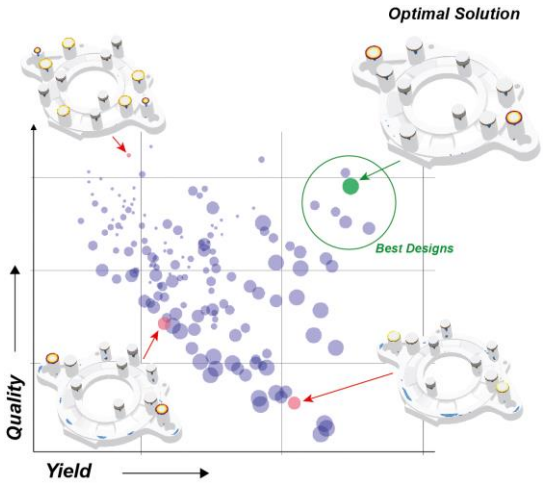


Расчет становится автоматической оптимизацией

Ingo Hahn, Jörg C. Sturm, MAGMA GmbH, Aachen, Germany

Спустя почти 30 лет после внедрения в литейную промышленность моделирования процесса литья, этот инструмент получил такое же широкое распространение в инжиниринговых службах литья металлов, как и конструирование оснастки и отливки. Выполнение моделирования процесса является обычным явлением в деятельности квалифицированного специалиста; результаты расчетов дополняют и уточняют его практический опыт работы, понимание процесса и ноу-хау. Каждый отдельный расчет является виртуальным экспериментом, результаты которого можно сравнивать с другими. Основываясь на результатах расчетов, инженеры оценивают, например, обеспечивает ли выбранная литниково-питающая система или сочетание параметров технологического процесса приемлемое качество отливки, а затем предлагают изменения с целью достижения еще лучшего результата.

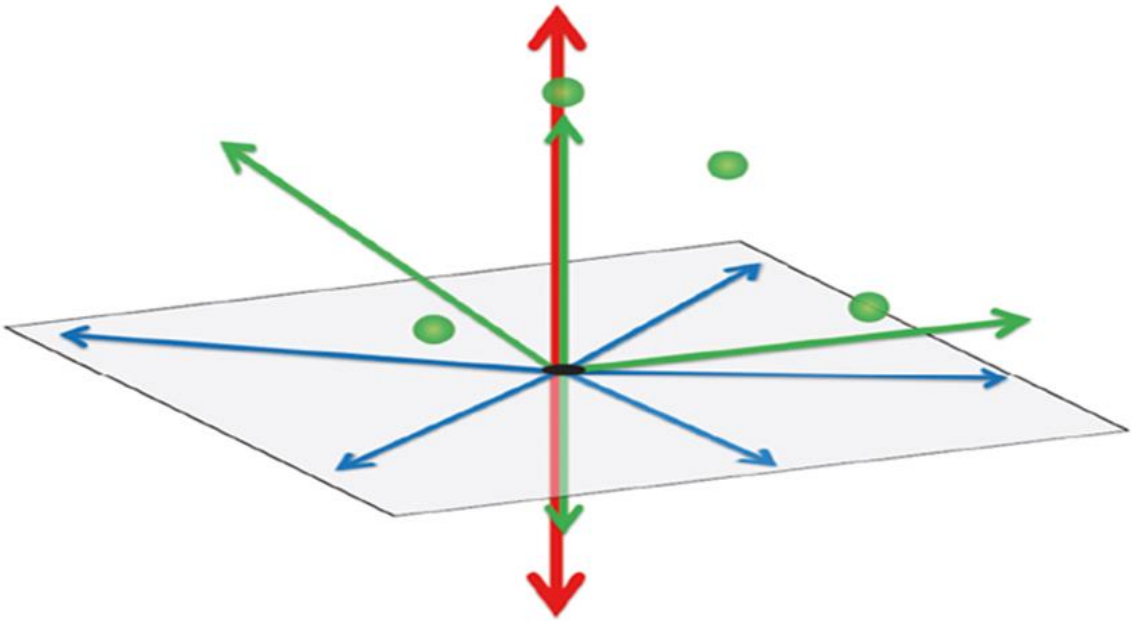
При литье металлов все процессы протекают одновременно и являются тесно взаимосвязанными. Возможность расчета может выглядеть как ключевое преимущество литья над другими производственными процессами. Расчет предусматривает наилучшее, или по крайней мере, адекватное решение компоновки сложной литейной технологии. Изменяя один параметр процесса, благодаря его взаимодействию с другими параметрами, можно воспроизводить комплексное воздействие этих изменений на процесс и влиять на качество отливки различными способами. Это открывает перспективу оптимизации литейного процесса вручную, а также возможность решения проблем качества и достижения экономических целей одновременно. Качество отливки проверяется в реальных испытаниях.

