

Центр научно-технической информации «ПРОГРЕСС»

***КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ
ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ:
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ***

**МАТЕРИАЛЫ СЕМИНАРА ПО ТЕМЕ
«СОВРЕМЕННОЕ ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО»**

15 –19 октября 2007 года

Санкт-Петербург
2007

Содержание	
1.	Голод В.М. Компьютерный анализ литейной: блистательные перспективы или неразрешимые проблемы ?.....3
2.	Савельев К.Д. Построение геометрических моделей отливок: практика и проблематика11
	Савельев К.Д. Термодинамическое моделирование литейных сплавов.....**
3.	Голод В.М. Системный анализ и компьютерное моделирование кристаллизации литейных сплавов.....25
	Кропотин В.В. Моделирование кристаллизации многофазных металлических сплавов.....**
3.	Бройтман О.А. Моделирование структуры и распространения тепла в дисперсных формовочных материалах для прогноза их теплофизических свойств.....14
5.	Голод В.М. Теплофизические характеристики литейной формы и их экспериментальное определение**
	Попов А.Г., Обухов С.В. Моделирование термо-напряженного состояния в литейных процессах и прогноз образования сопутствующих дефектов.....**
6.	Голод В.М. Компьютерный анализ фазовых превращений при термообработке отливок.....**
7.	Щербаков Ю.А. Задачи САПР и цикл технологической подготовки производства литых деталей.....**
8.	
9.	
10.	Прокошев А.С. Решение задач литейной технологии средствами программного комплекса LVMFlow.....**
11.	Щербаков Ю.А. Практика применения пакета POLYCAST.....**
12.	Сабиров Д.Х., Денисов Л.Ю., Абрамов А.А. Компьютерная технология проектирования

	и изготовления литейной оснастки.....**
--	---

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ: блистательные перспективы или неразрешимые проблемы ?

В.М. Голод, профессор кафедры физико-химии
литейных сплавов и процессов СПбГПУ

В последние годы технологи - литейщики получили в свои руки новый и вместе с тем важнейший инструмент – *компьютерные средства для анализа литейной технологии* на основе моделирования литейных процессов и прогнозирования качества отливки. Повсеместно в литейных технологических бюро появляются современные компьютеры, используемые не только как электронные пишущие машинки или как «умные» калькуляторы, но и для выполнения технологических расчетов и моделирования заливки формы, затвердевания или образования усадочных пустот. На рынке компьютерных программ появились многочисленные пакеты, предлагающие услуги по расчету тепловых или усадочных

процессов за самую различную цену – от 30 до 120 тысяч долларов. Можно ли на этом основании заключить, что закончилась - ко всеобщей радости - эпоха, когда литейщики справедливо сетовали: “Наше дело закрытое, капризное и отчасти гадательное...” ?

Приведенные на рис. 1 кривые показывают, что, начиная с 1990 г., кар-

тина выглядит не столь радужной и указывает на существование ряда причин, вызывающих почти кризисное состояние инженерных наук, в том числе – в сфере литейного производства [1-2]. В чем дело ?

Технология изготовления отливки включает ряд этапов, каждый из которых в силу особенностей технологических и/или режимных параметров

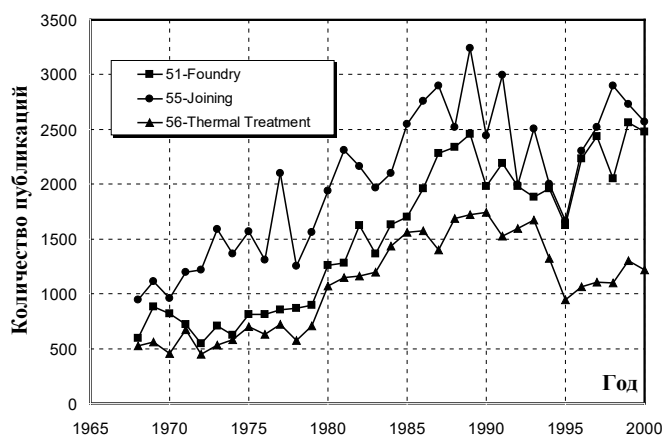


Рис. 1 Динамика публикаций в мире по литью, сварке и термической обработке (по данным «Metals Abstracts»)

(размеры прибылей, температура заливки, скорость опорожнения ковша и т.д.) может создать предпосылки для возникновения одного или сразу нескольких из многочисленных видов брака. Условия формирования отливки насчитывают большое число (иногда утверждают – до 2000 !) факторов, конкретное сочетание которых определяет характер сопряженных процессов теплообмена, гидродинамики, кристаллизации, усадки, ликвации и т.д. Их неблагоприятное протекание вызывает возникновение литейных дефектов. Кроме того, неизбежные колебания условий при производстве отливок создают стохастический фон внешних воздействий, приводящих к осцилляции начальных и граничных условий, при которых формируется отливка, порождая ситуацию, когда внезапно и непредсказуемо (но ведь не беспричинно же ?!) “выскакивает” или “пропадает” брак.

Численное моделирование литейной технологии, выполняемое на стадии проектирования или при возникновении брака, имеет целью *диагностику условий формирования отливки* с определением вероятности или величины, размеров и расположения образующихся дефектов и *оценку стабильности* поддержания необходимого качества отливки, т.е. устойчивости заданного технологического процесса в производственных условиях [3].

Основные проблемы, решаемые при моделировании литейной технологии, включают следующие основные этапы:

- разработка или выбор *физико-химических моделей* для представления сложного комплекса многоуровневых процессов формирования отливки (на макро-, мезо- и микроуровне) на основе их системного анализа с неизбежным упрощением полной системы рассматриваемых процессов в силу ограниченности доступных ресурсов (интеллектуальных, математических, вычислительных, временных, экономических и т.д.);
- разработка или выбор математического аппарата для описания принятого набора моделей и формирование *математической модели* технологии;

- *программная реализация* математической модели и разработка необходимых средств входного и выходного интерфейса для визуализации и регистрации результатов моделирования, определяющего характер взаимодействия технолога с моделирующей программой;
- *информационное обеспечение* модели путем подготовки набора исходных данных, качество которых предопределяет качество получаемого решения;
- разработка средств *диагностики качества* отливки на основе количественной оценки параметров литейной технологии, определяемых по результатам моделирования, в сопоставлении с критическими значениями диагностических параметров, которые выработаны практикой или подсказаны теорией.

Совокупность перечисленных задач требует от разработчиков глубокого понимания специфики литейных процессов и существа проблем, решаемых технологом-литейщиком, обширной математической эрудиции и высокой культуры использования компьютерных технологий. Только при этих условиях можно успешно решать задачу создания *интегрированной САПР*, сочетающей синтез литейной технологии на основе индивидуального и/или типового проектирования, проведения комплекса технологических расчетов, компьютерного моделирования и анализа технологии с диагностикой качества отливок, а также формирования технологической документации. Вместо интегрированных САПР

рынок предлагает пакеты совсем другого класса – системы *автоматизированного моделирования*, в которых решение задачи автоматизированного *синтеза литейной технологии* подменено решением значительно более простой задачи *анализа предложенной технологии*.

Отмечая впечатляющие успехи, достигнутые материаловедением и теорией формирования отливки в последние десятилетия, в том числе - благодаря интенсивному использованию компьютерных моделей [4-7], нельзя умолчать о тех проблемах, которые выявились за последние годы и продол-

жают углубляться, нанося серьезный ущерб развитию теории литейных процессов.

Сосредоточение усилий большого числа наиболее квалифицированных исследователей на формировании сравнительно узкого круга компьютерных моделей (теплообмен, гидродинамика, усадочные пустоты) и их программной реализации привело к тому, что резко сократился фронт работ в других разделах теории литья (моделирование деформационных и диффузионных процессов в отливках, физико-химия литейных процессов и дефектов, литейное материаловедение, формовочные процессы и теория литейной формы и т.д.) и значительно снизился объем работ по экспериментальному изучению литейных процессов. В результате развитие теории литейных процессов происходит в условиях заметного *самоторможения*, поскольку “...чтобы иметь идеи, надо иметь факты” (Бюффон).

Литейная наука попрежнему далеко не всегда имеет точный *количественный* ответ на вопросы, возникающие в связи с появлением новых технологий, сплавов и материалов для изготовления форм, а также ужесточением требований к качеству традиционных литых изделий. Наблюдаемые спады и подъемы (рис.1) останутся закономерными до тех пор, пока не будет в полном объеме реализовано *системное моделирование* технологии на основе многоуровневых моделей для сопряженных процессов различной природы с использованием *статистического моделирования* тех параметров, которые не поддаются непосредственному вычислению на основе физико-химических представлений, и использования аппарата оптимизации технологических решений.

Логика развития теории литейных процессов приводит к неопровержимому выводу о необходимости радикальной переработки *аналитического аппарата* технологических расчетов на основе рационального сочетания компьютерных технологий и современных физико-химических представлений о механизме процессов формирования отливки, впитывающих в себя достижения материаловедения в области неравновесной дендритной и эвтектической

кристаллизации, термодинамики многокомпонентных систем, гидравлики многофазных потоков, реологии неоднородных сред и т.д.

В условиях стремительного обновления вычислительной техники и общесистемных программных средств, значительно опережающего темпы развития литейной теории и реализации ее компьютерных моделей, весьма значительные усилия наиболее квалифицированных разработчиков затрачиваются на модернизацию программного обеспечения в ущерб развитию физико-химического базиса моделей, хотя только прогресс теории литейных процессов может обеспечить необходимое расширение круга решаемых проблем литейной технологии и существенное повышение возможностей компьютерного прогноза качества отливок.

Как следствие свертывания экспериментальных работ отчетливо проявляется острый и постоянно углубляющийся дефицит достоверных сведений о характеристиках литейных материалов, номенклатура которых непрерывно расширяется, в результате чего все более ухудшается *надежность и точность* результатов моделирования, несмотря на модернизацию компьютерных моделей, использование вычислительной техники более высокого уровня и затрату более значительных вычислительных ресурсов.

Нередко разработчики и поставщики моделирующего пакета снимают с себя труд и ответственность за *информационное обеспечение* моделей набором исходных данных, *адаптированных* к условиям конкретного производства, в результате чего пользователь оказывается один на один со сложной проблемой *локальной адекватности моделей*, не подозревая, какой квалификации и затрат требует ее решение [8].

“Закрытый” характер компьютерных моделей, связанный с коммерческим характером их использования, оставляет множество возможностей для распространения разработок низкого уровня и спекулятивной “модернизации” моделей для обновления рекламируемых разработок. Серьезность отмеченных проблем подчеркивает тот факт, что на последних международных конференциях по моделированию литейных процессов [7] значительная

часть докладов посвящена проблеме тестирования компьютерных моделирующих программ в связи с выявившимся существенным разбросом получаемых по ним результатов, причина которого кроется в углубляющемся отрыве разработчиков коммерческих компьютерных пакетов от экспериментальной базы и технологической практики.

Для преодоления этих трудностей необходимо осознание всем научным сообществом того, что все компоненты цикла *“эксперимент – модель – алгоритм – программа – эксперимент”* заслуживают самого пристального внимания, вложения ресурсов и всесторонней оценки, в том числе и коммерческой, чтобы наряду с программными продуктами получила необходимое признание и развитие разработка компьютерных средств *проведения и обработки экспериментов*. Самым обстоятельным и неотложным образом требуется обсудить деликатные проблемы *оценки и тестирования* качества всех аспектов компьютерных моделей, чтобы любой разработчик мог *объективно, добровольно и самостоятельно* оценить уровень достигнутых успехов на всех стадиях пути модели от замысла до рынка.

Кадровое обеспечение компьютерного анализа литейной технологии является ахиллесовой пятой пользователей, поскольку для грамотного анализа необходимо сочетание технологического опыта, свободного владения компьютерными средствами и достаточной эрудиции не только в литейной теории, но и в применяемых моделях и алгоритмах, чтобы успешно реализовать возможность повысить интеллектуальный уровень технологических разработок. Решение этой проблемы лежит в сфере умелого подбора и закрепления кадров, получивших необходимую квалификацию в области теории и моделирования литейных процессов и способных к непрерывному обучению и коллективной творческой работе в технологическом подразделении.

Информационное обеспечение компьютерного анализа литейной технологии [8] является тем необходимым условием, которое наряду с адекватностью моделей гарантирует необходимую достоверность получаемых ре-

зультатов. Если проблема определения характеристик литейных сплавов может успешно решаться на основе термодинамического моделирования литейных сплавов [7, 9], то свойства формовочных материалов и характеристика условий на границе металл-форма являются сугубо локальными и должны учитывать некоторые «интимные» особенности применяемых математических моделей, в связи с чем они требуют определения в цеховых условиях [7].

Адаптация применяемых моделей [10] к условиям производства необходима по той причине, что литейные пакеты имеют существенно разную «разрешающую способность», а их универсальность является кажущейся, что предполагает прямую оценку адекватности моделей путем сопоставления результатов моделирования с производственными данными (хронометраж заливки форм, термический анализ затвердевания отливки и прогрева формы, регистрация размера и расположения усадочных пустот на темплетах и т.д.) и регулярное проведение экспериментальных работ для контроля стабильности условий производства и определения необходимых для моделирования параметров технологического характера. Регистрация этих характеристик и их обобщение в силу присущей им производственной изменчивости представляет самостоятельную задачу, без решения которой нельзя получить достоверного набора исходных данных для моделирования и надежного количественного прогноза такого хода литейных процессов, который отвечает техническим условиям и позволяет реально предсказать качество отливки.

Литература

1. **Голод В.М.** Теория формирования отливки: очевидные достижения и неочевидные проблемы // Литейное производство, 2001, № 6.
2. **Голод В.М. и др.** Металлургические технологии в машиностроении: динамика последних десятилетий и резервы роста // Металлургия машиностроения, 2001, № 1.
3. **Голод В.М., Савельев К.Д.** Компьютерный анализ и диагностика литейной технологии: опыт применения, проблемы и перспективы. // Труды восьмого съезда литейщиков России, том II. – Ростов-наДону, 2007.

4. **Stefanescu D.M.** Metodologies for modeling of solidification microstructure and their capabilities // ISIJ Internat., 1995, v. 35, № 6.
5. **Sahm P.R., Hansen P.N.** Towards integrated modeling for intelligent castings // Modeling of casting, welding and advanced solidification processes (IX). - Aachen, Shaker Verlag, 2000.
6. **Boettinger et al.** Solidification microstructures : recent development, future directions // Acta Materialia, 2000, v. 48, № 1.
7. **Голод В.М., Денисов В.А.** Теория, компьютерный анализ и технология стального литья // СПб., ИПЦ СПГУТД, 2007.
8. **Голод В.М., Пулит В.В. и др.** Системы автоматизированного моделирования: информационное обеспечение и адаптация математических моделей. // Литейное производство, 1992, № 6.
9. **Савельев К.Д., Голод В.М. и др.** Применение термодинамического моделирования литейных сплавов // Литейное производство, 2001, № 6.
10. **Голод В.М. и др.** САПР литейной технологии. Профильная ориентация и новые возможности // Литейное производство, 2000, № 7.

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОТЛИВОК: ПРАКТИКА И ПРОБЛЕМАТИКА

К.Д. Савельев, доцент кафедры физико-химии литейных сплавов и процессов СПбГПУ, начальник бюро цветных металлов ОАО «Балтийский завод»

Основными операциями, выполняемые при построении геометрических моделей отливок, с использованием как твердотельного, так и поверхностного моделирования являются: вычерчивание эскизов, построение элементов твердого тела выдавливанием, вращение, вытягиванием постоянного и переменных сечений, выполнение безэскизных операций (фасок, скруглений и др.), формирование поверхностей и твердых тел с их использованием. Также необходимыми средствами являются анализ моделей, выполнение сборок, построение чертежей. Этими возможностями в той или иной степени обладает целый ряд программных продуктов, обеспечивающих сквозное проектирование технологии изготовления деталей от виртуального воплощения конструкторского замысла до разработки управляющих программ для станков с ЧПУ: Pro/Engineer, Unigraphics, CATIA, SolidWorks, T-Flex и др. Все программные продукты имеют историю своего развития и создавались для решения определенных задач. Отсюда при постоянном общем наборе средств отдельные продукты имеют эффективно развитые модули и модули, пользоваться которыми весьма сложно. Например, для построения чертежа в Pro/Engineer «придется повозиться», а выполнение аналогичной задачи в T-Flex значительно быстрее и удобнее. Однако возможности твердотельного и поверхностного моделирования T-Flex не идут ни в какое сравнение с аналогичными мощными средствами Pro/Engineer. Поэтому выбор программного продукта безусловно определяется набором задач, которые с его помощью предстоит решать на конкретном производстве. Дополнительным несомненным удобством в работе является предоставляемая программным обеспече-

нием среда параметрического моделирования, в которой размеры (один из типов параметров) управляют геометрией изделия. Эта возможность позволяет легко модифицировать деталь путем изменения только размерных чисел.

