

НА ПУТИ К СОВЕРШЕНСТВУ В МОДЕЛИРОВАНИИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Мы продолжаем нашу рубрику двумя публикациями. В первой – мы коснемся важной темы постановки и решения литейных задач как обратных задач или задач оптимизации. Во второй – продолжим обсуждение вопросов теории камеры прессования литья под давлением и новой аналитической модели, позволяющей определить оптимальную скорость движения прессового поршня. Интересно, что эта задача решается в обеих публикациях, но с использованием различных методов. Сопоставление результатов решения этой задачи еще одна тема данной рубрики, которая лишь частично затронута в первой статье и оставлена для дальнейшей проработки заинтересованному читателю.

И.Н. Вольнов (канд. техн. наук, ЗАО «Русская промышленная компания», volnov@cad.ru)

Оптимизация литейной технологии

Переход индустриально развитых стран к шестому технологическому укладу обуславливает широкое использование, в том числе в литейном производстве, новых информационных и когнитивных технологий [1]. Сейчас к числу таких технологий относят технологии полномасштабной виртуальной реальности и искусственного интеллекта, частью которых являются задачи синтеза или оптимизации технических решений. Если в индустрии производства отливок прямые задачи или задачи анализа, например температурных полей, усадочных дефектов, напряжений и деформаций в отливке уже относительно давно и хорошо решаются, то обратные задачи или задачи оптимизации только сейчас становятся востребованными. У такого запаздывания есть объективные причины – это значительное увеличение сложности обратных задач – решение не одной-двух итераций (прямых задач), а десятков и даже сотен; это отсутствие универсальных алгоритмов поиска оптимального решения и экономической организации такого итерационного процесса; наконец, это затруднения, связанные с наличием в целевых функциях многих литейных задач нескольких локальных экстремумов и их не непрерывный характер.

В последнее время часть этих затруднений успешно преодолена. Существенно возросла производительность современных вычислительных средств, что позволило решать задачи оптимизации из десятков и сотен итераций в приемлемое для коммерческих производств время. Появились программы оптимизаторы с элементами искусственного интеллекта, т.е. с библиотеками оптимизационных алгоритмов и адаптивным выбором алгоритма под каждую конкретную задачу.

Появление таких мощных средств оптимального проектирования и управления технологическим процессом литья открывает

В распоряжении литейщиков появился мощный вычислительный инструмент для решения задач оптимизации, который образован интеграцией пакетов моделирования литейных процессов FLOW-3D® и общей оптимизации IOSO®. Приведены примеры поиска оптимальных решений различных литейных задач.

Ключевые слова: оптимизация, FLOW-3D, IOSO, литье под давлением, литье в вакуумно-пленочные формы.

Volnov I.N. Optimization of foundry technology

High end calculating tool for solving optimization problems, which is formed by the integration of foundry processes modeling packages FLOW-3D® and the general optimization IOSO®, is at the disposal of foundry workers. The examples of the search of optimal solutions for various foundry problems are shown.

Key words: Optimization, FLOW-3D, IOSO, die casting, V-process casting.

широкие возможности по повышению качества отливок, снижения их себестоимости и сокращения времени вывода отливки на рынок.

В статье рассмотрены 3 примера поиска оптимального решения в различных задачах литейной технологии. Эти примеры – результат интеграции двух мощных программных средств: **FLOW-3D®** (FlowScience Inc., США, www.flow3d.com, www.flow3d.ru) – пакет вычислительной гидродинамики, который много и успешно используется в области



Рис. 1. Исходная геометрия отливки с литниковой системой и прибыльями

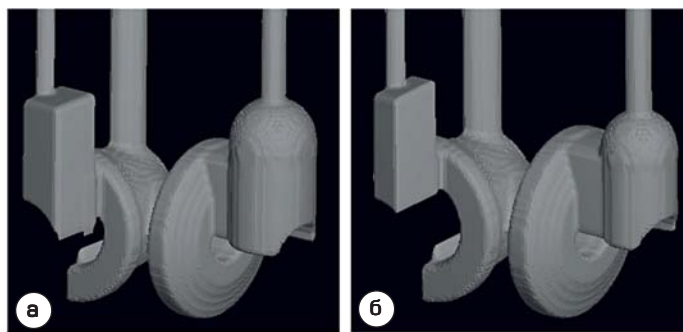


Рис. 2. Результаты оптимизации: геометрия до оптимизации (а) и после (б)

