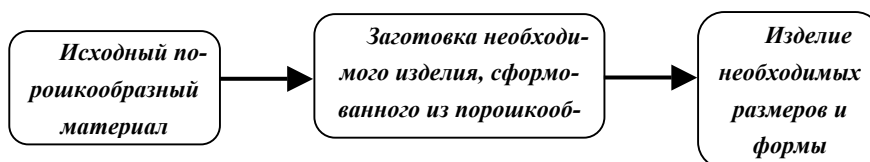
Учитывая высокое качество литья и низкую по сравнению с другими технологиями себестоимость, технология ВПФ займет достойное место в отечественном литейном производстве.

НОВЫЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

С.К. Гордеев, д.т.н. (ФГУП ЦНИИМ)

Углеродные и карбидные композиционные материалы отличаются высокие температуры плавления, твердость, прочность, эрозионная и коррозионная стойкость в газовых и жидких средах, низкий ТКЛР. Способность работать в особо жестких условиях вызывает большой интерес к подобным материалам. Однако, постоянно возрастающий интерес к использованию тугоплавких композиционных материалов сочетается с имеющимися на сегодняшний день рядом материаловедческих и технологических проблем в области их получения, что вызывает необходимость дальнейших исследований по разработке таких материалов, в том числе, и создание новых подходов к их получению.

С 1990-х годов в ЦНИИМ интенсивно развиваются новые, нетрадиционные подходы по получению углеродных и карбидных композиционных материалов. Суть этих подходов состоит в том, что уже на стадии изготовления заготовки из исходных веществ, как правило, порошков, формируется изделие требуемой формы. Затем производят преобразование состава, и структуры исходной заготовки материала посредством химических реакций. Правильный выбор химической реакции позволяет реализовать неизменность формы и размеров заготовки, получая конечное изделие требуемого состава и структуры. Схема получения материала в виде изделия заданной формы представлена на рис. 1.



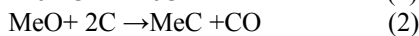
Стадии процесса: 1 - придание заготовке необходимых формы размеров (формование); 2 - осуществление химических реакций, не изменяющих форму и размеры, но преобразующих состав и строение материала заготовки.

Рис. 1 Получение изделий необходимых форм и размеров с использованием химических реакций в объеме заготовки.

Показанная схема обеспечивает не только практически 100%-

ное использование сырья и устранение стадий механической обработки высокотвердых материалов, но и достижение принципиально новых свойств качественно нового уровня свойств.

В наших исследованиях для осуществления процессов получения углеродных и карбидных материалов успешно применены химические реакции:



осуществляемые непосредственно в объеме заготовки требуемого изделия.

Задача разработки композиционных материалов карбид-металл, получаемых без изменений формы и размеров предварительно сформованных изделий потребовала выработки новых принципов осуществления процесса. Эта задача может быть разбита на две: получение пористого карбидного изделия и последующее заполнение пор металлом. Вторая стадия процесса может быть осуществлена методом пропитки карбидной пористой структуры в случае хорошего смачивания металлом поверхности карбида. Таким образом, в этом случае задача решается правильным выбором металла для пропитки и условий осуществления процесса.

Для получения пористого карбидного изделия нами были предложены новый метод, получавший название "высокотемпературный химический синтез". Суть метода поясняется рис. 2. В качестве исходных веществ используют порошки металлов или неметаллов, способных образовывать ковалентные или металлоподобные карбиды. Например, порошки бора, кремния, титана, хрома и др. Из порошков формуют требуемое изделие. Такая заготовка обладает пористостью, как правило, близкой к 50%. В поры заготовки осаждается пироуглерод путем термообработки заготовки в среде углеводородов (например, природного газа) при температурах 800-900°C. При этом за счет гетерогенной химической реакции (3) происходит образование пироуглерода, который послойно покрывает составляющие заготовку частицы и тем самым заполняет поры заготовки. Содержание пироуглерода в заготовке регулируется условиями осуществления процесса его синтеза, а именно - температурой и временем обработки.

После синтеза пироуглерода получаемые полуфабрикаты изделия представляют собой композиционный материал металл - пироуглерод, в котором имеет место плотное примыкание и равномерное распределение компонентов по объему получаемого изделия.

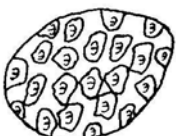
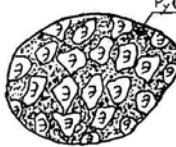
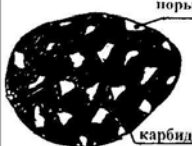
Стадии изготовления	Пояснения	Структура материала
Исходный материал (Э)	Порошки карбидообразующих элементарных веществ	
Изготовление заготовок	- прессование - шликерное литье - другие методы	
Введение пироуглерода (P _у C) в заготовку	Синтез из газовой фазы	
Высоко-температурный синтез	при температурах 800-2000°C	

Рис. 2 Схема последовательных стадий получения пористых карбидных материалов и изделий из них высокотемпературным химическим синтезом

В связи с тем, что карбиды практически всех элементов имеют отрицательный изобарно-изотермический потенциал их образования из простых веществ, полуфабрикат заготовки представляет собой метастабильную физико-химическую систему, преодоление активационного барьера в которой может быть осуществлено нагревом. Протекающая химическая реакция между используемым для изготовления заготовки простым веществом и пироуглеродом, приводит к образованию в объеме детали соответствующего карбида и формированию специфической пористой структуры.