При выборе дистрибьютора программного обеспечения необходимо обратить внимание на наличие профессиональной поддержки в период освоения программного продукта и его последующей эксплуатации. Лучшим способом проверки поставщика можно считать выполнение им на первом этапе конкретной задачи с использованием предлагаемого программного продукта. Однако после покупки выбранной САПР безусловно необходимо наличие квалифицированных обученных инженеров в службах, эксплуатирующих ее.

ОАО «Балтийский завод» получил опыт по разработке внешним поставщиком специального программного обеспечения для автоматизированного построения набора геометрических моделей гребных винтов на базе Pro/Engineer, в том числе отливки. Основная сложность эксплуатации полученного модуля состоит в несоответствии квалификации авторов специального программного обеспечения (чрезвычайно высока) и персонала, который будет его эксплуатировать (относительно низка - как только что начавшего работу с этой САПР), с одной стороны, а также невозможность глубокого включения стороннего исполнителя в ежедневно обновляемую проблематику заказчика, с другой. Поэтому целесообразно иметь в штате (воспитать, на что потребуется время) хотя бы одного весьма квалифицированного сотрудника, сочетающего в себе навыки и знания в двух этих областях.

Обучать работе со сложными современными САПР, используемыми для решения нетривиальных задач, следует хорошо мотивированных сотрудников, имеющих высокий уровень основного образования, способность к самостоятельной интеллектуальной работе и самообразованию. Лучшим способом мотивации является сочетание значительного профессионального роста при достойном уровне оплаты труда. При этом следует учитывать, что получение знаний и навыков в очень узких областях, свойственных уникальному производству, рас-

смаатриваются молодыми кандидатами на их приобретение как значительный недостаток предлагаемой работы.

При выборе сотрудников, которые будут обеспечивать этап моделирования разработанной литейной технологии с целью прогноза образования дефектов и заниматься при этом построением геометрических моделей отливок, безусловно предпочтение следует отдавать специалистам с литейным образованием. Разделять задачи построения геометрической модели и выполнения моделирования затвердевания отливки между инженером-конструктором и инженером-литейщиком нецелесообразно по следующим причинам. Во-первых, при построении объемных моделей инженер-конструктор может допустить такие геометрические неточности, огрехи и даже систематические ошибки, которые просто не пришло бы в голову сделать литейщику. Во-вторых, инженер-литейщик обладает достаточно универсальным базовым образованием, что позволяет ему эффективно обучаться и использовать современные САПР. В-третьих, построение геометрической модели отливки безусловно способствует наилучшему восприятию ее геометрии литейщиком для разработки оптимального технологического процесса. В-четвертых, такой выбор позволяет эффективно использовать кадры, так как инженер-литейщик может заменить конструктора в случае его болезни или отпуска, а обратное вряд ли возможно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ДИСПЕРСНЫХ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ПРОГНОЗА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

О.А. Бройтман, начальник лаборатории фирмы «Ashland»

При использовании систем компьютерного моделирования литейных процессов часто встаёт вопрос об информационном обеспечении теплофизическими характеристиками формовочных материалов, применяемых при изготовлении подлежащей моделированию отливки. Обычно препроцессор моделирующей системы предполагает ввод температурно-зависимых значений удельной теплопроводности и объёмной теплоёмкости.

Проблему обеспечения этими свойствами смесей можно рассматривать на двух уровнях. Приняв в первом приближении поверхностный подход к решению задачи, заключающийся лишь в поиске необходимых данных в литературных источниках, велика вероятность столкнуться с тем, что теплофизические свойства для многих смесей никогда не определялись экспериментально. Это распространённая ситуация, учитывая многообразие рецептов смесей.

В случае, если свойства удалось обнаружить, следует говорить лишь о наличии приближённых данных, поскольку особенности рецептуры, зерновой состав, степень уплотнения, химический состав компонентов применяемой на практике смеси практически всегда будут отличаться от ранее исследованной. Это обстоятельство подтверждает также разноречивость литературных данных (см., например, [1-3]). Отсюда вытекает следующий уровень рассмотрения проблемы: раз и навсегда заранее определённых свойств для различных типов смесей не существует, для моделирования формирования отливок с высокой точностью следует в условиях конкретно взятого литейного производства производить эксперименты по установлению теплофизических характеристик литейных форм. Однако, в производственных условиях

такие мероприятия трудноосуществимы, не любой экспериментальный метод обеспечивает получения характеристик, пригодных для ввода в систему моделирования.

В целом невозможность проведения экспериментов ни в коем случае не может являться причиной отказа от использования компьютерного моделирования. Расчёты могут производиться и с использованием приближённых характеристик, при условии знания метода их экспериментального определения и того, насколько математический аппарат этого метода согласуется с заложенными в моделирующую систему моделями тепловых процессов, протекающих в отливке и форме. В ряде случаев есть возможность произвести такую математическую обработку экспериментальных данных, которая позволит получить корректные значения теплофизических характеристик, пригодные для ввода в систему моделирования [4]. В крайнем случае, моделирующая система всегда предоставляет свободу в проведении вычислительных экспериментов, в рамках которых возможно варьировать свойства в разумных пределах, а затем соотносить результаты расчётов с результатами заливки реальных отливок.

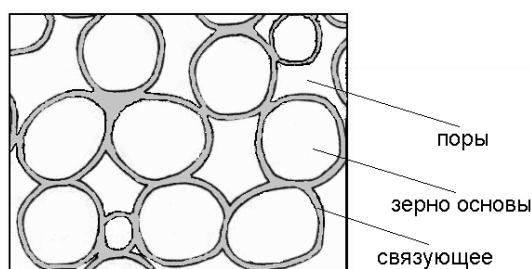


Рис. 1. Схема структуры формовочного материала

Радикальным же путём создания информационного обеспечения и повышения точности вводимых в систему данных о теплофизических характеристиках следует признать экономичный путь их расчётного установления [5] по заданному составу и параметрам структуры смеси. В основу расчётного метода были положены математические модели, описывающие дисперс-

ную структуру формовочной смеси (рис. 1) и механизмы распространения тепла в ней (кондукция, лучеиспускание и конвекция).

При использовании подхода Г.Н. Дульнева [6] разработали модель структуры осреднённого элемента уплотнённой формовочной смеси, представляющего собой зерно основы радиуса r_n с оболочкой связующего толщиной от δ_0 до δ (рис. 2,а). Для расчёта эффективной теплопроводности дисперсного материала широко используется принцип обобщённой проводимости [6-8]. С учётом этого принципа теплопроводность цилиндрической ячейки радиуса r_l (рис. 2,а) с осреднёнными геометрическими параметрами определяется термическими сопротивлениями (рис.2,б) отдельных его участков. Теплопроводность цилиндрической ячейки радиуса r_l (рис. 2,а) с осреднёнными геометрическими параметрами определяется термическими сопротивлениями (рис.2,б) отдельных его участков. Тепловой поток, входящий в нижнее основание ячейки, преодолевает термическое сопротивление прослойки связующего R_1 , далее переходит в зерно наполнителя и распределяется по нему (термическое сопротивление R_2). Параллельно с этим входящий тепловой поток встречает сопротивление R_3 воздушного зазора и части ячейки под изотермой AB , ограниченного справа адиабатой CB . После прохождения через участок с сопротивлением R_3 тепловой поток распространяется в зерне наполнителя (сопротивление R_4) и параллельно с этим в плёнке связующего (R_5). В дополнение со всеми описанными путями происходит перенос тепла в сквозных воздушных порах (R_6). Для суммарного термического сопротивления R всего осреднённого элемента, выражаемого через искомую эффективную теплопроводность ячейки λ_k , относительную деформацию каркаса формовочного материала χ_k , находимую по известной деформации связующего после уплотнения $\chi_{св}$, и исходный радиус зерна в оболочке связующего (до уплотнения) r получено соотношение:

$$R = \frac{r(1-\chi_k)}{\lambda_k \pi r_1^2}, \quad (1)$$

откуда с учётом схемы соединения термических сопротивлений (рис. 2,б) следует выражение для определения эффективной теплопроводности ячейки:

$$\lambda_{\kappa} = \frac{r(1-\chi_{\kappa}) \left(1/(R_1 + R_2) + 1 / \left(R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right) + 1/R_6 \right)}{\pi_1^2}. \quad (2)$$

Способ расчёта сопротивлений $R_1 \div R_6$ зависит от характера среды, в которой распространяется тепло. Прогноз эффективной объёмной теплоёмкости c формовочного материала с удовлетворительной точностью выполняется на основе правила аддитивности.

На рис. 3 приведены результаты расчётного исследования температурных зависимостей эффективной теплопроводности уплотнённых формовочных материалов различной структуры. Полученные данные свидетельствуют о преимущественном росте эффективной теплопроводности песчано-глинистых смесей с повышением температуры. Причина резкого усиления темпа роста в области высоких температур – увеличение лучистой составляющей теплообмена в порах в сочетании со слабым возрастанием истинной теплопроводности зёрен кварцевой основы выше 1000°C (рис. 3). Показано, что чем меньше размер зёрен, тем в большей степени выражено падение эффективной теплопроводности в интервале температур $20^{\circ}\text{C} \div 500^{\circ}\text{C}$, что находится в соответствии с понижением истинной теплопроводности кварца и соответствует экспериментальным исследованиям. Толщина плёнки связующего уменьшается при понижении размера зерна (смесь характеризуется более развитой эффективной поверхностью) в условиях сохранения неизменной массовой доли связующего $C_{св}$; с увеличением $C_{св}$ в смеси увеличиваются размеры площадок контакта агрегатов. В каждом из указанных случаев понижается тепловое сопротивление зоны контакта и усиливается влияние истинных свойств зерновой основы на ход кривой изменения эффективной теплопроводности.

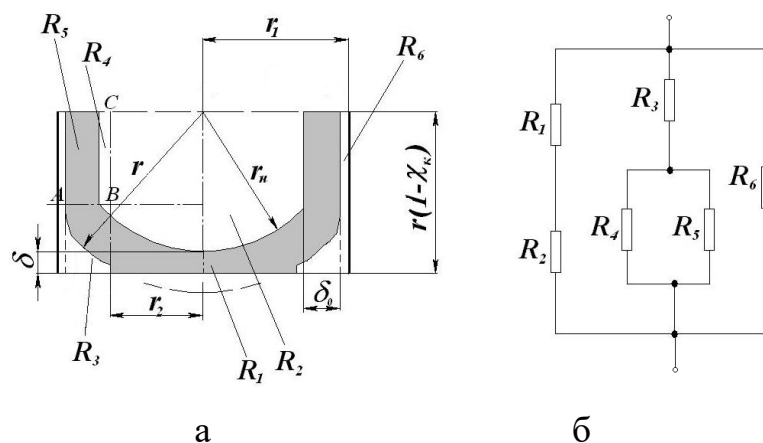


Рис. 2. Модель ячейки структуры уплотнённого формовочного материала
а – схема ячейки структуры; б – схема соединения
термических сопротивлений

Уплотнение смеси, соответственно, повышение её эффективной плотности ρ и увеличение количества связующего в смеси приводит к увеличению площадок контакта агрегатов и к закономерному увеличению эффективной теплопроводности. Добавка к наполнителю более теплопроводного связующего радикальным образом не сказывается на повышении эффективной теплопроводности смеси, что подтверждено рядом вычислительных экспериментов на модели при варьировании свойств связующего в широком интервале. Толщина плёнки всегда мала в сравнении с размерами зёрен и по этой причине тепловое сопротивление собственно связующего не является лимитирующим звеном. Именно размер площадок контакта является решающим фактором, влияющим на эффективную теплопроводности смеси.

Приведённые на рис. 3 опытные значения λ для различных смесей [9] согласуются с результатами моделирования. Для найденных на основе модельных представлений о переносе тепла в ячейке зернистого тела при стационарных условиях значений λ и c далее принято общее обозначение – *локально-эффективные* теплофизические характеристики. Совокупность этих характеристик для различных формовочных материалов является исходным компонентом информационного обеспечения систем моделирования тепловых процессов при литье.

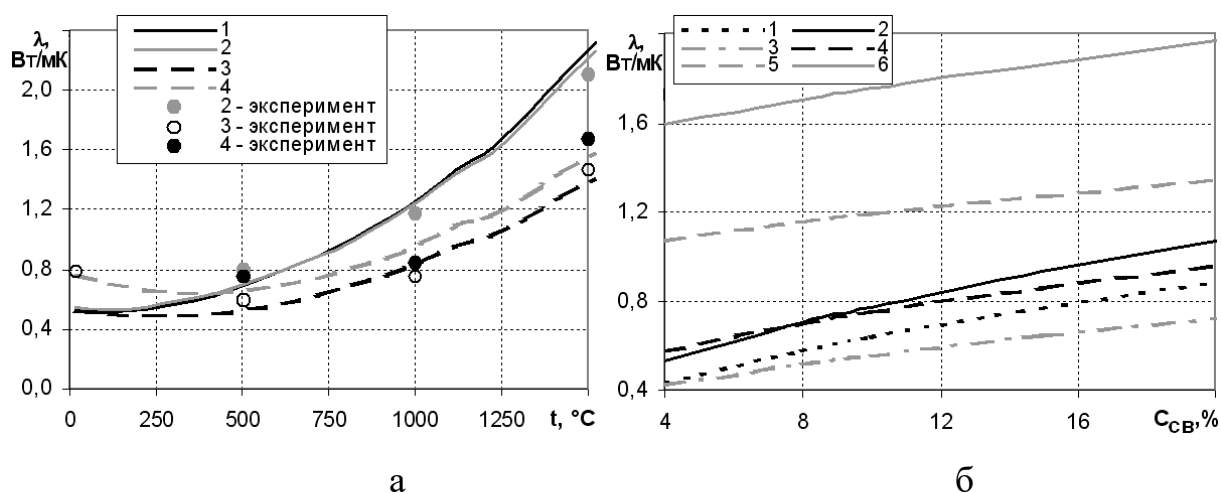


Рис. 3. Влияние температуры (а) и количества связующего (б) на эффективную теплопроводность уплотнённых песчано-глинистых смесей по результатам моделирования (линии) и опытным данным (точки)

а: 1 и 2 – $d_n=0,5$ мм, $C_{св}=4\%$, для 1 – $\rho=1556$ кг/м³, для 2 – $\rho=1605$ кг/м³; 3 и 4 – $d_n=0,2$ мм, $\rho=1605$ кг/м³; для 3 – $C_{св}=4\%$, для 4 – $C_{св}=10\%$;

б: 1 – $d_n=0,2$ мм, $t=20^\circ\text{C}$; 2 – $d_n=0,5$ мм, $t=20^\circ\text{C}$; 3 – $d_n=0,2$ мм, $t=300^\circ\text{C}$; 4 – $d_n=0,5$ мм, $t=300^\circ\text{C}$; 5 – $d_n=0,2$ мм, $t=1200^\circ\text{C}$; 6 – $d_n=0,5$ мм, $t=1200^\circ\text{C}$

Численное исследование нестационарного (неравномерного) прогрева литейной формы на основании решения уравнения Фурье при задании локально-эффективных структурно- и температурно-зависимых теплофизических параметров λ и c позволяет определить *интегрально-эффективные* теплофизические свойства формовочных материалов (теплопроводность $\lambda_{эф}$, теплоёмкость $c_{эф}$, температуропроводность $a_{эф}$ и тепловую активность $b_{эф}$), учитывающие различную степень прогрева участков формы и изменения структуры материала этих участков в результате термодеструкции связующего, испарения влаги и т.д. [10]. Именно интегрально-эффективные теплофизические характеристики формовочного материала используются при аналитическом решении задачи о прогреве литейной формы. Численным расчетом показана стабилизация во времени интегрально-эффективных теплофизических характеристик литейной формы на разном уровне для разных температур заливки, зернового состава и свойств материала-основы смеси [10]. Посредством вычислительных экспериментов выявили наличие зависимости интегрально-эффективных теплофизических свойств от конфигурации гра-

ницы раздела отливка-форма, что влечёт за собой вывод о неправомерности использования интегрально-эффективных свойств, заданные постоянными для всего объёма формы, при расчётах затвердевания фасонных отливок. Универсальным путём точного учёта теплоотвода в форму при численных расчётах является использование локально-эффективных свойств её материала.