Современные потребности развития производства отливок и соответствующих технологических процессов литья металлов требуют методологий и средств, позволяющих максимизировать живучесть процесса и получить прибыль в кратчайшее время. Обычно возможность вносить улучшения виртуально на практике уменьшает число реальных испытаний во время подготовки производства и ограничивает усилия, затрачиваемые на подбор значений технологических параметров процесса для серийного выпуска продукции. Количественная оценка реального качества отливки, основанная на пробных испытаниях, и уменьшение необходимого количества экспериментов с целью оптимизации технологического процесса остается проблемой.

В отличие от реальных испытаний автоматическая оптимизация с использованием средств моделирования обеспечивает существенно большую гибкость процесса подготовки литья. Автоматическая оптимизация позволяет инженерам модифицировать несколько параметров, например, конструкцию отливки и компоновку элементов литейного процесса, одновременно и независимо друг от друга. При этом критерий качества может быть оценен количественно. Объединенное со встроенными средствами статистического планирования эксперимента, моделирование литейного процесса может быть использовано с целью автоматической оптимизации технологического процесса и конструкции отливки [1]. Программа может преследовать несколько целей одновременно и находить наилучший компромисс между ними, основываясь на фундаментальных теоретических концепциях и предположениях. Автоматическая оценка всех рассчитанных критериев качества может быть использована для быстрого и легкого поиска оптимального пути к достижению желаемой цели. Кроме того, количество реальных испытаний может быть сокращено, и степень влияния различных параметров на достижение устойчивого режима технологического процесса может быть оценена на ранней стадии разработки отливки, оснастки и технологии процесса [2]..

Новая методология автоматической оптимизации не заменяет практический опыт литейщика и его теоретические знания. Чтобы удовлетворить техническим и экономическим ограничениям своего производства и требованиям, предъявляемым к отливке, литейщик нуждается в конкретизации того, какой параметр он может изменять и в какой степени, чтобы достичь своих целей. Эти цели можно количественно оценить, связав их с соответствующими критериями качества. Вопросы, адресованные программе, просты: что характеризует хорошую литниковую систему, как мне попасть в область устойчивой работы процесса, как мне выбрать условия процесса, обеспечивающие требуемое качество литья? Чтобы ответить на эти вопросы, требуется количественное описание важности влияющих на процесс факторов, измеряемый показатель качества, оценка стоимости и сформулированные цели, которых надо достигнуть. Подобно оптимизации технологического процесса в реальности, автоматическая оптимизация использует три основных составляющих (рис.1):

- Переменные **параметры процесса** (входные переменные)
- Выбранные **критерии качества** (выходные величины) как вычисляемые количественные результаты
- Различные **цели** (целевые функции)



Переменные процесса	Критерии качества	Цели
• Химический состав (% Si, % Cu, ...) • Модификация расплава • Технологические параметры (температура заливки, время, ...) •	• Оборот (объем литников, объем прибылей, ...) • Свойства(σ_T, σ_B, HB, ..) • Структура: SDAS, пористость, включения, ... • ...	• Выход годного • Обеспечение прочности ответственных мест • Минимизация дефектов • Спокойное заполнение • ...