Таблица 1

Некоторые расчетные соотношения по методу
высокотемпературного химического синтеза

Исходные вещества		Продукт синтеза		Содержание пироуглерода в полуфабрикате, необходимое для получения стехиометрического продукта		Пористость карбидного материала, % (при пористости заготовки 50%об)
состав	плотность г/см ³	состав	плотность г/см ³	грамм пироуглерода на 1 грамм исх. в-ва	% об (при пористости загот. 50%об)	
B	2,34	B ₄ C	2,51	0,28	16	40
Si	2,33	SiC	3,21	0,43	25	50
Ti	4,51	TiC	4,92	0,25	28	43
Zr	6,51	ZrC	6,73	0,13	21	45
Hf	13,3	HfC	12,6	0,067	22	44
V	6,11	V ₂ C	5,57	0,12	18	40
		VC	5,36	0,24	36	30
Nb	8,57	Nb ₂ C	7,86	0,065	14	38
		NbC	7,56	0,13	28	36
Ta	16,6	Ta ₂ C	15,0	0,033	14	43
		TaC	14,4	0,066	28	38
Cr	7,19	Cr ₂₃ C ₆	6,98	0,060	11	45
		Cr ₇ C ₃	6,92	0,10	18	43
		Cr ₃ C ₂	6,68	0,15	27	38
Mo	10,2	Mo ₂ C	9,04	0,062	16	40
		MoC	8,40	0,12	31	32
W	19,2	W ₂ C	17,2	0,033	16	40
		WC	15,6	0,066	32	34

На рис. 3 представлены рентгенограммы продуктов, полученных на последовательных этапах реализации процесса. Так в случае кремния, после введения пироуглерода в продукте присутствуют лишь кремний и углерод, а образование карбида кремния, причем в кубической бета-модификации, происходит при температуре около 1500°C. Заметим, что в случае титана на стадии введения пироуглерода уже наблюдается частичное образование карбида титана, которое происходит до конца при дальнейшей термообработке. В случае хрома практически полное образование карбидного материала происходит уже при температуре синтеза пироуглерода.

На представленной фотографии (рис.4) видно каркасное строение получаемых методом высокотемпературного химического синтеза карбидных материалов с высоким содержанием пор. Пористая структура получаемых материалов характеризуется узким распределением пор по размерам, которое задается размером частиц исходного материала. Небольшая ширина распределения представляет интерес для использования полученных материалов в фильтрах и мембранах.

В табл.2 приведены свойства карбидных материалов. Следует обратить внимание на то, что, несмотря на наличие высокой пористости, материалы обладают прочностью до 200 МПа при $E=160$ ГПа, а самое главное способностью сохранять практически неизменным этот уровень свойств при температурах 1000-1200°C, не изменяя своей пористой структуры. Эти особенности важны при использовании подобных материалов в качестве жаропрочных материалов и высокотемпературных носителей катализаторов.

Нами рассмотрен вариант использования в качестве реагента, вступающего в реакцию с пироуглеродом в объеме получаемого изделия, оксидов карбидообразующих элементов, например оксида хрома по реакции (2). Реакция оксида хрома с пироуглеродом протекает с большим эндотермическим эффектом и сдвигается вправо лишь при температурах выше 1100°C. Эксперименты показали, что проведение высокотемпературного химического синтеза при температурах около 1200°C обеспечивает достижения величин близких к расчетным по пористости, изменению массы полуфабрикатов изделий, а также по составу полученных материалов. Дальнейшее развитие подобного подхода позволит получать карбидные материалы в более широком интервале составов и структур.

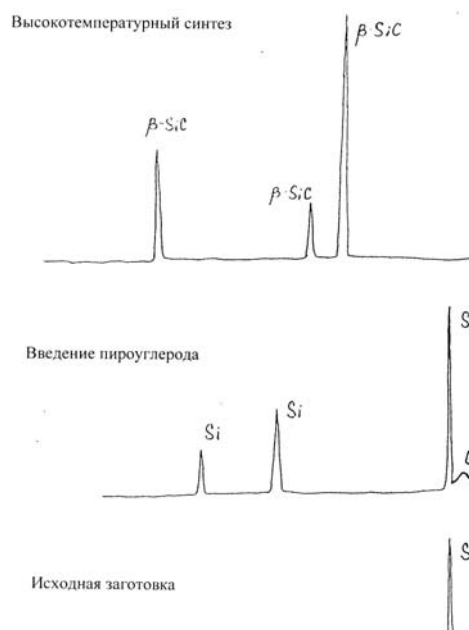


Рис. 3 Рентгенограммы продуктов на различных стадиях высокотемпературного химического синтеза