Однако, здесь следует обратить внимание на своего рода неприспособленность существующих на рынке программного обеспечения систем моделирования литейных процессов к точному решению задачи теплообмена в литейной форме, изготовленной из любого материала. Использование при тепловых расчётах температурно-зависимых локально-эффективных свойств формовочного материала корректно при условии стабильности структуры смеси во времени при изменении температуры. В том случае, если нагрев смеси сопровождается превращениями в её компонентах и фазовый переход протекает в течение некоторого времени, что, в частности, происходит в случае термодеструкции смоляного связующего литейной формы, то нестабильность структуры будет определяться не только температурой T , но и временем τ нахождения участка смеси при данной температуре, от которого зависит степень превращения органического материала. Отсюда следует, что при задании теплофизических свойств песчано-смоляных смесей необходимо вводить ещё один параметр состояния материала смеси – время. Однако, в этом случае непрерывная кривая для зависимости свойств от температуры, требуемая к вводу в системе моделирования, распадается на множество кривых, отображающих значение теплофизической характеристики и соответствующих разным моментам времени. Для точного учёта изменения свойств при прогреве требуется при моделировании затвердевания отливки совместно с уравнением Фурье решать уравнение, описывающее химическую реакцию разложения смоляного связующего [11]. В то же время подлежит проверке вопрос о том, насколько существенен вклад «временной» составляю-

щей процесса термодеструкции смолы и не является ли эта составляющая процесса быстрой в сравнении с вкладом «температурной» составляющей.

Исследовали нестационарную газификацию фенольно-фуранового связующего (температура начала деструкции 330°C) при прогреве литейной формы после заливки расплава, и выявляли, на какие механизмы переноса тепла оказывает существенное влияние это превращение в песчано-смоляной смеси. Для этого производили расчёт изменения температур в форме путём численного решения уравнения Фурье, которое записывали в виде $c(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + L\rho(T)\frac{\partial \gamma}{\partial \tau}$, где x – координата, отсчитываемая от поверхности формы; L – тепловой эффект превращения; γ – степень превращения, находящаяся из термо-кинетических уравнений [11].

Наличие в формовочном материале смоляного связующего существенно сказывается на газовом режиме литейной формы и интенсифицирует конвективный теплоперенос, поэтому одновременно с расчётом по уравнению Фурье определяли поле давлений в теле формы путём численного решения уравнения, полученного из уравнения неразрывности, уравнения Дарси и газового уравнения состояния [12].

Параллельно исследовали конвекцию в сухой негасотворной форме, когда транспорт газа вызван тепловым расширением воздуха, заполняющего поры смеси. Расчёты показали, что при литье в негасотворную форму конвективная составляющая переноса тепла выражена весьма слабо и определённо может не учитываться при расчетах тепловых условий затвердевания отливок. В случае литья в песчано-смоляную форму давление в порах смеси на несколько порядков превышает давление при литье в негасотворную форму и это может стать причиной брака отливок по газовым раковинам. Несмотря на значительные перепады давления между участками формы, в которых протекает газификация, и теми, где она ещё не началась, показали, что конвективная составляющая теплообмена также достаточно мала, поэтому

нестационарную конвекцию в смесях со смоляным связующим при тепловом расчёте можно не принимать во внимание.

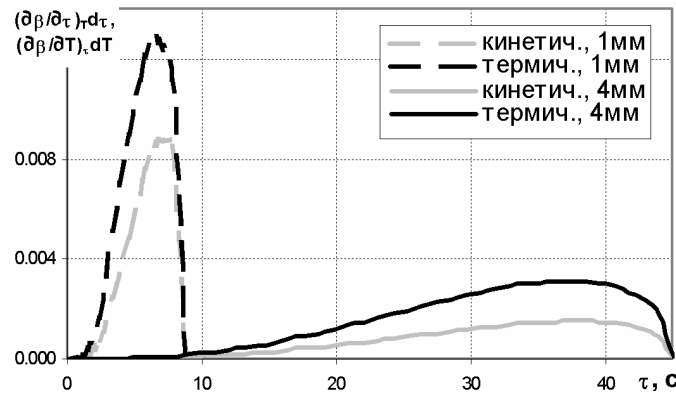


Рис. 4. Изменение степени превращения во времени

Сформулированная выше структурная модель формовочного материала способна учитывать изменчивость структуры смеси в зависимости от степени её прогрева. При нагреве песчано-смоляной смеси происходит трансформация её структуры, связанная с превращениями связующего: на начальном этапе может иметь место частичное спекание смеси; в участках, где деструкция прошла полностью, упаковка зёрен наполнителя становится рыхлой и несвязанной. Отмеченные структурные различия определяют разные условия для распространения тепла. С учётом того, что степень превращения связующего есть функция двух переменных – времени и температуры, получено

$$[11]: d\gamma = \left(\frac{\partial\gamma}{\partial\tau} \right)_T d\tau + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial T} \right)_\tau dT, \text{ где первое слагаемое в правой части выражает}$$

скорость химической реакции при постоянной температуре (кинетический параметр), а второе – удельное количество разложившегося вещества при изменении температуры на один градус за фиксированный интервал времени (термический параметр). Расчёт производных производится по формулам

$$[11]: \left(\frac{\partial\gamma}{\partial\tau} \right)_T = (1-\gamma)^n K, \left(\frac{\partial\gamma}{\partial T} \right)_\tau = (1-\gamma)^n K E_a \tau / (RT^2), \text{ где } K = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right); K_0 - \text{кон-}$$

станта реакции; n – показатель порядка реакции; E_a – энергия активации; R – газовая постоянная.

На рис. 4 сопоставлены полученные значения кинетического и термического параметров процесса деструкции при заливке сталью для слоёв формы, расположенных на разной глубине от границы контакта с металлом. Расчёты показывают, что в любом элементарном слое смеси термическая составляющая всегда выше кинетической, однако, их значения весьма близки. Отсюда следует, что в случае литья в песчано-смоляные формы для описания структуры смеси и прогноза её теплофизических свойств необходимо исходить из результатов сопряженного моделирования теплообмена и локальной кинетики фазового превращения в различных слоях смеси, что существенно уточняет как тепловой расчет, так и расчет газовых процессов для предупреждения соответствующих дефектов отливок.

Литература

1. **Вейник А.И.** Термодинамика литейной формы. М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.
2. **Atterton D.** Thermal Conductivity of Bentonite Molding Sand // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1953, vol. 173, № 3, p. 453-459
3. **Midea T., Shah J.V.** Mold Material Thermophysical Data. //AFS Transactions. – 2002, vol. 110, pt. 1, p. 121-136
4. **Бройтман О.А., Голод В.М.** Экспериментальное определение теплофизических свойств формовочных материалов. История заблуждений и открытий. //Сб. Литейное производство сегодня и завтра. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.
5. **Бройтман О.А., Голод В.М.** Структурная модель теплообмена в дисперсных формовочных материалах для автоматизированного прогноза их теплофизических свойств. //Труды III международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». М., МИСиС, 2005, с. 271-276
6. **Дульнев Г.Н., Новиков В.В.** Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
7. **Чудновский А.Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Гос. изд-во физ.-матем. литер., 1962. – 456 с.
8. **Gupta M., Yang J., Roy C.** Modeling the Effective Thermal Conductivity in Polydispersed Bed Systems: a Unified Approach Using the Linear Packing Theory and Unit Cell Model // Canad. J. Chem. Eng., 2002, v. 80, Oct., p. 830-839
9. **Раддл Р.У.** Затвердевание отливок. М.: Машгиз, 1960. – 392 с.

10. **Бройтман О.А., Голод В.М.** Роль различных механизмов переноса тепла в формовочной смеси в зависимости от её структуры. //Сб. Материалы межвузовской научной конференции в рамках XXXIII недели науки СПбГПУ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2005, с. 166-167
11. **Серебро В.С.** Основы теории газовых процессов в литейной форме. М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
12. **Бройтман О.А., Голод В.М.** Моделирование распределения газового давления в литейной форме. //Сб. Фундаментальные исследования в технических университетах. Материалы IX Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 295-296

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

В.М. Голод, профессор кафедры физико-химии
литейных сплавов и процессов СПбГПУ

Для задания теплофизических свойств формы при тепловых расчетах первоначально использовали значения, определяемые методами теплофизики, которые являются калориметрическими по своей сущности, т.е. учитывают перераспределение известного количества тепла, выделяемого тепловым источником [1]. Получаемые таким образом характеристики материалов иногда называют «истинными», их измеряют обычно в близких к стационарным условиях при незначительных перепадах температур, что существенно отличается от нестационарного характера теплообмена в неметаллической форме, где перепад температур достигает многих сотен градусов.

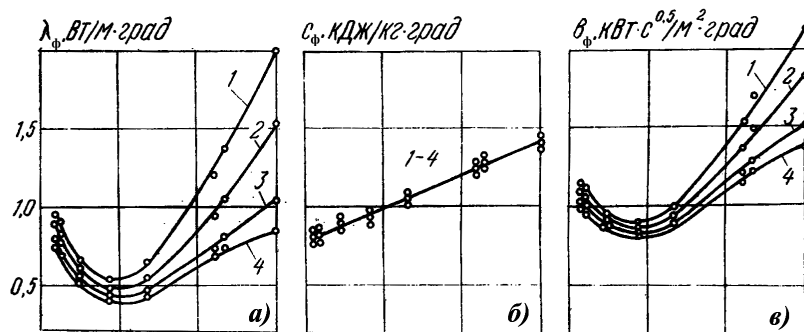


Рис. 1. Влияние температуры на теплопроводность (а), удельную теплоемкость (б) и тепловую активность (в) песчано-глинистой формы [2]
Диаметр зерен (мм): 1÷1,5 (1); 0,5÷1 (2); 0,25÷0,5 (3); <0,25 (4).

Радикальное улучшение достоверности теплофизических характеристик материалов формы было достигнуто в результате появления метода заливки [2 - 3], воспроизводящего характерные особенности прогрева литейной формы. Методом заливки сплавов с разной температурой затвердевания получены данные о температурной зависимости теплоемкости, теплопроводности и тепловой активности формовочных смесей (рис.1) разной влажности, плотности и зернового состава [2].

Методика таких экспериментов предусматривает заливку сплава с известными теплофизическими свойствами (теплота кристаллизации $Q_{кр}$, объ-

емная теплоемкость C_M , температура затвердевания $\vartheta_{кр}$), затвердевающего при постоянной температуре (чистый металл или эвтектический сплав), в сухую форму, имеющую конфигурацию пластины толщиной $\delta=30...40$ мм и длиной (шириной) в 10 раз больше, чтобы можно было не учитывать торцевые потери тепла, с установкой серии термопар (в центре отливки и в форме на расстоянии 2-50 мм от поверхности отливки в средней ее части) для определения продолжительности затвердевания отливки τ и распределения температур в форме. Уравнение для расчета тепловой активности формы b_ϕ имеет вид $Q_{кр}V_o = \sqrt{\frac{2n}{n+1}} b_\phi \vartheta_n F_o \sqrt{\tau}$ (1), где $R = \frac{V_o}{F_o}$ - приведенная толщина отливки, определяемая ее объемом V_o и поверхностью теплоотвода F_o , ϑ_n - температура поверхности отливки. Эффективные характеристики, определяемые на основе интегрального соотношения (1), учитывают совокупное влияние всех слоев формы, прогретых до различных температур и имеющих, соответственно, разные локальные значения объемной теплоемкости.

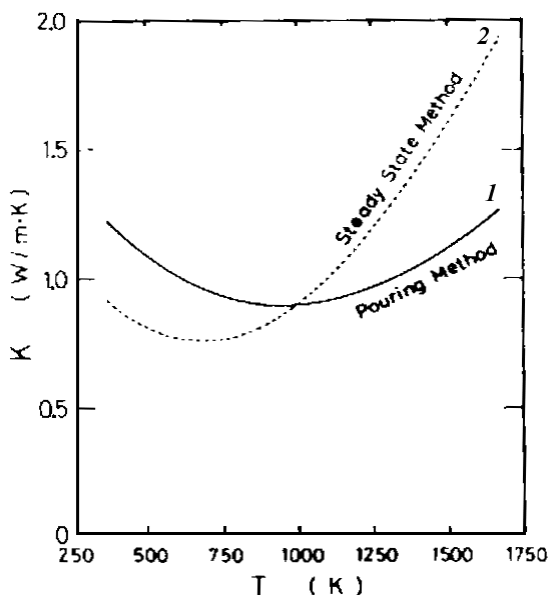


Рис.2. Температурные зависимости теплопроводности формовочной смеси, определяемой методом заливки (1) и калориметрическим путем (2) [4].

По этой причине уместно именовать осредненные по объему формы характеристики *интегрально-эффективными* в отличие от *локально-эффективных* температурно-зависимых свойств, определяемых - в силу дисперсной структуры формовочной смеси - совместным протеканием кондукции (теплопроводности) в зерновом скелете и оболочках связующего, а также конвекции и лучеиспускания в поровом межзеренном пространстве.

Сопоставление значений теплопроводности, полученных методом заливки при иной методике обработки экспериментальных данных [4] (рис. 2), показывает значительное различие как в величине, так и в характере темпе-

ратурных зависимостей. Истолкование этого эффекта, важного для выбора применяемого метода, получено [5] путем аналитического решения задачи прогрева формы при постоянной температуре ϑ_n на ее поверхности методом параболы n -ой степени [2]. Для описания температурного поля использовали уравнение $\vartheta(x, \tau) = \vartheta_n \left(1 - \frac{x}{X}\right)^n$, где $X(\tau)$ - глубина прогрева формы к моменту τ ; n - показатель степени, определяемый путем сравнения с опытными данными или теоретическим путем. Локально-эффективные значения $C(\vartheta)$ и $\lambda(\vartheta)$ задавали полиномами $C(\vartheta) = C_0(1 + \alpha_1\vartheta + \alpha_2\vartheta^2)$ и $\lambda(\vartheta) = \lambda_0(1 + \beta_1\vartheta + \beta_2\vartheta^2 + \beta_3\vartheta^3)$ (3) где $C_0, \lambda_0, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ - коэффициенты регрессии, описывающие опытные данные. Количество поглощенного формой тепла Q_ϕ рассчитывали по формуле (1) и на основе интегрального соотношения $Q_\phi = \int_0^\infty dx \int_{\vartheta_0}^{\vartheta} C(\vartheta) d\vartheta$ (4).

Полученные уравнения для определения *интегрально-эффективных* значений $\lambda_{\varepsilon\phi}$ и $C_{\varepsilon\phi}$ с учетом температурных зависимостей (3) для локально-эффективных характеристик имеют вид:

$$\begin{aligned} \lambda_{\varepsilon\phi} &= \lambda_0(1 + \beta_1\vartheta_n + \beta_2\vartheta_n^2 + \beta_3\vartheta_n^3) = \lambda(\vartheta_n); \\ C_{\varepsilon\phi} &= C_0 \left(1 + \alpha_1\vartheta_n \frac{n+1}{4n+2} + \alpha_2\vartheta_n^2 \frac{n+1}{9n+3} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

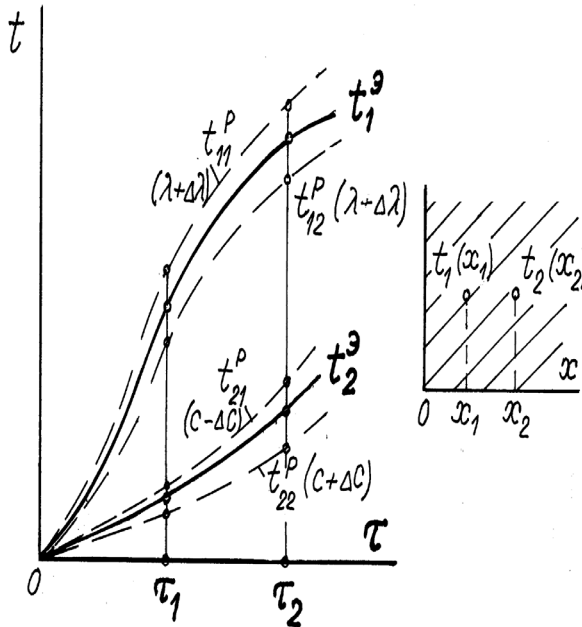
Аналитические решения (5) указывают на *автомодельность* температурного поля формы [6] для температурно-зависимых локально-эффективных теплофизических характеристик $C(\vartheta)$ и $\lambda(\vartheta)$, когда интегрально-эффективные значения $C_{\varepsilon\phi}$ и $\lambda_{\varepsilon\phi}$ остаются неизменными в процессе прогрева формы и их величину определяет значение температуры на поверхности ϑ_n с поправкой на влияние соответствующих коэффициентов ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ и n). Таким образом, для расчета нестационарного прогрева формы с температурно-зависимыми коэффициентами $C(\vartheta)$ и $\lambda(\vartheta)$ можно использовать *постоянные* значения $C_{\varepsilon\phi}$ и $\lambda_{\varepsilon\phi}$, величину которых надо определить на основе экспериментальных данных по формулам (5).