Рис. 1: Виртуальное пространство автоматической оптимизации проектирования, составленное из различных параметров процесса, вычисляемых критериев качества и целей оптимизации, определяемых в программе.

До последнего времени средства моделирования литейных процессов использовались инженерами, занимающимися литьем металлов, чтобы подтвердить выбранный ими технологический режим и компоновку элементов литейной технологии. Затем они вручную изменяли параметры процесса, геометрию (литниковую систему, питатели) или оснастку, приближаясь к поставленной цели, и повторяли этот процесс до тех пор, пока не находили удовлетворяющего их решения . Такое последовательное, шаг за шагом, приближение может быть описано как одномерная, выполняемая вручную, оптимизация (Рис. 2).

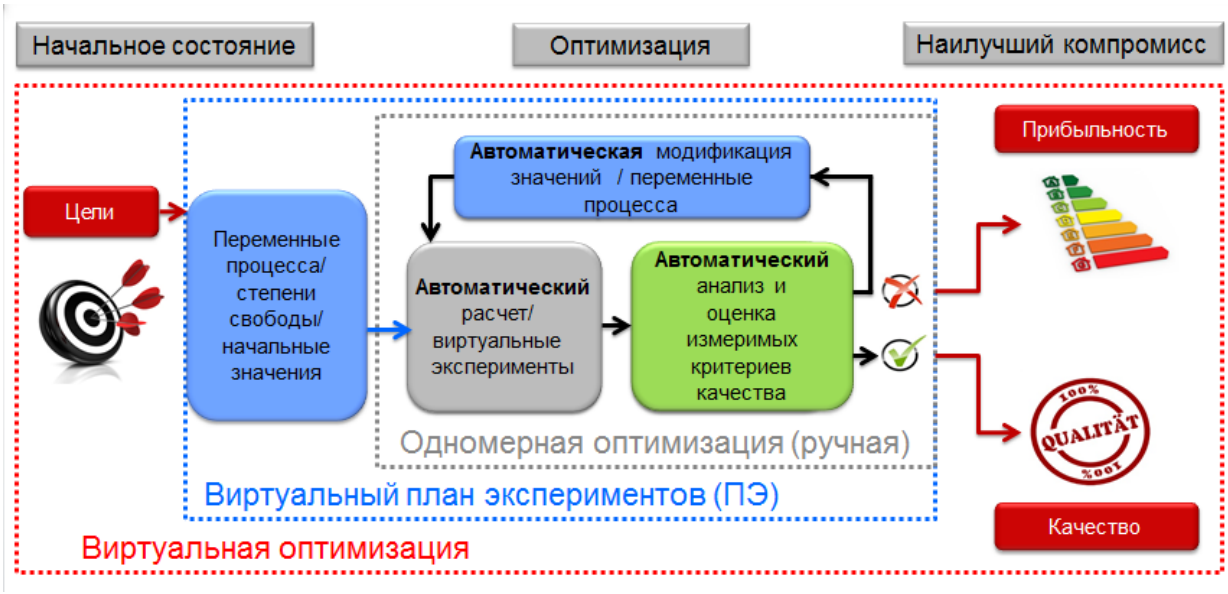


Рис. 2: Различные способы оптимизации для нахождения наилучшего решения

В MAGMASOFT® этот набор действий (область внутри серого контура) теперь полностью автоматизирован. Он может быть расширен за счет автоматического планирования эксперимента (автоматическое ПЭ), где изменения геометрических и технологических параметров заранее заданы (голубой контур). При этом подходе задается набор вариантов, которые могут быть обсчитаны автоматически, например, с изменением количества, местоположения и размеров прибылей, параметров технологического процесса или химического состава металла. Для каждого варианта расчета программа автоматически оценивает заданные критерии качества. Эти критерии могут основываться на любых результатах, доступных в MAGMA[5], например, информация, подобная времени затвердевания, качественная информация, подобная пористости и воздушным ловушкам, или характеристика локальной микроструктуры, а также такие свойства, как расстояние между дендритами, количество глобул или предел прочности.