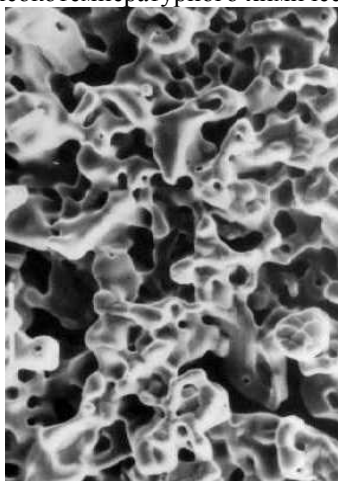


Рис. 4 Микроструктура пористого карбида хрома

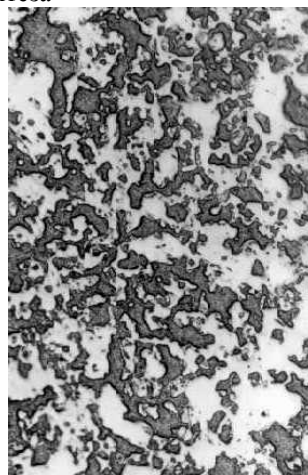


Рис. 5 Микроструктура каркасного композиционного материала карбид хрома – медь

Таблица 2.

Свойства пористых карбидных материалов, полученных методом высокотемпературного химического синтеза.

Состав	Плотность, г/см ³	Пористость, %об	Прочность при изгибе, σ , МПа			Модуль упругости, ГПа	ТКЛР, $10^{-6}/K^{-1}$
			20°C	1000°C	1200°C		
SiC	2,03	36	100	-	90	110	1,25
	1,76	45	65	-	-	80	-
Cr ₃ C ₂	5,32	20	200	200	-	160	7,5
	4,45	32	125	120	-	140	-
	3,62	43	35	-	-	40	-

Таблица 3.

Основные свойства композиционных материалов карбид-металл

Параметр	B ₄ C/Al-сплав	TiC/ Al-сплав	Cr ₃ C ₂ /Cu	TiC/TiNi
Плотность, г/см ³	2,565	3,75	7,80	5,55
Модуль упругости, ГПа	220	180	195	230
Предел прочности, МПа	400	430	460	500
Твердость по Роквеллу	45	30	20	65
Трещиностойкость, МПа*м ^{1/2}	-	9,5	9,8	18
Ударная прочность, кДж/м ²	-	-	-	4,4
Теплопроводность, Вт/м*К	73	70	80	-
Теплоемкость, Дж/кг*К	900	750	480	-
ТКЛР, 30-100°C, $10^{-6}K^{-1}$	10,2	11,0	-	9,0
Удельное электро-сопротивление, кОм*см	31	-	6,8	130
Удельный модуль, $E/\rho g \cdot 10^{-3}$, км	8,8	4,9	2,85	4,1
Удельная прочность, $\sigma/\rho g$, км	14,3	11,7	7,4	9,3

Наличие открытой пористости в карбидных материалах, полученных методом высокотемпературного химического синтеза, позволяет заполнить ее теми или иными компонентами, создавая тем самым каркасные композиционные материалы. В отличие от широко распро-

страненных матричных композитов, каркасные композиционные материалы представляют собой два взаимопроникающих каркаса.

Нами созданы композиционные материалы карбид-металл, которые получали пропиткой деталей из пористого карбидного материала алюминием, его сплавами, медью и другими металлами. На рис. 5 видны взаимопроникающие каркасы карбида и металла.

Материалы характеризуются высокой твердостью, хорошими механическими свойствами, низким ТКЛР (табл. 3).

Таблица 4.

Дугостойкость электродов из материалов Cr_3C_2 -Cu и меди

Состав изделия	Напряжение в дуге, В	Ток в дуге, А	Время работы, час	Количество электричества Q, Кл	Потеря массы, Δm , г	$\Delta m/Q$, мкг/Кл
Cr_3C_2 -Cu	1200	2,2	100	792000	1,75	2,2
	1200	4,5	10	162000	1,04	6,4
	960	7,9	10	284400	3,03	10,8
Cu	760	2,4	10	68400	119,2	1380

Перспективными областями применения подобных материалов являются износостойкие детали, антифрикционные узлы, электроконтактные детали. Заметим, что материалы очень устойчивы в электрической дуге (Табл. 4). Способность каркасных композиционных материалов сохранять форму детали после плавления металлического компонента и удерживать расплав за счет капиллярных сил обеспечивает возможность использования таких композитов в качестве теплоаккумуляторов и аблирующих систем.

ЛИТЕЙНЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК.

Шемонаева Г.А., к.т.н. (ФГУП ЦНИИМ)

Литейная лаборатория ФГУП «ЦНИИМ» создана в 1930г. (в 2005г. ей исполняется 75 лет).

Литейная лаборатория работает по двум основным направлениям: разработка литейных высокопрочных материалов и материалов со специальными свойствами и разработка и освоение новых технологических процессов.

В настоящее время основными материалами, которыми занимается лаборатория – литейные стали, чугуны и титановые сплавы, среди литейных технологий формообразования – литье по выплавляемым моделям, вакуумно-пленочная формовка, низкотемпературная формовка.

Начало разработки высокопрочных литейных сталей в ЦНИИММатериалов было положено в 60-е годы прошлого столетия. В то время была создана группа высокопрочных сталей типа 12ДН2ФЛ, 12ДХН1МФЛ и др., которые, наряду с высоким уровнем механических свойств, обладают хорошей свариваемостью. Стали нашли широкое применение в специальном и общем машиностроении, в том числе и при строительстве гидросооружений как у нас в стране, так и за рубежом (включены в ГОСТ 977-88).