Значение $\lambda_{эф}$, определяемое согласно формулам (5), идентично $\lambda(\vartheta_n)$, т.е. интегрально-эффективное значение совпадает с локально-эффективным для температуры поверхности формы, в то время как $C_{эф}$ меньше $C(\vartheta_n)$ в связи с тем, что в отличие от $\lambda_{эф}$ значение $C_{эф}$ определено интегральной суммой (4) теплосодержаний Q_ϕ внутренних слоев формы, имеющих более низкую температуру ($\vartheta < \vartheta_n$). Таким образом, и производные от них величины $a_{эф} = \lambda_{эф}/C_{эф}$ и $b_{эф} = \sqrt{\lambda_{эф}C_{эф}}$ будут комбинацией локально-эффективного $\lambda(\vartheta_n)$ и интегрально-эффективного $C_{эф}$. Причины этого заключаются в использовании *локального* соотношения для теплового потока на поверхности формы q_ϕ , который определяется выражением $q_\phi = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\lambda(\vartheta_n) n \vartheta_n}{X}$, вводящим в рассмотрение *граничное* локально-эффективное значение $\lambda(\vartheta_n)$, наследуемое во всех последующих соотношениях. В этом случае температурные зависимости $\lambda_{эф}(\vartheta)$, полученные методом заливки (рис.1) и калориметрическим путем (кривая 2 на рис.2), хорошо согласуются. Совсем другой результат (кривая 1 на рис.2) следует при использовании интегрального выражения (4) для расчета $\lambda_{эф}$ с помощью соотношения $\partial Q_\phi / \partial \tau = -\lambda_n (\partial \vartheta / \partial x)_{x=0}$.

Во избежание серьезных ошибок и недоразумений следует строго придерживаться *принципа*: применяемый расчетный аппарат должен использоваться комплексно – не только на этапе анализа тепловых процессов, но и при экспериментальном определении соответствующих теплофизических параметров.

Определение локально-эффективных значений теплофизических характеристик формовочных материалов методом заливки на основе статистического анализа результатов численного моделирования условий эксперимента [7] предполагает использование экспериментальных термических кривых, полученных в контрольных точках (рис.3), для решения обратной задачи.

Коэффициенты уравнений (3), описывающих температурные зависимости $C(\vartheta)$ и $\lambda(\vartheta)$, находят путем статистического анализа массива опытных дан-



ных $t_i^g(x, \tau)$ в сравнении с результатами компьютерного моделирования $t_i^p(x, \tau)$ условий проведения эксперимента.

Рис. 3. Сопоставление температурных кривых прогрева в различных точках ($x_1, x_2, \dots$) формы по результатам эксперимента $t_i^g(x, \tau)$ с данными численного моделирования $t_i^p(x, \tau)$ при варьировании значений теплоемкости ($C \pm \Delta C$) и теплопроводности ($\lambda \pm \Delta \lambda$) материала формы

Для этого проводят серию численных расчетов, организуемых по методу ортогонального планирования экспериментов [8], варьируя значения $C(\vartheta)$ и $\lambda(\vartheta)$ в пределах $(C(\vartheta) \pm \Delta C; \lambda(\vartheta) \pm \Delta \lambda)$, отвечающих вероятному интервалу их изменения.

На заключительном этапе решают задачу минимизации среднеквадратичного отклонения совокупности расчетных значений температуры $t_i^p(x, \tau)$ от экспериментальных $t_i^g(x, \tau)$

$$\Phi(Z) = \sum_n [t_i^p(x, \tau) - t_i^g(x, \tau)]^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

результатом чего являются оптимальные значения коэффициентов регрессии для моделей (3).

Важным преимуществом этого метода является отсутствие ограничений, налагаемых на конфигурацию и размеры заливаемого образца. В связи с этим метод может быть успешно применен не только в лабораторных условиях, но и непосредственно в производстве, что позволяет определять теплофизические характеристики формы в естественных условиях уплотнения, зернового и минералогического состава, влажности смесей и т.д. При этом количество и расположение термопар в форме могут быть произвольными, поскольку геометрические характеристики исследуемой системы адекватно описывает ее компьютерная модель.

Выбор любого из перечисленных подходов к определению теплофизических характеристик формовочных материалов зависит от принятого уровня требований к погрешности численного расчета, а также уровня квалификации исполнителей в сочетании с приемлемой трудоемкостью соответствующей методики. Важно лишь раз подчеркнуть, что результаты выполнения соответствующих процедур позволяют получить уточненные данные о теплофизических характеристиках формовочных материалов при условии соблюдения сформулированного выше принципа соответствия применяемой методики определения свойств смеси и их расчетного использования.

Литература

1. **Atterton D.** Apparent thermal conductivities of moulding materials at high temperatures // J. Iron Steel Inst., 1953, v.174, № 7.
2. **Вейник А.И.** Термодинамика литейной формы. – М., Машиностроение, 1968.
3. **Kubo K. et al.** Measurement of thermal properties of sand molds by pouring method using aluminium //J. Japan Foundr. Soc., 1981, v.53, № 6.
4. **Kubo K., Pehlke R.D.** Thermal properties of molding sand //Trans. Amer. Foundrym. Soc., 1985, v. 93.
5. **Бройтман О.А., Голод В.М.** Эффективные теплофизические характеристики формовочных смесей. Обратная задача. // Сб. Высокие интеллектуальные технологии и генерация знаний в образовании и науке. – СПб., СПбГПУ, 2005.
6. **Анастасиади Г.П., Голод В.М.** Автомодельность температурного поля песчаной формы // Сб. Тепловые процессы в отливках и формах. – М., Наука, 1972.
7. **Горн Э.П., Голод В.М. и др.** Определение теплофизических характеристик смесей на основе статистического анализа результатов численного моделирования процесса затвердевания отливок // Сб. Литейное производство сегодня и завтра. - СПб., СПбГТУ, 2001.
8. **Голод В.М., Денисов В.А.** Теория, компьютерный анализ и технология стального литья. – СПб., ИПЦ СПГУТД, 2007.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

В.М. Голод, профессор кафедры физико-химии
литейных сплавов и процессов СПбГПУ

Кристаллизационные процессы, несомненно, являются самыми важными из литейных процессов, поскольку от их кинетики и морфологии зависят размеры, фазовый состав и распределение как структурных составляющих (зерна, дендритные оси и т.д.), так и включений (газовых и неметаллических), количество, величина и размещение которых непосредственно зависят от характера формирующейся структуры. Системный характер взаимного влияния литейных процессов разной физико-химической природы (тепловых, усадочных, ликвационных, фильтрационных и т.д.) на ход и результаты процесса кристаллизации [1] приводит к тому, что моделирование структурообразования представляет значительную сложность и его реализация в полном объеме является делом близкого, но все же – будущего этапа разработки соответствующих компьютерных моделей [2]. В первую очередь это связано с тем, что кристаллизационные процессы характеризуются существенно различным масштабом протекания – от *макроуровня*, на котором формируется температурное поле и соответствующее переохлаждение расплава, до *суб-микроуровня*, где определяется состав и размеры группировок ассоциированных атомов сплава [3], являющихся базой для возникновения зародышей кристаллизации.

Несмотря на важность прогнозирования структуры для обеспечения требуемого уровня качества литого металла, далеко не все пакеты моделирования литейных процессов в составе САПР имеют соответствующие модули, а их информационное обеспечение нередко ниже всякой критики. Причиной этого является незавершенность разработки ряда аспектов теории кристаллизации (в частности, механизма формирования дендритной морфологии, условий перехода от столбчатой структуры к равноосной и т.д.) и недостаточная

экспериментальная изученность процессов структурообразования в силу их сложности. Однако, потребности практики неумолимо диктуют разработку различных вариантов компьютерных программ для моделирования кристаллизации [4], в связи с чем важно, чтобы их использование происходило в условиях, когда пользователи имеют отчетливое представление о сильных и слабых сторонах применяемых программ и уделяют необходимое внимание их адаптации к условиям производства.

Для анализа условий кристаллизации решающее значение имеет моделирование тепловых процессов [5], и определение термического переохлаждения ΔT на основе соотношения

$$C\rho_M \frac{\partial(\Delta T)}{\partial \tau} = \nabla q - L\rho_M \frac{\partial(V/V_0)}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где C , L , ρ_M – удельная теплоемкость, скрытая теплота кристаллизации и плотность расплава; $\Delta T = t_{кр} - t$; $t(\tau)$ – зависимость температуры кристаллизующегося объема от времени; V/V_0 – относительный объем твердой фазы; q – тепловой поток в металле; τ – время. При этом выделение твердой фазы не должно быть предопределено равновесными условиями, наиболее достоверно описываемыми термодинамической моделью фазовых превращений в сплаве [6], а формируется путем расчета зарождения и роста кристаллов твердой фазы.

При совместном выделении твердой фазы на вынужденных зародышах N_i различной природы, отличающихся физико-химическими параметрами и, соответственно, характеристиками скорости образования $n_i(\Delta T)$ и скорости роста $\mathcal{G}_i(\Delta T)$, для конкурентных условий образования стабильных и метастабильных фаз (например, аустенито-графитной α и аустенито-цементитной β эвтектик в чугунах при возникновении отбеленной структуры) расчетное соотношение имеет вид [7]:

$$\frac{V}{V_0} = 1 - \exp \left[- \sum \varphi_i N_i \left(\int_0^\tau \mathcal{G}_i(\Delta T_i) d\tau \right)^3 - \sum \varphi_i \int_0^{\tau_i} n_i(\Delta T) \left(\int_{\omega_i^*}^{\omega_i} \mathcal{G}_i(\Delta T_i) dt \right)^3 d\omega_i^* \right], i = 1...k, \quad (2)$$

где ϕ -коэффициент формы кристаллов; k -количество совместно выделяющихся фаз; термическое переохлаждение ΔT_i отсчитывается для каждой фазы от соответствующей равновесной критической температуры $(T_{кр})_i$ с учетом многокомпонентного состава сплава и изменения концентрации жидкой фазы.

Это обстоятельство вовлекает в анализ микроликвационные процессы перераспределения компонентов между фазами и внутрифазовой диффузии в жидком и твердом металле.

Моделирование образования центров кристаллизации на базе взвешенных в расплаве активных включений различного состава, размеров и количества требует решения задачи *конкурентного* вынужденного зарождения $N_B(\tau)$ с учетом разной движущей силы, оцениваемой с помощью термодинамических соотношений для разности свободной энергии твердой и жидкой фаз ΔG_V , и различия межфазных капиллярных сил σ и углов смачивания θ :

$$n_B(\tau) = ((N_0^*)_i - (N_B)_i(\tau)) \exp\left(-\frac{\Delta G_B^*}{KT}\right),$$

где $\Delta G_B^* = \phi \frac{\sigma^3}{\Delta G_V^2} (2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2 / 4$; $(N_0^*)_i$, $(N_B)_i = \int_0^\tau (n_B)_i(\tau) d\tau$ - концентрация

включений в расплаве и общее число зародышей i -го рода. Важное значение для корректной оценки условий зарождения имеет возможность расчета состава, концентрации и размеров *субмикрогруппировок*, возникающих в расплаве в зависимости от характера сил межатомного взаимодействия различных компонентов на основе теории ассоциированных растворов [3].

Наиболее универсальной формой роста кристаллов твердой фазы из расплава, формирующих металлическую основу сплава, если отвлечься от многофазной кристаллизации - перитектической или эвтектической, является дендритная, при которой формируется система стволов и боковых ветвей, ориентированных в соответствии с характером кристаллической структуры сплава [7]. Для решения задачи *макроуровня* - моделирования размеров, морфологии и ориентации макрозерен нашел широкое применение метод

клеточных автоматов [8], в котором сделана попытка определить условия роста зерен на основе эвристического набора решающих правил поведения, не имея в настоящее время возможности детерминированного математического описания этого процесса. Изменение морфологии растущих дендритных образований на различных стадиях кристаллизации обуславливает радикальное изменение характера диффузионных процессов. Интенсивное накопление примеси в *междендритных* пространствах у фронта фазового превращения – боковой поверхности ствола дендрита с периодическим ветвлением на этапе продольного роста до смыкания дендритных систем сменяется практически полным выравниванием распределения примеси в узких междоосных промежутках *внутридендритных* пространств. Учет этих геометрических особенностей и связанных с ними ликвационных процессах затруднен и производится весьма приближенно. Сопряженное описание температурных, концентрационных и кристаллизационных процессов в *мезо- и микромасштабе* с учетом анизотропии роста дендритных кристаллитов успешно осуществлено методом фазового поля [9]. Важно при этом отметить, что эти большие успехи достигнуты ценой столь значительных затрат вычислительных ресурсов, которые недоступны при компьютерном моделировании литейной технологии.

Для переохлажденного на величину ΔT расплава расчет термического $P_T = Iv^{-1}(\frac{c}{L}\Delta T)$ и концентрационного $(P_C)_i = P_T \frac{a_L}{D_i}$ критериев Пекле дает возможность определить радиус кривизны вершины дендрита R с помощью обобщенного для n -компонентного сплава уравнения [10],

$$\frac{4\pi^2\Gamma}{R^2} + \frac{2}{R} \sum_{i=1}^n \frac{p_i(C_0)_i (1-k_i)(P_C)_i}{1-(1-k_i)Iv[(P_C)_i]} + \frac{2\Delta T}{R} = 0,$$

рассчитать скорость роста дендрита $\mathcal{G} = 2a_L P_T / R$, а также найти состав образующейся твердой фазы

$$C_S^* = kC_L^* = kC_0[1-(1-k)Iv(P_C)]^{-1},$$

формирующей стволую часть дендритного скелета, что позволяет отдельно оценить влияние компонентов сплава на условия роста дендрита, формирование его структуры и состава (рис. 1). Здесь α_L -температуропроводность расплава; D -коэффициент диффузии в жидкой фазе; Γ -параметр Гиббса-Томсона; k -коэффициент распределения компонентов между фазами; p -наклон линии ликвидуса.

На рис. 1 показано раздельное и совместное влияние различных компонентов стали на изменение скорости роста $\mathcal{V}$ и радиуса кривизны R вершины дендрита при различных значениях термического переохлаждения расплава. В связи с существенной зависимостью ряда параметров (k , p , Γ , L и др.) от содержания углерода и характера кристаллической структуры образующейся твердой фазы отмечается существенное влияние на R и $\mathcal{V}$ содержания углерода, связанное не только с особенностями изменения величины этих параметров для системы Fe-C, но и их заметным отличием при выделении δ - и γ -фазы. С повышением величины переохлаждения скорость роста увеличивается, при этом соответственно усиленному накоплению примеси на вершине уменьшается радиус кривизны R , что сказывается на величине междоусных промежутков дендрита.

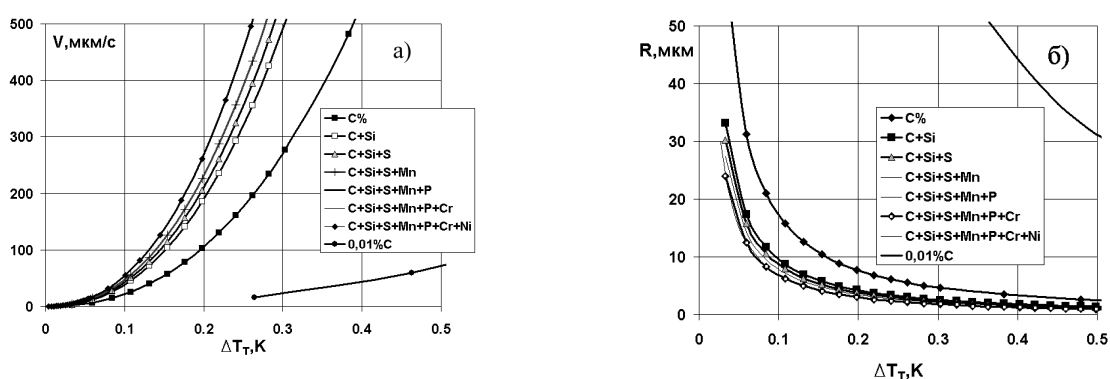


Рис. 1. Влияние компонентов стали 15Л на скорость роста (а) и радиус кривизны (б) дендритного ствола в зависимости от переохлаждения расплава при их последовательном введении в сопоставлении с расплавом чистого железа (0, 01 % С)

Наиболее сильное удельное (на 1 %) влияние на параметры дендритного роста оказывают С, S и P, имеющие наименьшие значения коэффициента

распределения с железом ($0 < k < 0,3$), далее идет кремний и марганец, слабее всего воздействие хрома и никеля, у которых коэффициент распределения близок к единице ($0,8 < k < 1$). При последовательном вводе в железо различных компонентов преобладающее влияние оказывает углерод, а вклад всех остальных элементов намного меньше, в связи с чем влияние состава сталей несколько нивелируется.