Объединение целей ведет к полной автоматической оптимизации (красный контур), когда просчитанные варианты автоматически оцениваются, в соответствии с тем, какое значение придается тому или иному критерию, а критерии зачастую противоречат друг другу. Как и в повседневной работе металлурга, такая ситуация подразумевает, что программа должна найти компромисс между различными требованиями к отливке и технологическому процессу (например, избежать критической пористости при одновременном обеспечении приемлемого выхода годного). Используя генетический алгоритм и статистические методы, программа может преследовать эти конфликтующие цели одновременно и предложить из посчитанных вариантов наилучший.

Ниже приводятся примеры того, каким образом этот новый подход помогает инженерам-литейщикам систематически совершенствовать понимание технологического процесса, чтобы обеспечить его устойчивость раньше, чем первая отливка будет залита.

Оценка и оптимизация качества стального литья

Отсутствие дефектов – ключевой критерий, определяющий качество стального литья. Агломерация включений в критических сечениях часто требует значительного времени зачистки и может привести к неприемлемому падению механических свойств. Отливка часто уходит в брак из-за того, что при механической обработке проявляются поверхностные дефекты, связанные с посторонними включениями.

Большинство включений в стальных отливках вызывается окислами металла, образующимися на стадии заливки вследствие контакта с воздухом. Хорошо известно, что инженеры-литейщики противодействуют этому, искусно конструируя литниковую систему. Они знают, что, организуя спокойное течение металла и избегая образования воздушных карманов в потоках, можно значительно улучшить чистоту отливки.

Чистота реальной отливки определяется механической обработкой поверхности, подсчетом включений и статистической оценкой двумерных проб. Во избежание выбраковывания отливки это исследование может быть выполнено на отдельных образцах, с подразумеванием того, что оценивается как бы металлургическое качество отливки в целом. Важные эффекты, порождаемые локальными потоками внутри отливки, таким образом, полностью игнорируются. Экспериментальная оценка распределения неметаллических включений всегда связана с увеличением времени и дополнительными расходами, и в производстве совершенно непрактично проводить её для каждой отливки.

Автоматическое планирование эксперимента (ПЭ) и оптимизацию, однако, можно выполнить быстро и с минимальными усилиями. Они позволяют проводить систематическое изменение конструкции питателей и количественно оценивать разные варианты (рис. 3). В приведенном примере было исследовано влияние конструкции литниковой системы на количество и распределение включений окислов на поверхности стальной отливки. Программа просчитала двенадцать различных вариантов оформления литниковой системы. Без взаимодействия пользователя с программой все варианты расчета в ПЭ автоматически были открыты, просчитаны, а их результаты были оценены с учетом важных критериев качества. На рис. 3 различные варианты представлены столбиками и упорядочены в соответствии с чистотой поверхности. Это позволяет быстро определить, хороши или плохи варианты в соответствии с выбранным критерием качества. Хороший (№3) и менее эффективный (№10), варианты приведены на рис. 3. Каждый прилегает к соответствующему, рассчитанному для него результату оценки его чистоты поверхности.

На рис. 4 приводится оценка качества поверхности для четырех выбранных вариантов. В качестве дополнительного критерия качества выбрана степень турбулентности на стадии заполнения. Это можно легко оценить, используя размер площади поверхности фронта металла, доступного для окисления во время заполнения. Вариант с наибольшей поверхностью включений имеет и наибольшую турбулентность при заполнении. Этот график подтверждает общепринятую связь между спокойным характером течения и наивысшей чистотой поверхности. Автоматическая оптимизация предоставляет удобную, быструю и надежную количественную оценку критерия качества. Сравнительная оценка результатов автоматической оптимизации позволяет установить связь между параметрами процесса и критерием качества.