В последующие годы на основании широких исследований, проведенных в ЦНИИМ, была разработана группа высокопрочных литейных сталей феррито-перлитного, бейнитного, мартенситного классов и мартенсито-стареющих сталей для изделий специального и общего машиностроения, табл. 1.

Наиболее широкое применение для изготовления тонкостенных фасонных отливок, работающих в условиях сложного нагружения нашли стали феррито-перлитного класса (38ХСЛ, 23ХГС2МФЛ, 25Х2ГНМФЛ). Требуемый уровень механических свойств обеспечивается после закалки и низкого отпуска, а для стали 38ХСЛ – после изотермической закалки и низкого отпуска.

Стали отличаются высокими литейными свойствами (трещиноустойчивость, жидкотекучесть), что позволяет применять их для изготовления отливок сложной конфигурации.

Стали бейнитного класса (27Х5ГСМЛ, 30Х3С3ГМЛ) – самые высокопрочные из разработанных сталей. Высокие механические свойства обеспечиваются за счет рационального легирования и терми-

ческой обработки (закалка и низкий отпуск).

Таблица 1.

Марки стали	Класс ста- ли	Механические свойства				
		$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	KCU КДж/ м ²	K _{1C} МПа.* м ^{1/2}
38ХСЛ	Феррито- перлитный	≥ 1275	≥ 1079	≥ 5	≥ 392	80...90
23ХГС2МФЛ		≥ 1275	≥ 1079	≥ 6	≥ 392	112...118
25Х2ГНМФЛ		≥ 1275	≥ 1079	≥ 6	≥ 392	90...100
27Х5ГСМЛ	Бейнитный	≥ 1472	≥ 1177	≥ 5	≥ 392	80...90
30Х3С3ГМЛ		≥ 1766	≥ 1472	≥ 4	≥ 196	70...80
12Х7Г3СЛ	Мартенсит- ный	≥ 1324	≥ 1079	≥ 9	≥ 40	120...125
03Н12Х5М3ТЛ	Мартенсито- стареющий	≥ 1324	≥ 1275	≥ 8	≥ 500	120...130
03Н12Х5М3ТЮЛ		≥ 1472	≥ 1422	≥ 8	≥ 400	80...90

Указанные стали наиболее целесообразно использовать для деталей, работающих в условиях высоких газовых давлений и статических нагрузок.

Расширение области использования литейных высокопрочных сталей для деталей ответственного назначения потребовало повышения уровня их пластичности и вязкости, снижения склонности к хрупкому разрушению.

На основании проведенных исследований была разработана низкоуглеродистая литейная высокопрочная сталь с повышенным сопротивлением хрупкому разрушению – 12Х7Г3СЛ. Высокий уровень механических свойств обеспечивается уже при охлаждении на воздухе, при этом сопротивление хрупкому разрушению (K_{1C}) составляет 120...125 МПа.м^{1/2}. Сталь опробована для литых зубьев экскаваторов.

Сталь технологична по литейным свойствам, а по уровню трещиностойкости она в 2...2,5 раза превосходит сталь 35Л.

Самые технологичные из разработанных сталей – это мартенситно-стареющие стали (МСС) марок 03Н12Х5М3ТЛ, 03Н12Х5М3ТЮЛ. Механические свойства указанных сталей обеспечиваются после закалки и последующего старения. В закаленном состоянии мартенситно-стареющие стали имеют низкую твердость (HRC₃ 20...25), что позволяет проводить механическую обработку деталей до старения.

Ударная вязкость рассматриваемых сталей практически не изменяется в интервале температур +20...-50°C.

Изучение литейных свойств показало, что они находятся на уровне свойств стали 35Л. По трещиностойкости мартенситно-

стареющие стали в 2...3 раза превосходят сталь 35Л.

Низкое содержание углерода в МСС обеспечивает их хорошую свариваемость, благодаря чему они могут быть рекомендованы для сварно-литых конструкций.

Технология выплавки высокопрочных литейных сталей не отличается от применяемой в промышленности технологии для конструкционных марок стали. Однако для всех разработанных марок стали необходимо использование лигатур, содержащих РЗМ.

Широкое производственное опробование разработанных сталей показало, что наиболее эффективно изготавливать из них точные заготовки способом литья по выплавляемым моделям, в облицованный кокиль, в формы, изготовленные вакуумно – пленочной и низкотемпературной формовкой.

Применение литейных высокопрочных сталей взамен деформируемых позволяет снизить трудоемкость механической обработки на 15...20%, массу изделий на 15...30%, повысить коэффициент использования металла с 0,1 до 0,5...0,6.

В середине семидесятых годов прошлого столетия ЦНИИМ вел большие работы по созданию высокопрочных чугунов с вермикулярным и шаровидным графитом.

Были разработаны высокопрочные чугуны с вермикулярным графитом, обеспечивающие в литом состоянии $\sigma_b - 320...510$ МПа, $\sigma_{0,2} - 270...420$ МПа, $\delta - 1...8\%$, НВ 143...214, КС – 200...300 КДж/м².