Важной характеристикой *микроморфологии* дендрита является междущее расстояние λ между ветвями второго порядка, величина которого определяет возникновение и развитие междущих стыков при образовании непрерывного скелета твердой фазы, развитие газоусадочной микропористости, величину и динамику изменения коэффициента проницаемости дендритного скелета в процессе фильтрационного перемещения жидкой фазы, а также развитие внутридендритной ликвации, диктующей темп выделения твердой фазы и возникновение неравновесных фаз на заключительном этапе кристаллизации. Для многокомпонентных сплавов с учетом различных для каждого i -го компонента значений $(C_0)_i$, k_i , D_i и p_i на основе решения, полученного в [11] для бинарного сплава, можно оценить влияние каждого и всей совокупности компонентов из обобщенного уравнения [7]:

$$\frac{9R^2}{\Gamma} \sum \frac{p_i(1-k_i)(C_0)_i}{(D_L)_i} = \sqrt{2\xi} \left(\frac{\phi^2 - 1}{2\xi} + \left(\frac{2\pi}{\xi} \right)^2 \right),$$

где D_L - коэффициент диффузии в жидкой фазе; $\xi = \frac{\eta}{R}$; η - первичные междущие промежутки второго порядка, возникающие на боковой поверхности дендритного ствола; ϕ - волновое число ($\phi=4$ для решетки с кубической симметрией); суммирование для сплавов на основе железа производится с учетом зависимости параметров k_i и p_i от структуры выделяющейся твердой δ - или γ -фазы (рис. 2).

Наиболее значительное сокращение междущих промежутков происходит при введении серы и фосфора, слабее всего влияние хрома и никеля, что в первую очередь обусловлено влиянием этих компонентов на ско-

рость роста ствола дендрита, отмеченным выше на рис. 1. Различие физико-химических параметров, связанных с характером кристаллической решетки выделяющейся δ -или γ -твердой фазы, оказывает дополнительное значительное влияние, ассоциирующееся с изменением содержания углерода в сплавах.

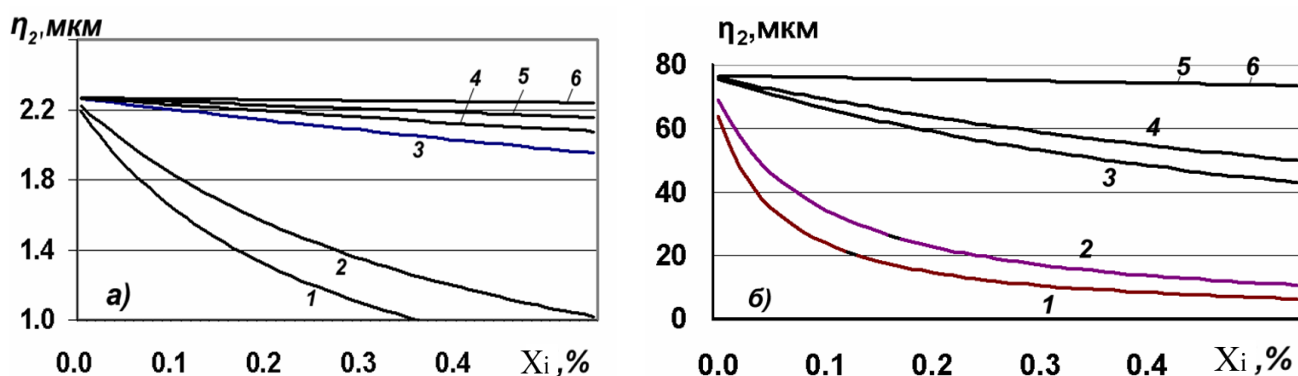


Рис. 2. Изменение междоусных промежутков дендрита η_2 в зависимости от содержания третьего компонента сплавов Fe-C- X_i при выделении γ - (а) и δ - (б) фазы для термического переохлаждения $\Delta T_r = 0.5$ K

Содержание углерода: 0.5 % (а); 0.1 % (б); 1 - P; 2 - S; 3 - Si; 4 - Mn; 5 - Cr; 6 - Ni

Для расчета дальнейшей кинетики изменения междоусных промежутков от начального значения необходимо учесть коалесценцию и кинетику «геометрического отбора», которая пока не имеет подходящего математического описания, в связи с чем чаще используют конечные значения междоусных промежутков λ , получаемые при экспериментальном исследовании структуры литых заготовок [12].

Произведенная оценка параметров микроструктуры позволяет рассчитать ход зависимых от них процессов выделения твердой фазы - с учетом характера процесса внутридендритной ликвации.

Анализ перераспределения элементов на различных стадиях неравновесной кристаллизации сплавов для условий равномерного распределения компонентов в жидкой фазе и локального равновесия на межфазной границе при частичном ($0 \leq \alpha \leq 1$) протекании диффузии в образующейся твердой фазе на основе уравнения [13]

$$C_s^* = kC_0 \left[1 - \left(1 - \frac{2\alpha k}{1 + 2\alpha} \right) m \right]^{\frac{k-1}{1 - \frac{2\alpha k}{1 + 2\alpha}}}, \quad (3)$$

позволяет рассчитать ход выделения твердой фазы в интервале кристаллизации, соответствующее смещение температуры неравновесного солидуса и значение температурного интервала затвердевания на основе многокомпонентного соотношения, обобщающего соотношение (3) [7]:

$$(\Delta t)_N = \sum_{(n)} \Delta t_i = \sum_{(n)} p_i (C_0)_i \left\{ \left[1 - (1 - \alpha_i k_i) m \right] \frac{k_i - 1}{1 - \alpha_i k_i} - 1 \right\}, \quad (4)$$

где m - количество выделившейся твердой фазы; $\alpha_i = \frac{D_i}{g\lambda}$; D_i - коэффициент диффузии i -го компонента в твердой фазе.

Прямым следствием отмеченного характера диффузионных процессов при кристаллизации является влияние совокупности компонентов стали на температурный интервал затвердевания. Определяющее влияние на величину $\Delta t_{инт}$ оказывает содержание углерода, причем повышение интенсивности теплоотвода (скорости охлаждения в пределах 1-50 К/с) незначительно влияет на величину $\Delta t_{инт}$ вследствие близкого к равновесному диффузионного характера кристаллизации ($\alpha \cong 1$) даже при повышенных значениях α (рис. 3).

Важной особенностью уравнения (4) является то, что оно позволяет рассматривать условия кристаллизации, отвечающие различной степени диффузионной неравновесности α_i по разным компонентам, что соответствует реальным условиям перераспределения компонентов между фазами. Как показывает сводная диаграмма, приведенная на рис. 3, углерод активно диффундирует в железе ($\alpha \cong 1$), имея достаточно высокий коэффициент диффузии $D_C^{\delta,\gamma}$, в то время как такие компоненты, как Si, Mn, Cr, Ni, особенно в γ -Fe, диффундируют весьма слабо ($\alpha \ll 1$). Таким образом, формула (4) отражает реальный режим *параравновесия* при кристаллизации сталей.

Расчеты хода неравновесной кристаллизации, произведенные для условий, отвечающих интенсивности теплоотвода при затвердевании стальных

отливок, показывают (рис. 3), что вклад компонентов замещения в понижение температуры кристаллизующегося металла Δt обычно незначителен, вследствие чего определяющее влияние на ход кристаллизации стали оказывает углерод.

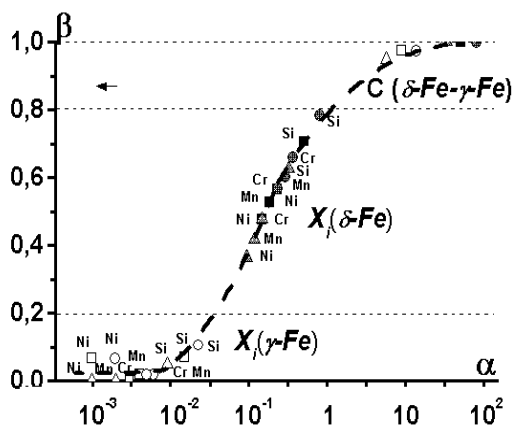


Рис. 3. Влияние условий кристаллизации, выражаемых кинетическим параметром $\alpha = D/9\lambda$, на величину диффузионной равновесности β для различных компонентов X_i в сплавах Fe- X_i при выделении δ - и γ -фазы

В силу того, что углерод обладает высокой диффузионной подвижностью как в жидкой, так и в твердой фазе, процесс выделения твердой фазы при кристаллизации многокомпонентного сплава (стали) в условиях неметаллической литейной формы происходит с незначительным отклонением от равновесия. Этот результат, наглядно демонстрируемый на рис. 3, хорошо согласуется с данными термодинамического моделирования (рис. 4).

Модель Шейля ($\alpha_c=0$; $\alpha_{Si}=0$) дает наиболее существенное отклонение от равновесной кристаллизации и прогнозирует такое резкое снижение солидуса в стали, которое весьма далеко от экспериментальных данных, в то время как для α_{Si} , изменяющемся от 0 до 1, при $\alpha_c=1$ отмечается весьма заметное и вполне реальное по величине отличие в характере (и темпе) выделения твердой фазы от равновесных условий, что необходимо принимать в расчет при моделировании затвердевания отливок, причем прогнозируемое смещение точки солидуса хорошо согласуется с данными термического анализа [14].

Расчеты показывают, что получаемые по формуле (4) данные хорошо согласуются с результатами термодинамического моделирования сплавов в пределах незначительного изменения параметров k , p , D_L и др. при содержа-

нии компонентов, не превышающем 3-5 ат.%, что характерно для широкого круга углеродистых и низколегированных сталей.

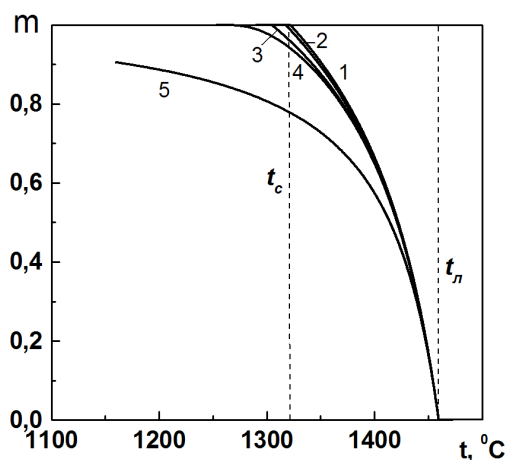


Рис. 4. Ход кристаллизации сплава
Fe - 0,9ат % C - 0,5 ат % Si:
1- $\alpha_C=1$; $\alpha_{Si}=1$; 2- $\alpha_C=1$; $\alpha_{Si}=0,5$;
3 - $\alpha_C=1$; $\alpha_{Si}=0,1$;
4 - $\alpha_C=1$; $\alpha_{Si}=0$; 5 - $\alpha_C=0$; $\alpha_{Si}=0$

Приведенные данные наглядно иллюстрируют системный характер взаимного влияния тепловых, диффузионных и кристаллизационных процессов на условия затвердевания отливки, ход выделения твердой фазы и соответствующие особенности формирующейся структуры литого металла, что необходимо принимать во внимание при компьютерном анализе технологии.

Литература

1. Галенко П.К., Голод В.М. Системный анализ литейных процессов // Литейное производство, 1989, № 10.
2. Boettinger W.J. et al. Solidification microstructures: recent development, future directions // Acta Materialia, 2000, v. 48, № 1.
3. Щербаков Ю.А., Савельев К.Д., Голод В.М. Применение теории ассоциированного раствора для оценки вероятной структуры расплавов Fe-C и Fe-Si на основе вычисления их плотности // Сб. Литейное производство сегодня и завтра.- СПб., СПбГПУ, 2006.
4. Stefanescu D.M. Methodologies for modeling of solidification microstructure and their capabilities // ISIJ Internat., 1995, v. 35, № 6.
5. Гиршович Н.Г. О взаимосвязи между процессами затвердевания и кристаллизации.— Сб. Кристаллизация металлов, М., АН СССР, 1960.
6. Савельев К.Д., Голод В.М. Моделирование процессов и объектов в металлургии. Термодинамическое моделирование многокомпонентных литейных сплавов на основе железа. — СПб, СПбГТУ, 2001.

7. **Голод В.М., Денисов В.А.** Теория, компьютерный анализ и технология стального литья // СПб., ИПЦ СПГУТД, 2007.
8. **Rappaz. M.** A pseudo-front tracking technique for the modelling of solidification microstructures in multi-component alloys // *Acta Mater.*, 2002, v.50, № 15.
9. **Galenko P.K., Zuravlev V.A.** Physics of dendrite. – Singapore, World Scientific, 1994.
10. **Rappaz. M.** A pseudo-front tracking technique for the modelling of solidification microstructures in multi-component alloys // *Acta Mater.*, 2002, v.50, № 15.
11. **Yoshioka H. et al.** Crystal growth and its morphology in the mushy zone // *Acta Mater.*, 2004, v.52, № 15.
12. **Флемингс М.** Процессы затвердевания. – М., Машиностроение, 1977.
13. **Ohnaka I.** Mathematical analysis of solute redistribution during solidification with diffusion in solid phase // *Trans. ISIJ*, 1986, v.26, № 12.
14. **Mizukami et al.** Initial solidification behaviour of ultra low, low and middle carbon steel. // *ISIJ Int.*, 1999, v.39, № 12.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМО-НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССАХ И ПРОГНОЗ ОБРАЗОВАНИЯ СОПУТСТВУЮЩИХ ДЕФЕКТОВ

А.Г. Попов, С.В. Обухов

НПО «МКМ», Удмуртский государственный университет

Проведен обзор основополагающих положений механики сплошной среды, являющихся основой рассмотрения механически-напряженного состояния сплошной среды вообще и ее термо-упруго-пластичного состояния в частности.

На примере кристаллизации с резким фронтом в упругом приближении («задача Стефана для термоупругости») рассмотрены принципиальные отличия стандартной задачи термоупругости от задачи расчета напряженно-деформированного состояния при затвердевании расплава, связанные с физикой соответствующего фазового перехода и кинематикой деформирования твердой фазы.

Рассматривается аналитическое решение модельной задачи о расчете напряженно-деформированного состояния в процессе кристаллизации сферически симметричной шарообразной отливки. Результаты сравниваются с данными, полученными в стандартной постановке, а также используются для тестирования численных 3D алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния.

Обсуждается применимость рассматриваемой модели к процессам кристаллизации в двухфазной зоне и проводится качественный анализ образования сопутствующих дефектов.

ЗАДАЧИ САПР И ЦИКЛ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Ю.А. Щербаков

Бюро литейных процессов Балтийского завода

Развитие и интеграция систем автоматизированного проектирования предоставляет пользователям все более широкие возможности, эффективное использование которых – непростая задача. Подготовки производства литых деталей с применением САПР имеет следующие особенности:

1. Литые детали часто имеют сложную конфигурацию. Кроме того, повсеместное внедрение систем автоматизированного проектирования и компьютерного анализа стимулирует появление геометрически всё более сложных объектов. При этом только специалист-литейщик может определить, какие упрощения геометрии допустимы при построении объемной модели для подготовки производства и моделирования литейной технологии.

2. Чертеж литых деталей часто является условным, и, по сути, представляет собой эскиз, на котором заданы лишь существенные размеры (отражающие геометрию сопрягаемых деталей или подлежащие механической обработке). Это может приводить к тому, что чертеж и изготовленное по нему изделие будут соответствовать по заданным размерам, но внешне отличаться. На рис.1 показан фрагмент чертежа якорного клюза, на который наложена его компьютерная модель. Видно, что участок в виде трубы на чертеже и на модели совпадают, однако вид «шляпы» существенно отличается.

3. Построить трехмерную модель (изготовить модель для формовки) невозможно без ссылки на сопрягаемую геометрию. На рис.2. приведены участки чертежа форштевня ледокола. На длине 17 метров и высоте 12,6 метров задано четыре сечения, отражающие общую идею геометрии форштевня. Кроме того, существует требование сопряжения форштевня с обводами корабля, заданными теоретическим чертежом либо файлом в формате IGES.