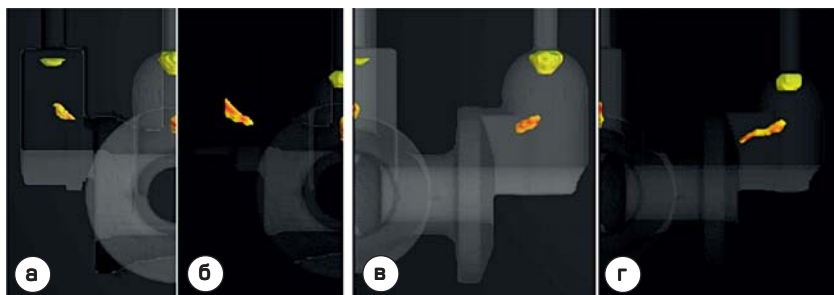


Рис. 3. Результаты оптимизации: усадочные раковины до оптимизации (а, в) и после (б, г)

литейного производства и *IOSO*[®] (Сигма Технология, Россия, www.iosotech.com) – универсальный оптимизатор с элементами искусственного интеллекта [2]. Поскольку пакет *IOSO*[®] (Indirect Optimization on the base of Self-Organization – непрямая самоорганизующаяся оптимизация) пока мало известен в области литейного производства, необходимо о нем сказать несколько слов.

Разработка технологии оптимизации началась более 20 лет назад и была направлена на решение задач оптимизации для систем, плохо поддающихся этой оптимизации. Речь идет о сложных технических системах, обладающих такими свойствами, как нелинейность, неполная детерминированность и стохастичность поведения, сложная топология целевой функции (локальные экстремумы и локальная не дифференцируемость). Была разработана новая высокоэффективная технология многокритериальной оптимизации *IOSO*[®] (автор д-р техн. наук, проф. И.Н. Егоров), имеющая уникальные возможности по решению сложных задач поиска оптимума, решение которых ранее не осуществлялось, ввиду отсутствия эффективного метода. В результате *IOSO*[®] позволяет не только решать нерешаемые задачи многокритериальной и многопараметрической оптимизации (до 100 и более параметров и до 10 и более критериев оптимизации), но и повысить эффективность поиска оптимума по сравнению с традиционными методами в 2–7 раза.

Приведем примеры интеграции пакетов *FLOW-3D*[®] и *IOSO*[®] для оптимизации в области литейного производства.

Следующие 2 примера относятся к числу задач наиболее часто решаемых методами оптимизации. Первый – это определение тех или иных параметров математических моделей (как правило, теплофизических), при которых обеспечивается совпадение расчетных и экспериментальных данных (как правило, температурных полей). Такая задача была решена для определения коэффициентов теплоотдачи с внутренней поверхности пресс-формы литья под давлением на всех этапах цикла изготовления отливки (запрессовка и затвердевание металла, смазка, обдувка, выдержка) [3].

Второй пример – поиск минимального размера питающей системы (прибылей) отливки при обеспечении ее требуемого качества (плотности металла). Остановимся на этом примере подробнее.

Имеется реальная технология изготовления методом вакуумно-пленочной формовки отливки «Корпус задвижки» с тремя боковыми прибылями на отливку (рис. 1). Проектирование технологии без современных вычислительных средств часто приводит к перерасхо-

ду металла и низкому выходу годного. Не стала исключением и данная технология, поэтому была поставлена задача поиска оптимальных (минимальных) размеров прибылей, при которых в теле отливки отсутствуют усадочные раковины.

Задачу решали на четверти литейной формы или половине одной отливки без литниковой системы. Из CAD-данных была использована только геометрия отливки, геометрия прибылей создавалась средствами графического редактора *FLOW-3D*[®]. Последнее необходимо для организации процесса оптимизации и варьирования геометрическими параметрами прибылей. На рис. 2 показана половина отливки с выполненными таким образом прибылями. Для прямоугольной прибыли имеем три параметра для оптимизации: высота, ширина и глубина, для цилиндрической – два параметра: высота и диаметр. Всего пять параметров оптимизации и два критерия: минимальный объем прибылей и минимальный объем усадочных раковин в теле отливки (максимальная плотность металла отливки).