По литейным свойствам они близки к серым чугунам, что позволяет изготавливать из них фасонные отливки, работающие в условиях повышенных нагрузок.

ЦНИИМ является разработчиком ряда высокопрочных чугунов с шаровидным графитом ферритного, перлитного и бейнитного классов, табл.2. По физико–механическим и технологическим свойствам высокопрочные чугуны во многих случаях не только превосходят обычные серые чугуны, но и легированные конструкционные стали.

Таблица 2.

Класс высокопрочного чугуна	Механические свойства					
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	КС, КДж/м ²	КСУ КДж/м ²	K_{IC} МПа·м ^{1/2}
Ферритный	380...440	240...310	23,0...27,0	1000...1300	170...300	70...80
Перлитный	600...700	420...500	2,0...5,0	200...300	50...60	40...50
Бейнитный	1300...1400	1150...1200	6,0...7,0	640...990	100...120	60...66

В настоящее время высокопрочные чугуны нашли широкое применение для изделий контактных сетей железных дорог взамен ковкого чугуна, для гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

В лаборатории разработана серия высокопрочных титановых сплавов с уровнем прочностных свойств до 1100 МПа. Ведутся работы по созданию жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов титана.

Лаборатория имеет возможность организовать малотоннажное производство по изготовлению расходных электродов, производство слитков и отливок из жаропрочных (Ti – Al) сплавов, сплавов памяти (Ti-Ni), коррозионностойких (Ti-32Mo) и антиэмиссионных сплавов (Ti-30Cu)

Для выполнения работ по созданию сплавов на основе титана имеется специальное плавильное оборудование.

ЦНИИМ является разработчиком технологии и оборудования для изготовления отливок способом вакуумно-пленочной формовки и НТФ.

В настоящее время основное направление по ВПФ – проектирование участков и оборудования ВПФ исходя из условий заказчика, а также авторский надзор за изготовлением оборудования, пуско – наладочными работами и освоением технологии изготовления отливок способом ВПФ.

В начале 2004 г. институтом спроектирован и изготовлен для Авиационного предприятия им. Ю.А. Гагарина комплекс оборудования вакуумно-пленочной формовки с размерами опок 600x500x150.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОТЛИВОК ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Ребонен В.Н., к.т.н. (ФГУП ЦНИИМ)

Спад в промышленном производстве России привел к остановке и даже закрытию большого числа литейных цехов, оснащенных морально и физически устаревшим оборудованием и отсталыми технологическими процессами.

Произошел интенсивный отток квалифицированных рабочих и инженерно-технического персонала. Разрушены устоявшиеся связи и потоки по снабжению цехов. Подготовка кадров рабочих профессий практически прекращена и эти профессии являются не престижными.

Переход на рыночные формы отношений сопровождается рядом новых требований к возрождаемому производству литых заготовок и качеству литья. В первую очередь это конкурентноспособность отливок и прибыльность производства. На начальном этапе особое внимание уделяется товарному виду продукции, его стоимости и оперативности поставки, отодвигая на второй план вопросы качества металла и работоспособности литых деталей.

Очевидно, что реанимация устаревших технологических процессов, восстановление оборудования и коммуникаций требует значительных материальных затрат, но не позволит обеспечить уровень производства, соответствующий современному периоду.

В этих условиях большой интерес вызывают технологические процессы литья в формы из холоднотвердеющих смесей (ХТС), в формы, изготавливаемые по вакуум-пленочному процессу (ВПФ), литья по газифицируемым моделям (ЛГМ) и литья по выплавляемым моделям (ЛВМ).

Сравнительные показатели различных видов литья при производстве отливок развесом до 1-5 кг представлены в таблице.

Более подробно остановимся на процессе литья по газифицируемым моделям. Технологический цикл изготовления отливок по ЛГМ включает в себя:

- изготовление пенополистироловой модели вспениванием гранул в пресс-форме или механической обработкой из блочного пенополистирола;
- изготовление литниковой системы и склеивание модельного блока;
- окраску модельного блока;
- формовку блока сухим песком;
- заливку металла в форму без извлечения модели в вакууми-

- руемой опоке;
- выбивку отливок и другие финишные операции.

Таблица

Показатель	Сухие песчано- глинистые формы	ХТС	ВПФ	ЛВМ	ЛГМ
Максимально достигаемая точность, класс по ГОСТ 26645-85	6–7	5–6	6–7	4–5	3–4
Максимально достигаемая шероховатость (R_a), по ГОСТ 26645-85	10–16	6,3–10,0	3,2–6,3	3,2–5,0	3,2–6,3
Расход формовочных материалов	1	2–4	0,2–0,5	5–10	0,2–0,5
Расход энергоносителей	1	0,9–1,1	1,1–1,3	1,7–3,0	0,9–1,1
Трудоемкость	1	0,7–0,19	1,1–1,2	2,3–2,5	0,9–1,1
Затраты на организацию производства	1	1,1–1,2	1,1–1,2	1,5–3,0	0,8–1,0

Техническая целесообразность применения ЛГМ определяется следующими показателями.