4. При использовании созданной конструкторами трехмерной модели она должна быть упрощена (убраны фаски, отверстия и т.д.) и дополнена

припусками, технологическими напусками, моделями прибылей и т.д. Если подобные изменения в трехмерной модели конструкторами не предполагались, возникают затруднения, трудоемкость "лечения" модели может оказаться недопустимо велика.

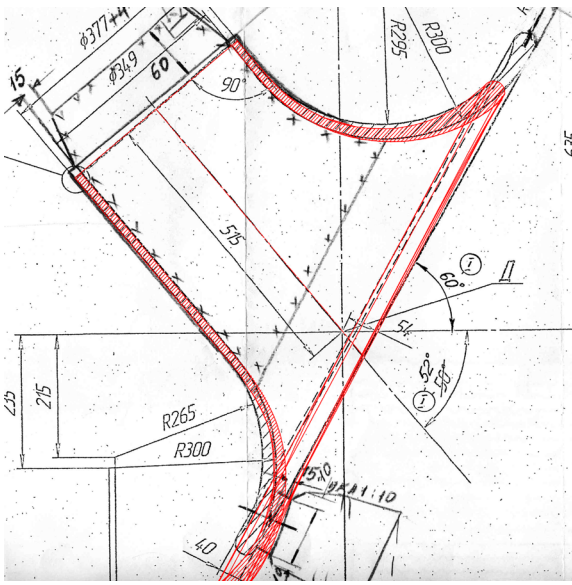
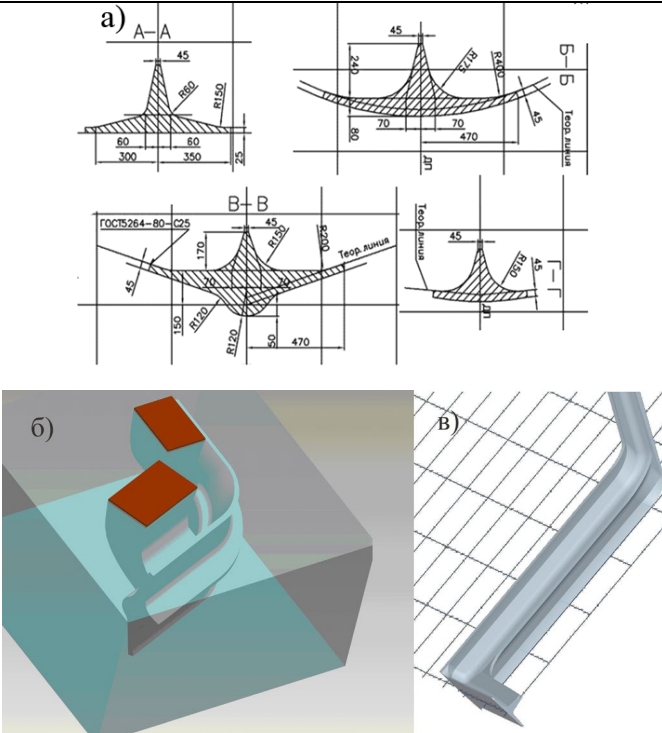
5. Существуют сложные геометрические объекты (например, лопасти рабочих колес турбин, гребные винты), при проектировании которых применяются математические абстракции, т.е. изображенные на чертеже проекции не имеют физического соответствия. Неспециалисту не удастся в разумные сроки понять, как интерпретировать чертеж таких объектов. Применение САПР позволяет в таком случае использовать компьютерную модель, созданную проектантом. Чертеж в этом случае необходим для контроля.

Таким образом, компьютерные модели отливок являются сложными и часто требуют применения «тяжелых» систем моделирования (Unigraphics, Pro/ENGINEER). Крайне желательно, чтобы компьютерную модель отливки выполнял инженер-литейщик.

Грамотное применение САПР потенциально позволяет специалисту сосредоточить технологическую подготовку производства в одних руках. Если для небольшого предприятия это – единственно разумное решение, то для крупного производства ситуация не очевидна. Преимущества такого подхода – личная ответственность за качество продукции, оперативность принятия решений, уменьшение документооборота. Недостатки – риск изначально неверно прочесть чертеж, соблазн скрыть недостатки в производстве, зависимость от конкретного человека. Видимо, для крупного предприятия целесообразно, независимо от количества стадий и технологических циклов определить минимально возможное количество специалистов для ведения конкретного проекта, но не менее трех, обязательно разорвав при этом информационную цепь на этапе выходного контроля и сдачи продукции.

Удачным примером служит производство гребных винтов на ОАО "Балтийский завод". Деревянная модель лопасти винта делается под руководством технолога-литейщика, одновременно программистами разрабатывается

таблица теоретических катетов, являющаяся вместе с чертежом сдаточным документом. Далее деревянная модель проверяется программистом, который будет обрабатывать отливку на станке с ЧПУ. Таким образом, чертеж читается два раза, успешная проверка модели программистом гарантирует, что технолог-литейщик и программист прочитали чертеж одинаково. После механической и слесарной обработки геометрия винта принимается ОТК по данным чертежу и таблице катетов, рассчитанной до механической обработки.

	
Рис.1. Чертеж и сечение трехмерной модели якорного клюза	Рис. 2. Фрагменты чертежа форштевня (а), модель отливки сегмента форштевня (б) и трехмерная модель (участок форштевня) (в)

Применение САПР можно проиллюстрировать на примере подготовки производства лопасти для гидротурбины. Далее перечислены отдельные работы и потребовавшееся для них время.

- Компьютерная модель лопасти (рис.3) предоставлена организацией-проектантом. Для изготовления деревянной модели построены шаговые угольники (рис.4). При этом определено оптимальное положение отливки в форме исходя из минимума высоты формы, геометрия упрощена, добавлены

припуски на механическую обработку, определена масса отливки, ожидаемый выход годного. (4 часа)

- Для контроля геометрии разработана специальная таблица (список контролируемых точек в соответствующих радиусах и углах). За счет возможностей параметризации, заложенной в CAD-системе, одни и те же построения можно отнести к двум разным объектам: при задании усадки 0%, обнулении припусков таблица относится к геометрии детали, иначе – к геометрии деревянной модели. (1 час)

- По компьютерной модели детали спроектированы кромочные шаблоны, шаблоны проверки геометрии (рис.5) и фальш-ступица (трехмерная модель, чертеж) для крепления лопасти на фрезерном станке. (6 часа)

- Генерированы управляющие программы для фрезерного станка с ЧПУ. Программы проверены на виртуальном станке на отсутствие недорезов/зарезаний, столкновений с заготовкой (рис.6) и технологическими приспособлениями. (8 часов).

Перечисленные работы выполнены в САПР Pro/ENGINEER, на рис.6 изображен виртуальный станок VeriCut.

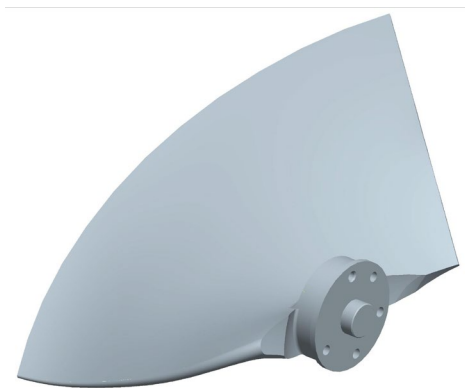


Рис.3. Трехмерная модель лопасти гидротурбины

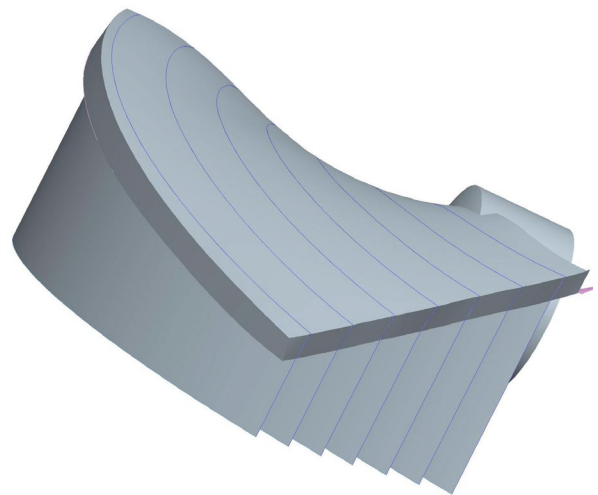


Рис.4. Трехмерная модель отливки лопасти с шаговыми угольниками

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СРЕДСТВАМИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА LVMFlow

А.С. Прокошев
НПО «МКМ», Удмуртский государственный университет

Рассмотрены основные аспекты работы с системой компьютерного моделирования литейных процессов LVMFlow и ее применимость для решения задач по отработке и оптимизации литейной технологии. В режиме реального времени проводится демонстрация возможностей LVMFlow.

На примере тестовых отливок произведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Приведена информация о практическом применении LVMFlow на российских предприятиях и конкретные данные по экономическому эффекту от использования этой системы.

Представлена информация о последних разработках и перспективах развития системы компьютерного моделирования литейных процессов LVMFlow на 2007-2008 г.

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПАКЕТА POLYCAST

Ю.А. Щербаков

Бюро литейных процессов Балтийского завода

POLYCAST - конечно-разностный решатель тепловой и гидродинамической задач, разработанный с учетом специфики литейного производства. Пакет создан на кафедре физико-химии литейных сплавов и процессов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. В процессе разработки решались конкретные производственные задачи. Таким образом, с одной стороны, пакет реализует современные научные представления в области литейного производства в виде обобщенных математических моделей и численных алгоритмов, с другой - максимально приближен к задачам, решаемым технологами.

Интерфейс пакета выделяет понятие проекта, включающего варианты реализации технологии. База данных содержит информацию о чугунах, бронзах, сталях, алюминиевых сплавах, наполнительных, облицовочных смесях, разнообразных утеплителях. База по сплавам генерирована в основном методом термодинамического моделирования. База по формовочным материалам набрана путем термического анализа. Для определения теплофизических свойств сплавов методом термодинамического моделирования разработан специализированный модуль. Также имеется специальный модуль для решения обратной задачи теплопроводности – для отыскания температурной зависимости теплоемкости и теплопроводности по результатам термического анализа. Эти модули являются механизмом адаптации пакета к условиям конкретного производства.

В разное время пакет в разной комплектации был поставлен на ФГУП «ПО «Северное машиностроительное предприятие», ОАО «КаМаз», ОАО «Балтийский завод». Серия работ была проведена на ОАО «ОМЗ-Спецсталь».

Любой специализированный программный продукт предполагает специальное образование. Пакетом POLYCAST может воспользоваться инже-

нер-металлург, имеющий представление о принципе конечно-разностного решения дифференциальных уравнений тепломассопереноса и о математических моделях, используемых при описании литейных процессов. Сопутствующим навыком является трехмерное моделирование, т.к. геометрия отливки передается в пакет в формате стереолитографии.

Применение узкоспециализированных программных продуктов сопровождается следующими трудностями:

- Непонятен смысл исходных данных. Например, коэффициент теплоотдачи между металлом и формой (термическое сопротивление) в разных математических моделях имеет различный физический смысл и численное значение. Кроме того, он может выступать величиной, адаптирующей численный расчет к конкретной задаче в условиях недостаточной точности задания свойств сплава, формовочных материалов, граничных условий и т.д.
- Неизвестна необходимая степень точности исходных данных. Например, можно ли взять теплопроводность песчано-цементной смеси из литературы или надо её измерять в условиях конкретного производства.
- Неясно, как интерпретировать полученные значения. Например, пористость два процента – это уменьшение плотности металла, вероятное появление рыхлоты или, в случае недостаточной дегазации металла, зона развития газосадочной пористости ?
- Что делать, когда пакет не способен решить специфическую, разовую задачу ?

Ответы на такие вопросы отсутствуют в руководстве пользователя и в специальной литературе. Очевидно, что одним из факторов, определяющих качество моделирования, является наличие прямого контакта с разработчиком пакета. Это же позволяет надеяться на оперативное решение разовых специфических задач и задач информационной интеграции. Взаимодействие разработчиков и пользователей POLYCAST есть пример именного такого сотрудничества.

На ОАО «Балтийский завод» PLYCAST успешно применяется для моделирования затвердевания чугунов, сталей и медных сплавов.

На рис. 1 показана цеховая технология литья лапы якоря Холла из маломагнитной стали ММЛ1, разработанная до внедрения пакета и давшая недопустимый брак в виде усадочных раковин в подприбыльной зоне в местах сверления отверстий для крепления лапы якоря к веретену. Анализ результатов моделирования (рис. 2) показал, что отводная прибыль не работает из-за перемерзания шейки уже через 8 минут после заливки при общем времени затвердевания самой лапы (без учета отводной прибыли) 800 минут. После серии расчетов модернизированная технология позволила получить годное литье (рис. 3). Эффективность работы отводной прибыли обеспечена увеличением толщины питающей шейки и уменьшением её длины, верхние прибыли убраны. Имеющийся усадочный дефект расположен вне зоны сверления отверстий и не сказывается на прочности, что экспериментально подтверждено бросанием лапы на стальную плиту с высоты 6 метров.

Важность обеспечения моделирования достоверными свойствами сплавов иллюстрируют рис. 5 и 6, где показан прогноз усадочных дефектов при заливке лапы якоря из сталей 20ГСЛ и 08Х14НДЛ. Свойства сталей получены на основе термодинамического моделирования и заданы согласно табл. 1. Моделирование произведено идентично варианту, показанному на рис. 4 (размеры, засыпка прибыли, величина перегрева сохранены). Существенное различие в распределении усадочных дефектов определяется различием в интервале и теплоте кристаллизации, спектре выделения твердой фазы. Вариант заливки лапы якоря из стали 20ГСЛ был реализован, на срезе отводной прибыли была обнаружена прогнозируемая усадочная рыхлота (рис. 5), отсутствующая в случае стали ММЛ1 (рис. 4).



Рис.1. Усадочная раковина, цеховая технология до корректировки

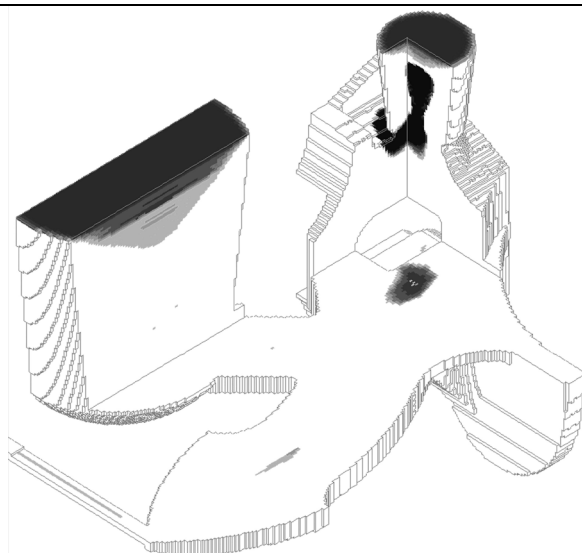


Рис.2. Усадочная раковина, результат моделирования (цеховая технология)

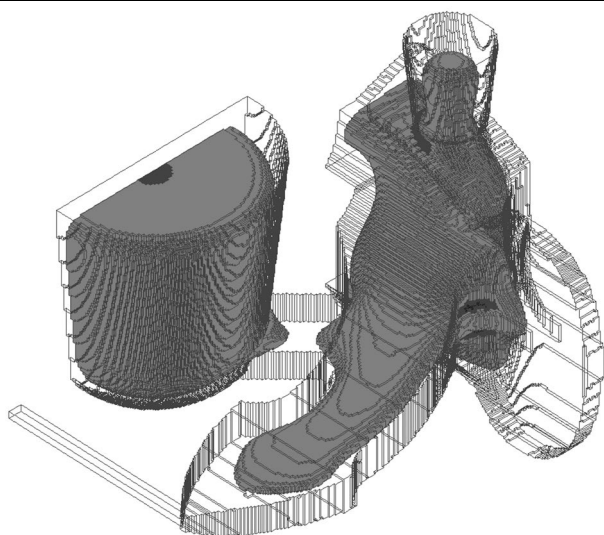


Рис.3. Металл в жидко-твердом состоянии через 8 минут после заливки (цеховая технология)

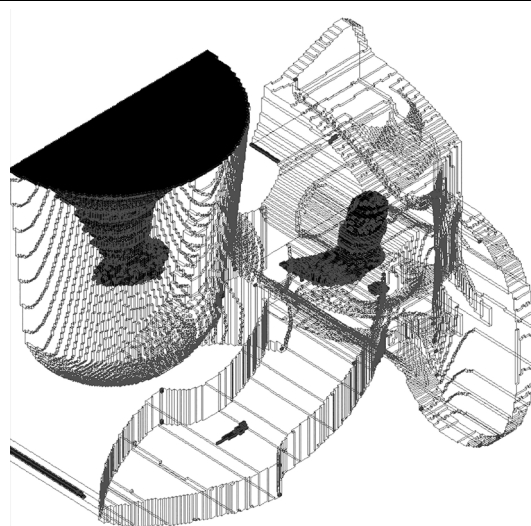
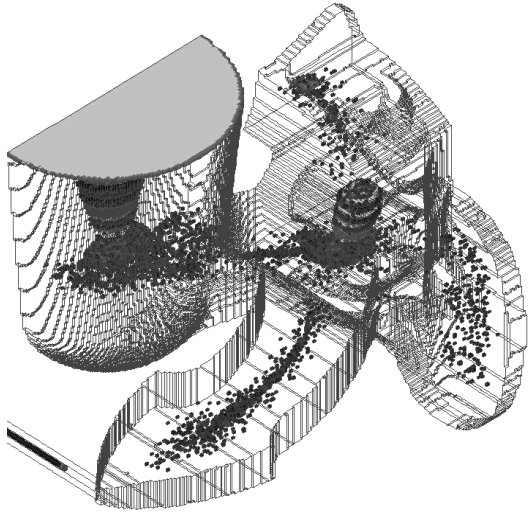


Рис. 4. Усадочная раковина, результат моделирования (модернизированная технология)

	
Рис. 5. Прогноз усадочных дефектов при изготовлении отливки из стали 20ГСЛ	Рис. 6. Прогноз усадочных дефектов при изготовлении отливки из стали 08X14НДЛ

Применение пакета POLYCAST в бюро моделирования литейных процессов ОАО «Балтийский завод» позволяет:

- получить резкое сокращение сроков разработки литейно-модельной технологии;
- на стадии разработки литейной технологии выявить и принять меры к устранению практически всех видов дефектов усадочного характера, а также образования холодных и горячих трещин;
- как следствие получение конкурентоспособной продукции высокого качества с более низкими затратами на её производство.