Без описания подробностей процесса оптимизации (рассмотрены в следующем примере), которая заняла несколько часов на типовом персональном компьютере, перейдем сразу к его результатам. Отливка может быть получена без усадочных раковин при снижении общего объема прибылей на 37%. На рис. 2 показана половина отливки с прибылями, а на рис. 3 – усадочные раковины в прямоугольной и цилиндрической прибылях до и после оптимизации.

Сделаем некоторые выводы. Завышенный на 37% объем прибылей в исходном варианте технологии следует расценивать как некоторый запас на получение плотных отливок. Производственная практика завышения объема питающей системы отливки общеупотребима. Объясняется она желанием гарантированного получения отливок без усадочных раковин в условиях колебания значений технологических параметров и влиянием случайных факторов. Главная задача подобных расчетов не в том, чтобы снизить объем прибылей на 37% или изготавливать отливки без запаса по питанию. Очевидно, что при отсутствии такого запаса, вероятность получения бракованной отливки в реальных условиях резко возрастает. Главная задача – по-

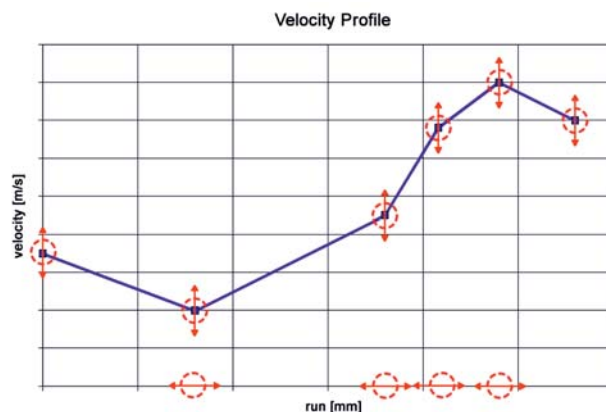


Рис. 4. Профиль скорости прессового поршня на медленной стадии прессования [4]

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

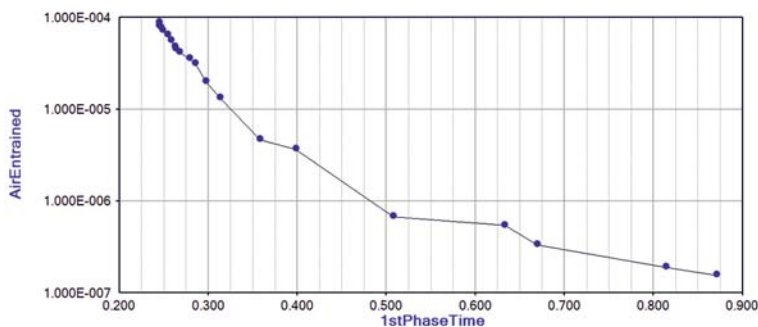


Рис. 5. Оптимальные (не улучшаемые) значения критериев оптимизации [4]

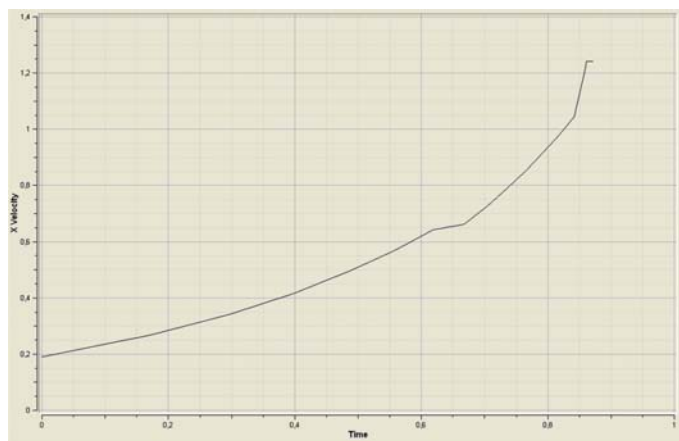


Рис. 6. Профиль скорости прессового поршня для длительности процесса 0,87 сек [4]

лучить количественную оценку запаса по питанию и далее, в пределах этого запаса, искать возможность практического снижения объема питания за счет различных технологических мероприятий и стабилизации параметров процесса литья.