Стабильность размеров модели, отсутствие разъема формы и постоянство технологических параметров позволяет повысить точность отливов до уровня, превышающего точность отливок по ЛВМ.

В полость формы, заполненной пенополистиролом, не могут попасть инородные включения, что обеспечивает уменьшение количества засоров.

Шероховатость поверхности отливки, определяется во многом шероховатостью поверхности формы, соответствует по своему значению отливкам по ЛВМ. Объясняется это тем, что и в том и в другом случае краска или покрытие наносится на модель, в то время как при обычном литье краска наносится на поверхность формы.

Высокое качество отливок по ЛГМ допускает эффективное использование процесса при изготовлении таких отливок, которые традиционно изготавливаются литьем по выплавляемым моделям. Несомненным преимуществом ЛГМ перед ЛВМ является простота его осуществления. Практически исключены или сведены к минимуму операции нанесения покрытия, формовки, прокалки форм, выбивки и очистки отливок.

Применение ЛГМ взамен ЛВМ позволяет сократить расход

дорогостоящих формовочных материалов до 10 раз, электроэнергии – в 2 – 3 раза и трудоемкость – в 3-4 раза.

В то же время необходимо учитывать тот факт, что при стальном литье происходит существенное науглероживание поверхности отливки и необходимо принимать меры по его снижению. На чугуном и цветном литье такого дефекта не наблюдается. Еще одним недостатком ЛГМ является пониженная по сравнению с ЛВМ заполняемость тонких протяженных стенок.

Основное оборудование, необходимое для осуществления ЛГМ:

- пароавтоклав;
- сушильный шкаф;
- краскомешалка;
- вибростол;
- водокольцевой вакуумный насос с ресивером;
- плавильная печь;
- установка для отрезки деталей от стояка;
- установка для очистки деталей.

Изложенное позволяет утверждать, что процесс ЛГМ является одним из самых рентабельных и перспективных при производстве отливок малого развеса.

ОСОБЕННОСТИ И ДОСТИЖЕНИЯ ХУДОЖЕСТВЕННОГО ЛИТЬЯ С.ПЕТЕРБУРГА

Пирайнен В.Ю., к.т.н.(ЦНИИМ-ИНВЕСТ)

С.Петербург 300 лет – юный возраст, несмотря на это, он занимает особое место в ряду центров художественного литья России.

Так, например, ювелирное литье в современном понимании этого слова зарождалось и достигло мировой славы именно в С.Петербурге. Указ Петра I от 1722 года о создании ювелирных цехов положил начало триумфу и славе питерских ювелиров. Достаточно назвать такие известные имена как Позье и Фаберже.

В допетровские времена скульптурные изваяния порицались церковью, поскольку напоминали языческих идолов. Поэтому металлические статуи на Руси до конца XVIII века были крайне редки.

Интеграция Московского государства в общеевропейский культурно-художественный процесс, активизировавшаяся в конце XVIII века, уже в начале правления Петра I повлекла за собой развитие скульптурного, монументального, статуарного и архитектурно-художественного литья.

С открытием в С. Петербурге в 1757 году Академии художеств, при которой был создан специальный Литейный дом (1764г.), заметно активизируется развитие скульптурного художественного литья. Академия художеств, ее скульптурные классы и Литейный дом явились прекрасной школой, воспитавшей целое поколение замечательных мастеров скульптуры и декоративно-прикладного искусства.

Застройка Петербурга в XVIII веке, создание загородных резиденций и дворцово-парковых комплексов способствовало широкому внедрению в архитектуру художественного литья из чугуна. Чугунные решетки балконов, оград, ворот, садово-парковая мебель (скамьи, вазы, урны), ажурные павильоны-беседки, архитектурные детали фасадов, столбы и торшеры светильников все чаще сменяют кованые и становятся неотъемлемой составной частью архитектурного облика Петербурга.

В значительных объемах художественное чугунное литье производилось на Петровском, Александровском и Кончезерском заводах.

Творческие поиски архитекторов, скульпторов и мастеров литейщиков XVIII века создали важные предпосылки для дальнейшего развития художественного литья в первой половине XIX века – времени его наивысшего расцвета, его «золотого века».

Академия художеств в Петербурге воспитала целую плеяду замечательных архитекторов, художников, скульпторов способных

решать самые сложные творческие и технические задачи. Благодаря находившемуся в ее стенах Литейному дому, а также Петербургской бронзовой фабрике, большая часть произведений монументальной и монументально-декоративной пластики в XIX веке сосредотачивается именно в Петербурге. О качественном уровне литья свидетельствует тот факт, что отлитые в бронзе рельефы для громадной двери Казанского собора даже не потребовали дополнительной чеканки. О высоте художественного и технического уровня петербургской скульптуры из бронзы и чугуна красноречиво свидетельствуют ее успехи на многочисленных отечественных и зарубежных выставках. На лондонской выставке 1851 года для демонстрации российской художественной бронзы был даже отведен отдельный зал.