Таблица 1. Теплофизические свойства сталей

Сталь	25Л	20ГСЛ	ММЛ1	08Х14НДЛ
Ликвидус, °С	1509	1516	1436	1494
Солидус, °С	1462	1482	1337	1449
Интервал кристаллизации, °С	46,5	34,3	99,1	45,1
Спектр выделения твердой фазы ²	(0.000 0.165 0.478 0.485 0.495 0.693 1.000) (0.000 0.282 0.566 0.624 0.686 0.842 1.000)	(0.000 0.212 0.734 0.736 0.741 0.853 1.000) (0.000 0.354 0.713 0.786 0.864 0.930 1.000)	(0.000 0.111 0.271 0.527 1.000) (0.000 0.250 0.500 0.750 1.000)	(0.000 0.067 0.170 0.362 1.000) (0.000 0.248 0.498 0.748 1.000)
Скрытая теплота кристаллизации, МДД / м ³	1717,5	1792,7	1827,2	1258,5
Физическая теплота кристаллизации, МДж / м ³	590,8	476,4	722,0	579,6
Полная теплота кристаллизации, МДж / м ³	2308,3	2269,2	2549,2	1838,1
Теплоемкость в жидком состоянии МДж / м ³ / К	5,6	5,6	5,6	5,7

Теплоемкость в твердом состо- янии ³ , $МДж / м^3 / К$	(4.795;4.849;4. 901;4.903;4.92 3;4.937;5.051; 5.186;5.220;5. 220) (1364.2;1413.2 ;1461.2;1462.4 ;1476.4;1485.6 ;1486.1;1486.4 ;1501.0;1508.6)	(4.809;4.864;4.9 17;4.918;4.925; 4.935;5.043;5.1 74;5.209;5.209) (1384.1;1433.1; 1481.1;1482.3;1 487.1;1491.1;14 91.11;1491.2;15 09.1;1516.)	(4.823;4.898; 4.966;5.030; 5.057;5.070; 5.077) (1239.0;1288 .0;1336.0;13 83.9;1409.3; 1425.1;1436. 1)	(4.854;4.92 4;4.992;5.3 25;5.325;5. 325;5.325) (1304.0;135 3.0;1401.0; 1477.6;1486 .3;1490.9;1 493.9)
Теплопровод- ность в жидком состоянии ⁴ $Вт / м / К$	39 (195)	39 (195)	39 (195)	39 (195)
Теплопровод- ность в твердом состоянии ⁵ , $Вт / м / К$	(32.991;33.400 ;33.801;33.811 ;33.921;33.991 ;33.994;33.996 ;34.127;34.199) (1364.2;1413.2 ;1461.2;1462.4 ;1475.5;1484.5 ;1485.4;1486.3 ;1501.0;1508.6)	(33.157;33.566; 33.967;33.977;3 4.018;34.037;34 .044;34.050;34. 203;34.271) (1384.1;1433.1; 1481.1;1482.3;1 487.1;1491.1;14 91.11;1491.2;15 09.1;1516.3)	(33.2;33.5;33 .967;34.0;34. 0;34.0;34.0;3 4.1;34.2;34.3) (31.9;32.355; 32.756;33.15 6;33.368;33. 500;33.591)	(32.5 32.9 33.3 33.9 34.0 34.0 34.0) (1304 1353 1401 1478 1486 1491 1494)

¹ - данные, представленные в таблице рядами значений, есть полиномы, задаваемые в качестве входных значений при моделировании затвердевания в POLYCAST;

- ² - первый ряд – относительная температура; второй ряд – доля твердой фазы;
- ³ - первый ряд – теплоемкость, второй ряд – температура (°C);
- ⁴ - значение без скобок рекомендованы для сопряженного расчета гидродинамики и затвердевания, значение в скобках – рекомендованы для моделирования затвердевания без сопряженного гидродинамического расчета;
- ⁵ - первый ряд – теплопроводность, второй ряд – температура (°C).

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МНОГОФАЗНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

В.В. Кропотин

НПО «МКМ», Удмуртский государственный университет

Модель многофазной кристаллизации удобно рассмотреть на примере кристаллизации эвтектики сплава Fe-C. Здесь присутствуют три различные твердые фазы: твердый раствор – аустенит, химическое соединение – цементит и чистый компонент – графит. Модель не позволяет определить дисперсность фаз, а только вычисляет средние характеристики – доли образующихся фаз. При строго равновесном подходе соотношение фаз однозначно определяется по исходному составу сплава, а температура конца затвердевания равна температуре эвтектики.

Подобная ситуация крайне редко встречается в реальных условиях литейного производства. Если посмотреть на термические кривые кристаллизации чугунов, то легко заметить, что температура конца затвердевания не соответствует температуре эвтектики и к тому же может быть разной в различных частях отливки. Причем эта разница вызвана не только ликвацией, но и различной скоростью охлаждения различных частей отливки. Таким образом, не только фазовый состав, но и температура солидуса неизвестны заранее и поэтому должны вычисляться совместно.

Для численного решения задачи уравнения законов сохранения массы, энергии, импульса, вещества усредняются с использованием функций – доли фаз в элементарном объеме, на которые разбивается расчетная область, и дополняются кинетическими уравнениями роста и уравнениями баланса фаз и концентраций внутри элементарного объема.

Кинетические уравнения роста твердых фаз считаются линейными функциями переохлаждения с коэффициентом пропорциональности, зависящим от фазового состава элементарной ячейки.

Уравнение баланса концентраций – модифицированное уравнение Шейла, в котором растущие твердые фазы могут иметь как переменный со-

став (аустенит), так постоянный (цементит, графит). Так как твердый раствор (аустенит) имеет переменный состав, в уравнении должно присутствовать слагаемое, отвечающее за диффузию в твердой фазе.

В этой модели температуры жидкой и твердой фаз в элементарном объеме равны (термическое равновесие), а химического равновесия нет, и величина отклонения системы от равновесия определяет скорость фазовых превращений. Положением равновесия считается равновесная диаграмма состояния.

ЗАДАЧИ САПР И ЦИКЛ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Ю.А. Щербаков

Бюро литейных процессов Балтийского завода

Развитие и интеграция систем автоматизированного проектирования предоставляет пользователям все более широкие возможности, эффективное использование которых – непростая задача. Подготовки производства литых деталей с применением САПР имеет следующие особенности:

1. Литые детали часто имеют сложную конфигурацию. Кроме того, повсеместное внедрение систем автоматизированного проектирования и компьютерного анализа стимулирует появление геометрически всё более сложных объектов. При этом только специалист-литейщик может определить, какие упрощения геометрии допустимы при построении объемной модели для подготовки производства и моделирования литейной технологии.

2. Чертеж литых деталей часто является условным, и, по сути, представляет собой эскиз, на котором заданы лишь существенные размеры (отражающие геометрию сопрягаемых деталей или подлежащие механической обработке). Это может приводить к тому, что чертеж и изготовленное по нему изделие будут соответствовать по заданным размерам, но внешне отличаться. На рис.1 показан фрагмент чертежа якорного клюза, на который наложена его компьютерная модель. Видно, что участок в виде трубы на чертеже и на модели совпадают, однако вид «шляпы» существенно отличается.

3. Построить трехмерную модель (изготовить модель для формовки) невозможно без ссылки на сопрягаемую геометрии. На рис.2. приведены участки чертежа форштевня ледокола. На длине 17 метров и высоте 12,6 метров задано четыре сечения, отражающие общую идею геометрии форштевня. Кроме того, существует требование сопряжения форштевня с обводами корабля, заданными теоретическим чертежом либо файлом в формате IGES.

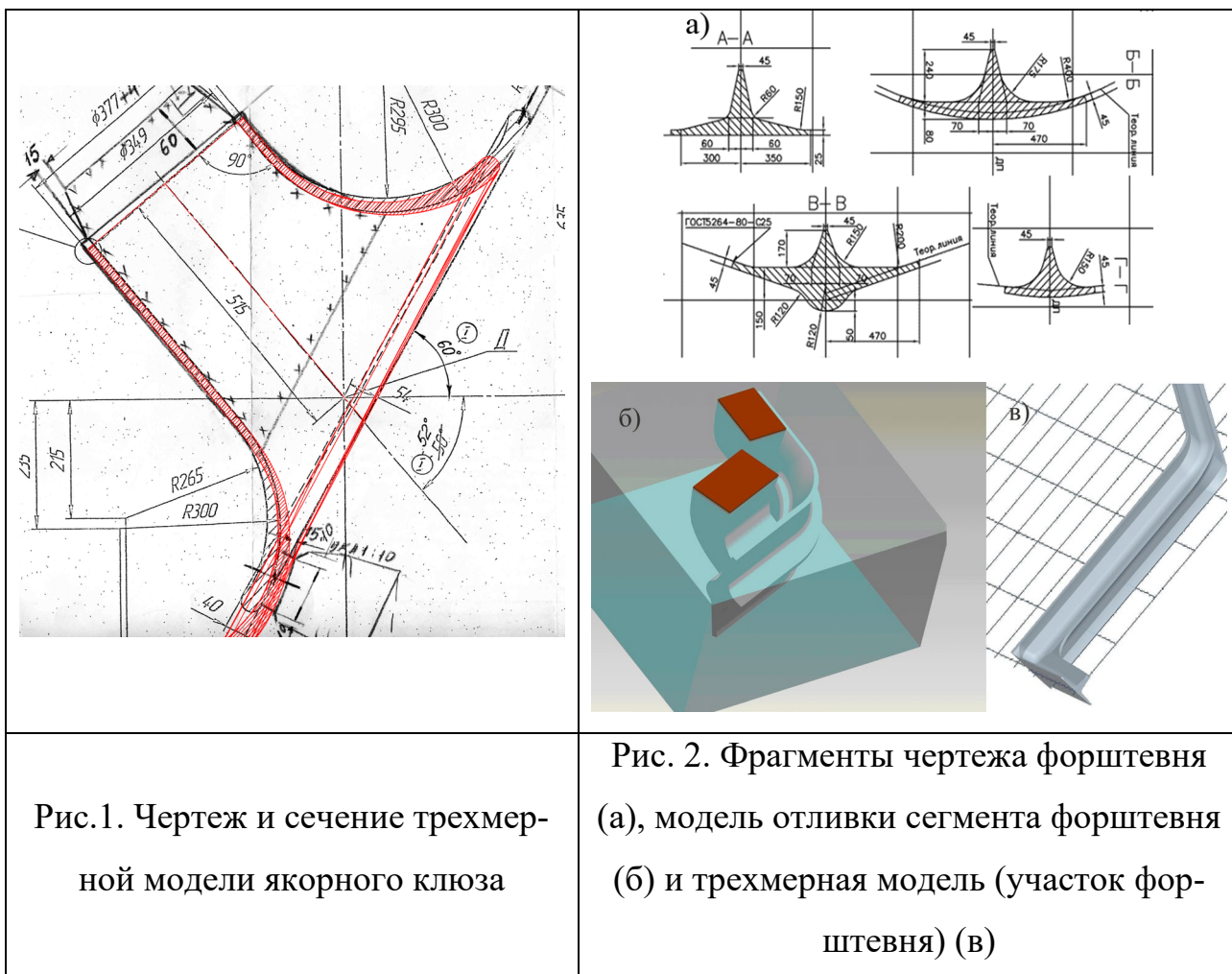
4. При использовании созданной конструкторами трехмерной модели она должна быть упрощена (убраны фаски, отверстия и т.д.) и дополнена припусками, технологическими напусками, моделями прибылей и т.д. Если подобные изменения в трехмерной модели конструкторами не предполагались, возникают затруднения, трудоемкость "лечения" модели может оказаться недопустимо велика.

5. Существуют сложные геометрические объекты (например, лопасти рабочих колес турбин, гребные винты), при проектировании которых применяются математические абстракции, т.е. изображенные на чертеже проекции не имеют физического соответствия. Неспециалисту не удастся в разумные сроки понять, как интерпретировать чертеж таких объектов. Применение САПР позволяет в таком случае использовать компьютерную модель, созданную проектантом. Чертеж в этом случае необходим для контроля.

Таким образом, компьютерные модели отливок являются сложными и часто требуют применения «тяжелых» систем моделирования (Unigraphics, Pro/ENGINEER). Крайне желательно, чтобы компьютерную модель отливки выполнял инженер-литейщик.

Грамотное применение САПР потенциально позволяет специалисту сосредоточить технологическую подготовку производства в одних руках. Если для небольшого предприятия это – единственно разумное решение, то для крупного производства ситуация не очевидна. Преимущества такого подхода – личная ответственность за качество продукции, оперативность принятия решений, уменьшение документооборота. Недостатки – риск изначально неверно прочесть чертеж, соблазн скрыть недостатки в производстве, зависимость от конкретного человека. Видимо, для крупного предприятия целесообразно, независимо от количества стадий и технологических циклов определить минимально возможное количество специалистов для ведения конкретного проекта, но не менее трех, обязательно разорвав при этом информационную цепь на этапе выходного контроля и сдачи продукции.

Удачным примером служит производство гребных винтов на ОАО "Балтийский завод". Деревянная модель лопасти винта делается под руководством технолога-литейщика, одновременно программистами разрабатывается таблица теоретических катетов, являющаяся вместе с чертежом сдаточным документом. Далее деревянная модель проверяется программистом, который будет обрабатывать отливку на станке с ЧПУ. Таким образом, чертеж читается два раза, успешная проверка модели программистом гарантирует, что технолог-литейщик и программист прочитали чертеж одинаково. После механической и слесарной обработки геометрия винта принимается ОТК по данным чертежу и таблице катетов, рассчитанной до механической обработки.



Применение САПР можно проиллюстрировать на примере подготовки производства лопасти для гидротурбины. Далее перечислены отдельные работы и потребовавшееся для них время.

- Компьютерная модель лопасти (рис.3) предоставлена организацией-проектантом. Для изготовления деревянной модели построены шаговые угольники (рис.4). При этом определено оптимальное положение отливки в форме исходя из минимума высоты формы, геометрия упрощена, добавлены припуски на механическую обработку, определена масса отливки, ожидаемый выход годного. (4 часа)
 - Для контроля геометрии разработана специальная таблица (список контролируемых точек в соответствующих радиусах и углах). За счет возможностей параметризации, заложенной в CAD-системе, одни и те же построения можно отнести к двум разным объектам: при задании усадки 0%, обнулении припусков таблица относится к геометрии детали, иначе – к геометрии деревянной модели. (1 час)
 - По компьютерной модели детали спроектированы кромочные шаблоны, шаблоны проверки геометрии (рис.5) и фальш-ступица (трехмерная модель, чертеж) для крепления лопасти на фрезерном станке. (6 часа)
 - Генерированы управляющие программы для фрезерного станка с ЧПУ. Программы проверены на виртуальном станке на отсутствие недорезов/зарезаний, столкновений с заготовкой (рис.6) и технологическими приспособлениями. (8 часов).
- Перечисленные работы выполнены в САПР Pro/ENGINEER, на рис.6 изображен виртуальный станок VeriCut.