Следующий пример оптимизации является нестандартным и взят из области литья под давлением [4]. При запрессовке металлического расплава в пресс-форму крайне важно правильно назначить скорость движения прессового поршня, которая не должна быть ни слишком большой (захват воздуха), ни слишком малой (захват воздуха, тепловые потери). Один из способов решения этой задачи – аналитический – предложен во второй статье данной рубрики. Другой способ – использование инструментария численного моделирования и оптимизации. Задача ставится следующим образом. Пусть профиль скорости прессового поршня на медленной стадии запрессовки описывается шестью точками в соответствующем координатном пространстве (рис. 4). При этом 2 крайние точки имеют одну степень свободы – могут менять только значение скорости, а четыре внутренние – две степени свободы, и могут менять скорость и свое положение на оси абсцисс. Имеем 10 степеней свободы или 10 параметров оптимизации, значение которых следует определить с учетом двух критериев: минимизации длительности процесса запрессовки (медленная стадия) и минимизации захвата воздуха.

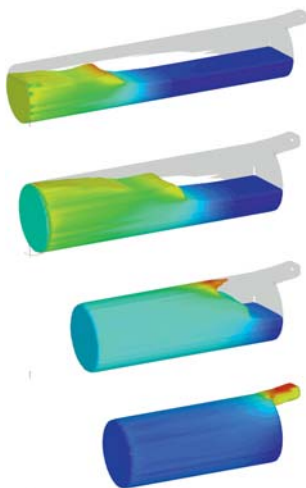


Рис. 7. Последовательные слайды поведения расплава в камере прессования для длительности процесса 0,87 сек [4]

Длительность процесса оптимизации на типовом персональном компьютере составила 2 рабочих дня и около 1000 расчетных циклов. В результате было получено множество оптимальных значений критериев оптимизации (множество Парето), показанное на рис. 5. Каждой точке из этого множества соответствует свой профиль скорости прессового поршня. Далее технолог, получив кривую на рис. 5, может выбрать конкретные значения параметров оптимизации и соответствующий им профиль скорости, в которых он хотел бы реализовать реальный технологический процесс изготовления отливок. Так, для наибольшей на рис. 5 длительности процесса медленной стадии прессования 0,87 сек, которому соответствует наименьшая доля захваченного расплавом воздуха, профиль скорости выглядит так, как показано на рис. 6 (здесь профиль показан в координатах «скорость–время»). На рис. 7 показаны последовательные слайды моделирования во FLOW-3D® поведения расплава в камере прессования для профиля скорости с рис. 6.

Следует обратить внимание на наличие области снижения ускорения поршня на кривой на рис. 6 для времени немного более 0,6 сек, что соответствует моменту достижения расплава перед поршнем верхней точки камеры прессования. Эта область отсутствует на аналогичной кривой, полученной из аналитических представлений, что указывает на их ограниченность и высокую сложность происходящих здесь процессов, не укладывающихся в принятые допущения аналитической модели.

Мы привели три примера решения различных задач оптимизации в области литейной технологии, реализованных на связке пакетов FLOW-3D® и IOSO®. Возможности, открывающиеся для литейщиков этим инструментом, беспрецедентны и реализуют новый качественный уровень в моделировании задач литейного производства. Большинство задач литейной технологии теперь могут быть поставлены и решены как задачи оптимизации. Это обеспечивает широкий функционал моделирования физических процессов во FLOW-3D® и уникальной технологией оптимизации в IOSO®. Эти богатые возможности моделирования послужат также дополнительным стимулом для расширения использования компьютерных технологий в литейном производстве.

Список литературы

1. **Вольнов И.Н.** Литейное производство в шестом технологическом укладе // Литейщик России – 2012 – №10.
2. <http://www.iosotech.com>
3. http://www.xceng.com/en_en/reverse_engineering.html
4. **Mascetti S.** Using flow analysis software to optimize piston velocity for an HPDC process // Die Casting engineer – 2010 – №9 (September) – p.34-36 (www.flow3d.com/pdfs/tp/cast_tp/FloSci-Bib36-10.pdf)