Говоря о художественном литье Петербурга, нельзя не сказать о двух уникальных фигурах в отечественном художественном литье – о скульпторе Петре Карловиче Клодте (1805 – 1867) и литейщике Василии Петровиче Екимове (1756 – 1838). Екимов исполнил отливку 12-ти больших статуй, среди которых памятник Суворову А.В., 5-ти скульптур в натуральную величину для дворцовых комплексов Петербурга, многие рельефы для Казанского собора, а также множество бюстов, ваз и других элементов декоративного классического убранства.

П.К.Клодт представлял собой редкое в художественной практике сочетание талантливого скульптора и высокопрофессионального литейщика. Клодта от многих коллег отличала исключительная трудоспособность, он не гнушался черновой работы литейщика. С 1840 по 1860 г.г. он бессменно заведовал академическим Литейным домом. Еще за два года до назначения на эту должность в 1838 году Клодт был удостоен высокого и редкого звания литейного мастера-академика.

Знаменитые конные скульптурные группы Клодта (1833г. – первая пара, 1850г. – вторая пара) украшают не только Аничкин мост в С.Петербурге, но также, будучи подаренными (копии) прусскому монарху и неаполитанскому королю, установлены перед королевским дворцом в Берлине и на Королевской площади в Неаполе.

Безусловно, упоминания заслуживают значительно большее число скульпторов и литейщиков, и присутствующие, наверняка, многих из них знают. Но те, кто желает более глубоко ознакомиться с историей художественного литья С.Петербурга, мы можем порекомендовать книгу «История художественного литья» вышедшую в С.Петербурге в 2003 году.

После Октябрьской революции в 1920 – 1990г.г. в Петрограде

– Ленинграде было создано немало ценных произведений в области художественного литейного искусства.

Определяющим фактором для развития монументальной скульптуры стал «План монументальной пропаганды», утвержденный В.И. Лениным в апреле 1918 года. Для его реализации был принят специальный декрет «О памятниках республики», который предполагал сооружение памятников и монументов «предшественникам социализма, его теоретикам, светочам философской мысли, науки и искусства».

Одновременно предусматривались демонтаж и снос памятников царям и их слугам. Многие ценные в историко-художественном и техническом отношении бронзовые и чугунные памятники были демонтированы и разрушены.

Из наиболее выдающихся достижений монументального художественного литья С.Петербурга стал мемориальный комплекс защитникам Ленинграда автора Аникушина, сооруженный в 1975 году к 30-летию Победы. Монументальное литье для комплекса было изготовлено мастерами Ленинградского завода «Монумент скульптура», перешедшему, как известно в последние годы в собственность господина Церетели.

В целом в Советские годы Ленинград утратил свои позиции лидера художественного литья страны. Утратила свои позиции в этой области и наша Академия художеств.

К концу 90-х годов 80% промышленности Ленинграда относилось к оборонному комплексу страны. Вот почему после развала Советского Союза в 1991 году большинство литейных цехов города попросту встали, оставшись без заказов. Встал вопрос, как загрузить производство и сохранить специалистов-литейщиков (в других специальностях образовались те же проблемы). И как это не странно «не было бы счастья, да несчастье помогло», постепенно питерские литейные цеха и мастерские стали переориентироваться на художественное литье. На их базе стали образовываться коммерческие предприятия, которые к настоящему времени очень серьезно о себе заявили на рынке художественного литья, как в России, так и зарубежном.

Кроме, уже упомянутого выше завода «Монумент-скульптура», где за последние годы были отлиты для города такие значительные памятники как Александру Невскому, «Фотограф», «Последний фонарщик», «Городовой», «Остап Бендер» и другие. Следует отметить явных лидеров отечественного художественного литья – предприятия «Сентябрь и Со», «Невская бронза», «Русская бронза», «Прогрессивные литейные технологии» и другие.

Особенно следует отметить наш знаменитый «Балтийский за-

вод», где с 1998 года возобновили литье колоколов. Первый из них был массой 1200кг для звонницы Казанского собора, а последний, как известно, массой 72,2 тонны – «Царь-колокол» для Свято-Троицкой Сергиевой Лавры. На сегодняшний день это самый крупный колокол в России.

Всего за последние годы на заводе изготовлено более 200 колоколов.

Не обошлось без изменений и в области подготовки кадров. Так сразу несколько литейных кафедр ведущих Вузов города ввели в свои программы курс «Художественное литье». Кроме того, ряд Вузов готовящих специалистов в области художественной обработки изделий также стали выпускать инженеров-художников литейного профиля.

Здесь хотелось бы отметить достижения одной из таких кафедр, которую я отчасти представляю – это кафедра материаловедения и художественной технологии изделий Северо-западного заочного технического Университета.

На этой кафедре направление художественного литья возглавляет Заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук, профессор Магницкий Олег Николаевич. Бывший ведущий литейщик оборонной промышленности Советского Союза после развала страны он целиком и полностью посвятил себя подготовке молодого поколения литейщиков, и во многом в этом деле преуспел. Под его руководством подготовлен и издан первый учебник по художественному литью, учебное пособие «История художественного литья», проведен целый ряд научно-технических художественных разработок, подготовлен и защищен ряд диссертаций.