Рис.3. Трехмерная модель лопасти гидротурбины

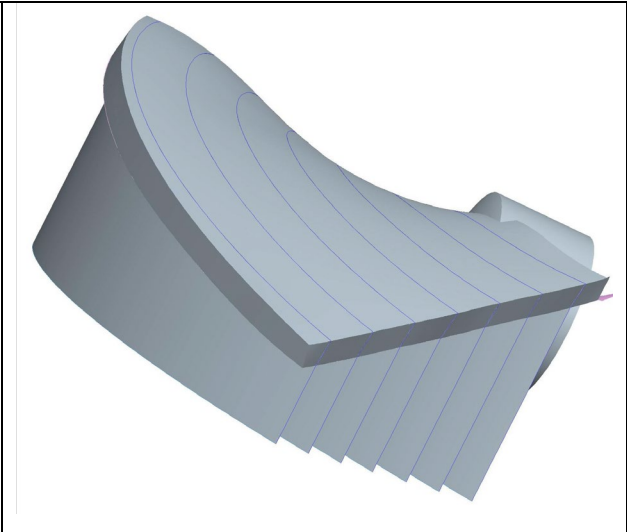


Рис.4. Трехмерная модель отливки
лопасти с шаговыми угольниками

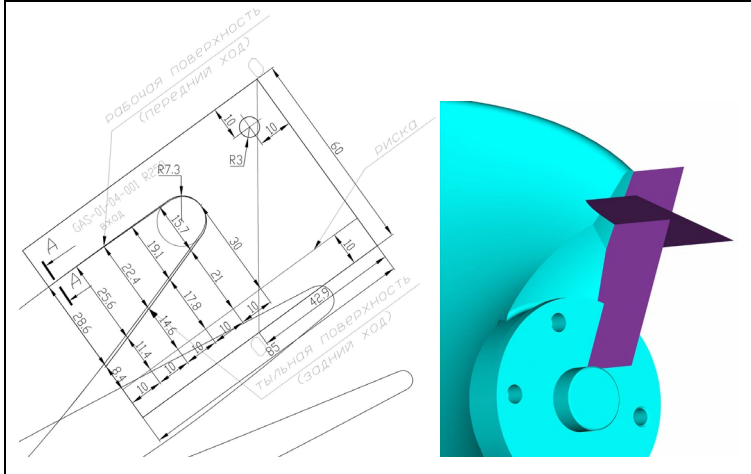


Рис.5. Шаблоны для проверки геометрии

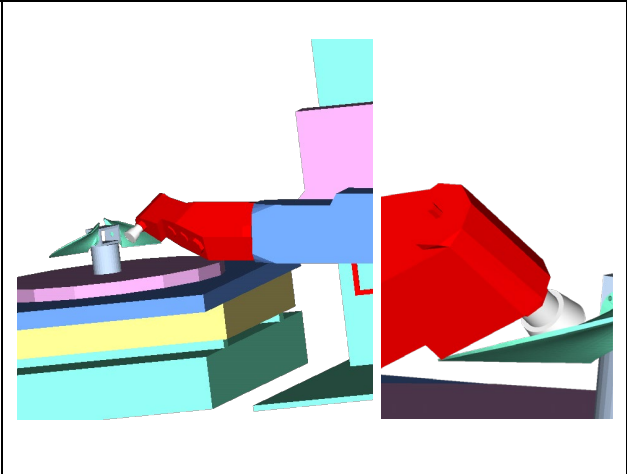


Рис. 6. Столкновение головки виртуального фрезерного станка с обрабатываемой деталью

КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАСТКИ

Д.Х. Сабиров, Л.Ю. Денисов, А.А. Абрамов
ООО «ФокадПлюс»

В настоящее время практически все литейные производства России испытывает острую потребность в квалифицированных технологах и конструкторах литейной оснастки. Оставшиеся действующие технологи и конструкторы, как правило, могут быть отнесены к категории ветеранов, работающих по традиционным технологиям – кульман, бумага, карандаш, методы проб и ошибок при разработке новой технологии и освоении отливки. Такие методы разработки литейной технологии основаны на собственном многолетнем производственном опыте. Для изготовления оснастки в этом случае необходим выпуск комплекта бумажных чертежей. Выпуск чертежей сопряжен с многочисленными согласованиями, поскольку, за литье, проектирование и изготовления оснастки отвечают, как правило, различные подразделения предприятия, а изготовление оснастки ведется на универсальном оборудовании, что сопровождается неизбежными ошибками, как на стадии проектирования, так и на стадии изготовления, так как на эти процессы сильно влияет человеческий фактор. Все эти негативные особенности многократно усиливаются для оснастки, имеющей сложные поверхности и состоящей из нескольких частей.

Традиционные способы проектирования и изготовления оснастки, в совокупности с устаревшим оборудованием большинства цехов, являются, кроме того, причиной низкой привлекательности литейного производства для молодых специалистов. При этом невосполнимо утрачивается многолетний опыт ветеранов производства.

Совершенно другая ситуация складывается при применении современного компьютеризированного подхода к начальному и самому важному этапу освоения производства отливок – разработке литейной технологии, проектированию и изготовлению литейной оснастки.

В общем виде такой подход предусматривает следующие этапы:

- получение от заказчика чертежа детали или отливки (возможно в электронном виде);
- разработка литейной технологии, разработка и построение в CAD-системе объемной модели отливки и согласование с заказчиком электронного или бумажного чертежа отливки;
- при необходимости анализ и оптимизация литейной технологии с помощью системы компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон»;
- конструирование и проектирование литейной оснастки в CAD – системе;
- обработка формообразующих поверхностей оснастки на станках с ЧПУ;
- изготовление простых элементов оснастки на универсальном оборудовании;
- сборка оснастки.

Технология может быть использована при изготовлении оснастки для любого способа литья: в кокиль, литье по выплавляемым моделям, в землю, под давлением и т.д. На некоторых заказах отдельные стадии процесса могут выпадать. Например, если от заказчика приходит уже объемная модель отливки или даже готовый проект пресс-формы. Но в целом технологическая цепочка остается.

В докладе приводится несколько примеров проектирования и изготовления оснастки для сложных отливок, изготавливаемых способами литья по выплавляемым и газифицируемым моделям.

Предлагаемая технология имеет следующие основные преимущества.

1. Качество оснастки. Компьютерное проектирование оснастки практически полностью исключает использование бумажных чертежей с характерными для них ошибками. Практически всегда детали оснастки, в том числе полуформы, изготавливаются из единой заготовки, а не собираются из нескольких частей, как при традиционной технологии. Отсюда возрастает точ-

ность изготовления оснастки. Кроме того, современные станки с ЧПУ имеют достаточно высокую точность – 0.005-0.01 мм.

2. Скорость изготовления. Любая оснастка средней сложности может быть спроектирована и изготовлена за 3 недели. В срочном режиме это может быть сделано еще быстрее.

3. Стоимость. Сопоставима с традиционной технологией, а для сложных отливок существенно ниже.

Два примера:

- стоимость изготовления односторонней алюминиевой пресс-формы для изготовления отливки средней сложности с габаритом 150 мм литьем по выплавляемым моделям составляет примерно 30 тыс. рублей, включая НДС;

- стоимость комплекта алюминиевой оснастки (пресс-форма и стержневой ящик) для рабочего колеса диаметром 180 мм с закрытыми криволинейными лопатками составляет примерно 70 тыс. руб., включая НДС.

В настоящее время у фирмы ООО «ФокадПлюс» имеется несколько постоянных заказчиков в Санкт-Петербурге, Пскове, Тамбове, Туле. На основе накопленного положительного опыта ООО «ФокадПлюс» расширяет производство пресс-форм для ЛВМ и другой литейной оснастки.

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ОТЛИВОК

**В.М. Голод, профессор кафедры физико-химии
литейных сплавов и процессов СПбГПУ**

Технологический процесс термической обработки включает в себя различные виды отжига, закалку и отпуск. Для программированных режимов, в частности, для наиболее сложного процесса - закалки, необходимо применительно к конкретному изделию рассчитать нагрев и охлаждение с учетом характера среды для закалки, что представляет собой наибольшие трудности. При необходимости прогноза структуры изделия обычно используют термokinетические диаграммы распада переохлажденного аустенита (CCT-диаграммы), при этом, как правило, рассматривают экспериментальные диаграммы, так как их расчет представляет значительные трудности, до сих пор не преодоленные. Моделирование термической обработки сопряжено с анализом и решением ряда задач, в числе которых можно выделить наиболее сложные для технологической реализации:

- расчет нагрева и охлаждения с учетом лучистого и конвективного теплообмена фасонной заготовки со стенками и подом печи (задача многих тел) при изменении теплофизических свойств металла;
- моделирование кинетики неравновесного твердофазного превращения (по перлитному, бейнитному или мартенситному механизму) в широком интервале температур;
- расчет охлаждения заготовки при закалке в среде с резким изменением конвективного коэффициента теплоотдачи (в условиях кризиса кипения) на поверхности в условиях неравномерного распределения температур и теплового эффекта неравновесного фазового превращения по сечению заготовки, зависящего от характера образующейся структуры;

- прогноз структуры и механических свойств в объеме изделия сложной конфигурации на основе результатов моделирования и эмпирических данных об особенностях поведения рассматриваемой марки стали.

Перечисленные задачи относятся к числу системно-сопряженных и их реализация страдает некорректной постановкой в силу неизбежного упрощения формулировки и неполного информационного обеспечения, требующего использования методов решения обратных задач.

Программный комплекс для проведения моделирования термической обработки включает модули, обеспечивающие численное решение трехмерной нестационарной задачи теплопроводности применительно к комбинированным (конвекция и излучение) нестационарным условиям на зонированных граничных поверхностях для тел произвольной конфигурации. Ввод исходных данных для расчета обеспечивают модули определения свойств стали (на основе термодинамического моделирования фазовых превращений в твердом состоянии и диаграмм распада аустенита), задания режимов нагрева и охлаждения, а также ввода характеристик термических агрегатов (печи, закалочные ванны, аэраторы и т.д.).

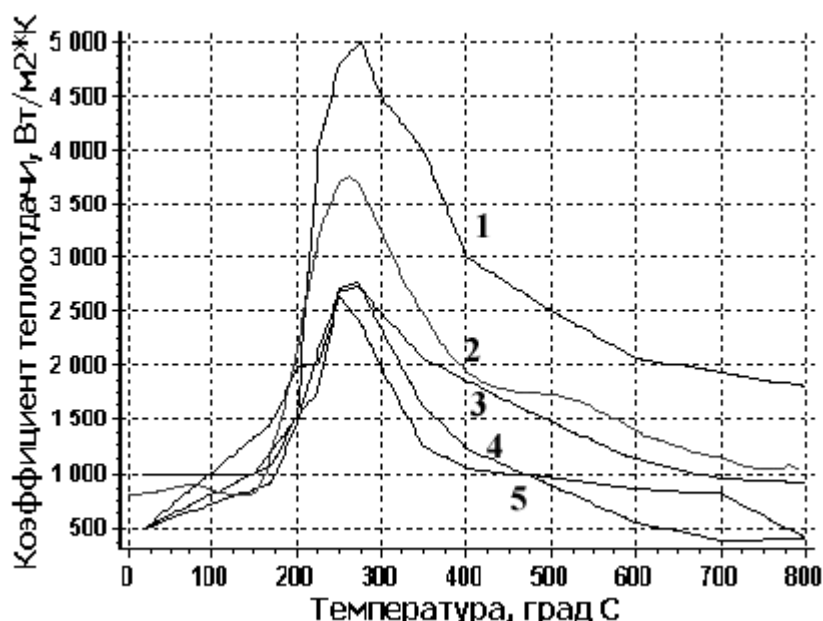


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи для воды (1) и водного раствора полимерной композиции ПК-М различной концентрации:
2-1:17; 3-1:13; 4-1:9 (свежий);
5-1:9 (рабочий)

Для описания сложных процессов взаимодействия закалочной жидкости с нагретым до высокой температуры изделием разработан программный

модуль решения обратной задачи на основе сопоставления расчетных температур в контрольных точках изделия с экспериментальными данными термического анализа в тех же точках. Он предназначен для решения широкого круга задач по информационному обеспечению моделирования режимов термообработки, в частности, для определения температурно-зависимых коэффициентов теплоотдачи, а также описания кинетики твердофазных превращений.

На основе результатов серии экспериментов со специальным термозондом (конструкции фирмы ПОЛИТЕРМ-Тюмень) из хромоникелевой стали для регистрации охлаждения в воде, масле и водополимерных жидкостях, являющихся альтернативной заменой дорогостоящих масел, были выполнены численные расчеты, позволившие путем решения обратной задачи получить

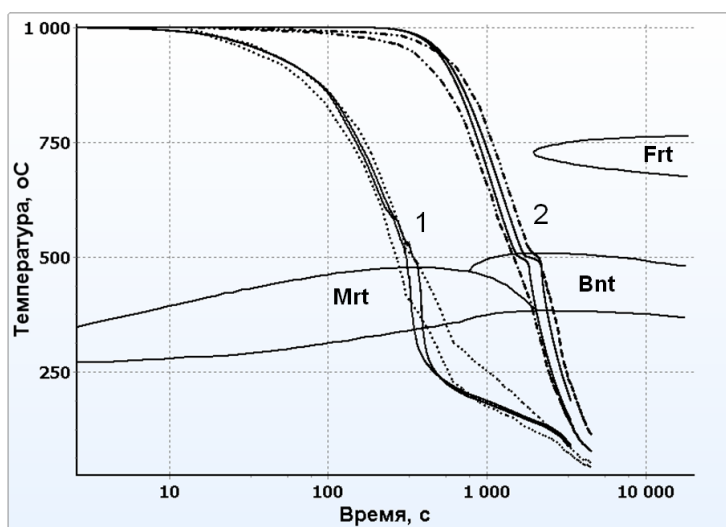


Рис. 2. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктир, штрих-пунктир) термические кривые изменения температуры на поверхности (1) и в осевой зоне (2) заготовки толщиной 270 мм при охлаждении в воде в сопоставлении с термокинетической диаграммой распада аустенита в стали

температурные зависимости коэффициентов теплоотдачи для различных сред [1], использованные для моделирования закалки (рис. 1). Для определения теплофизических характеристик сталей использовали данные термодинамического моделирования сплавов на основе железа [2] с учетом получения непрерывного спектра образующихся при закалке структур. Температурные границы твердофазного превращения задавали в зависимости от скорости

охлаждения (при 700 °С) и химического состава стали, используя эмпирические формулы, рекомендованные British Steel Corporation [3]. Для оценки характера получаемой структуры и твердости проведено сравнительное сопоставление данных, получаемых на основе термокинетических диаграмм распада аустенита (рис. 2), диаграмм прокаливаемости [5] и статистических моделей, описывающих структуру и твердость в зависимости от условий охлаждения и химического состава стали [3]. Проведенный расчет прокаливаемости на примере ряда сталей (40Х, 40Г2, 60С2, 40ХН3 и др.) в сопоставлении с экспериментальными данными свидетельствует об удовлетворительной схожести с результатами моделирования. Однако, при этом как опубликованные ТТТ-диаграммы, так и статистические модели носят локальный характер (состав стали, условия экспериментов и т.д.) и для прогнозирования на их основе нуждаются в существенном пересмотре, включающем устранение имеющихся погрешностей и адаптацию к условиям производства для получения требуемой достоверности прогноза.

Литература

1. **Голод В.М., Гюлиханданов Е.Л. и др.** Математическое моделирование технологических процессов термической обработки стали. // Сб. Фундаментальные исследования в технических университетах // СПб., СПбГПУ, 2006.
1. **Савельев К.Д., Голод В.М.** Термодинамическое моделирование литейных сплавов на основе железа. - СПб, СПбГТУ, 2002.
2. **Atkins M.** Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels.- BSC, 1977.
3. **Попова Л.Е., Попов А.А.** Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана. Справочник термиста.- М., Металлургия, 1991.
4. **Качанов Н.Н.** Прокаливаемость стали. - М., Металлургия, 1978.