С 1997 года на кафедре открыто новое научное направление – кампанология – наука о колоколах. И здесь сотрудники, и студенты кафедры достигли определенных успехов. Достаточно сказать, что разработанный в недрах кафедры проект памятника-колокола посвященного событиям 11 сентября 2001 года прошел успешную апробацию в Соединенных Штатах Америки и сейчас решается вопрос о его установке в Нью-Йорке. В заключении мы предлагаем вам посмотреть один из учебных видеофильмов созданных на кафедре под руководством О.Н.Магницкого.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ «ПОЛИГОН» В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

*Дмитриев Э.А., канд. техн. наук, доцент.
(Комсомольский на Амуре государственный
технический университет)*

В 2000 г. кафедрой «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета была приобретена учебная версия системы компьютерного моделирования (СКМ) «ПОЛИГОН» и в последствии внедрена в учебный процесс обучения студентов специальности «Машины и технология литейного производства» и обучающихся по направлению 551804 «Машины и технология литейного производства» (магистратура).

Впервые с «СКМ ПОЛИГОН» студенты знакомятся в начале четвертого курса при изучении дисциплины «Теория формирования отливки». Данная дисциплина состоит из двух видов аудиторных занятий. Это лекционные занятия и лабораторные работы. Для лекционных занятий с помощью «СКМ ПОЛИГОН» подготовлены слайды и анимационные ролики, позволяющие наглядно демонстрировать процессы, происходящие в металле и в форме во время формирования отливки.

Лабораторные работы по курсу «Теория формирования отливки» так же выполняются с использованием моделирования в «СКМ ПОЛИГОН».

Причем каждая лабораторная работа разбита на две части. Первая часть – это традиционные исследования, проводимые с применением реального расплава, форм, термопар и т.п. При выполнении первой части работы студенты получают навыки работы с реальными расплавами и приборами. Полученные образцы анализируются и результаты анализа с выводами записываются в отчет. После выполнения первой части работы студенты приступают к выполнению второй части, в которой проделывают те же самые эксперименты только не на реальных сплавах и формах, а на их компьютерных моделях.

Расчеты преподаватель проделывает в «СКМ ПОЛИГОН» заранее. Таким образом, вторая часть работы, выполняемая с помощью расчетов в «СКМ ПОЛИГОН» позволяет студентам заглянуть как бы внутрь формы и отливки и наблюдать, как развиваются процессы, происходящие в расплаве при тех или иных условиях.

Примером выполнения лабораторной работы состоящей из

двух частей может быть работа на тему «Исследование температуры перегрева расплава и влияние свойств материала формы на объем усадочной раковины».

Ранее без использования «СКМ ПОЛИГОН» работа проводилась лишь на реальных сплавах и формах, по окончании выполнения работы студенты получали образцы, измеряли объем усадочной раковины, делали определенные выводы. С появлением «СКМ ПОЛИГОН» выполняется вторая часть этой работы, где студенты имеют возможность наблюдать за процессом зарождения и развития усадочной раковины при тех или иных условиях.

На пятом курсе при изучении дисциплины «САПР литейных машин и технологий» при выполнении лабораторных работ студенты изучают основные приемы работы в «СКМ ПОЛИГОН». Причем лабораторные работы построены, так что изучение основных приемов работы происходит на моделях отливок выполненных и рассчитанных на четвертом курсе при выполнении курсового проекта по дисциплине «Технология литейного производства». Разбиение моделей на конечно элементную сетку студенты выполняют при изучении дисциплины «Основы автоматизированного» проектирования так же на четвертом курсе.

Необходимо уточнить, что учебный план построен так что, начиная со второго курса, студенты в дисциплине «Инженерная графика» изучают основы 3D моделирования, в дальнейшем эти навыки закрепляются и к старшим курсам, как правило, все студенты владеют на достаточно высоком уровне 3D моделированием. Для желающих более углубленно изучить 3D моделирование с помощью таких систем как Solid Works и Unigraphics при кафедре действуют коммерческие курсы дополнительного образования.

В связи, с чем все курсовые проекты по специальным дисциплинам выполняются в обязательном порядке с применением 3D моделирования.

«СКМ ПОЛИГОН» применяется студентами и при выполнении дипломного проектирования. В технологической части ДП с помощью «СКМ ПОЛИГОН» студенты проверяют а затем при необходимости корректируют предлагаемую в ДП технологию изготовления отливки.

Использование «СКМ ПОЛИГОН» в учебном процессе способствовало не только более успешному усвоению теоретических основ литейного производства, но и улучшило именно понимание процессов происходящих в форме при формировании отливки, что также сказалось и на успеваемости студентов.

Выпуск специалистов имеющих хорошие знания в области теории и технологии литейных процессов и владеющих в полной мере элементами САПР позволило начать более интенсивно разворачивать литейное производство Дальневосточного региона в направлении использования как САПР в целом так и «СКМ ПОЛИГОН» в частности.

Так в 2003 году «СКМ ПОЛИГОН» приобрело ОАО Комсомольское-наАмуре авиационное промышленное объединение. Наме-
риваются приобрести и другие предприятия.

В 2004 году кафедра «Машины и технология литейного производства» обновила версии «СКМ ПОЛИГОН», что позволило начать подготовку к внедрению в учебный процесс модуля гидродинамического заполнения литейных форм, а так же модуля «Критерий 3D» для подготовки магистров и аспирантов.