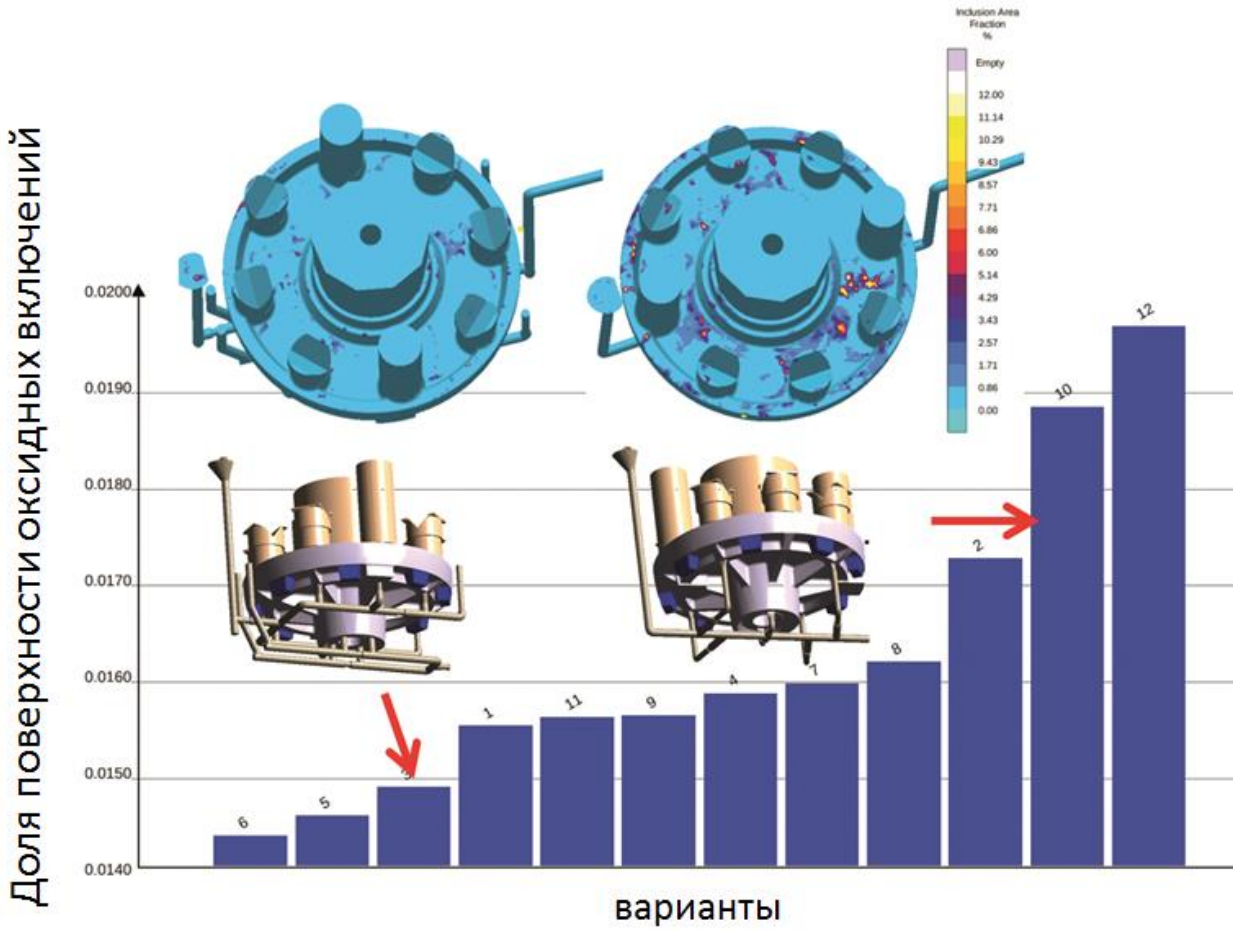


Рис. 3: Автоматическая количественная оценка связи конструкции литниковой системы с качеством поверхности отливки

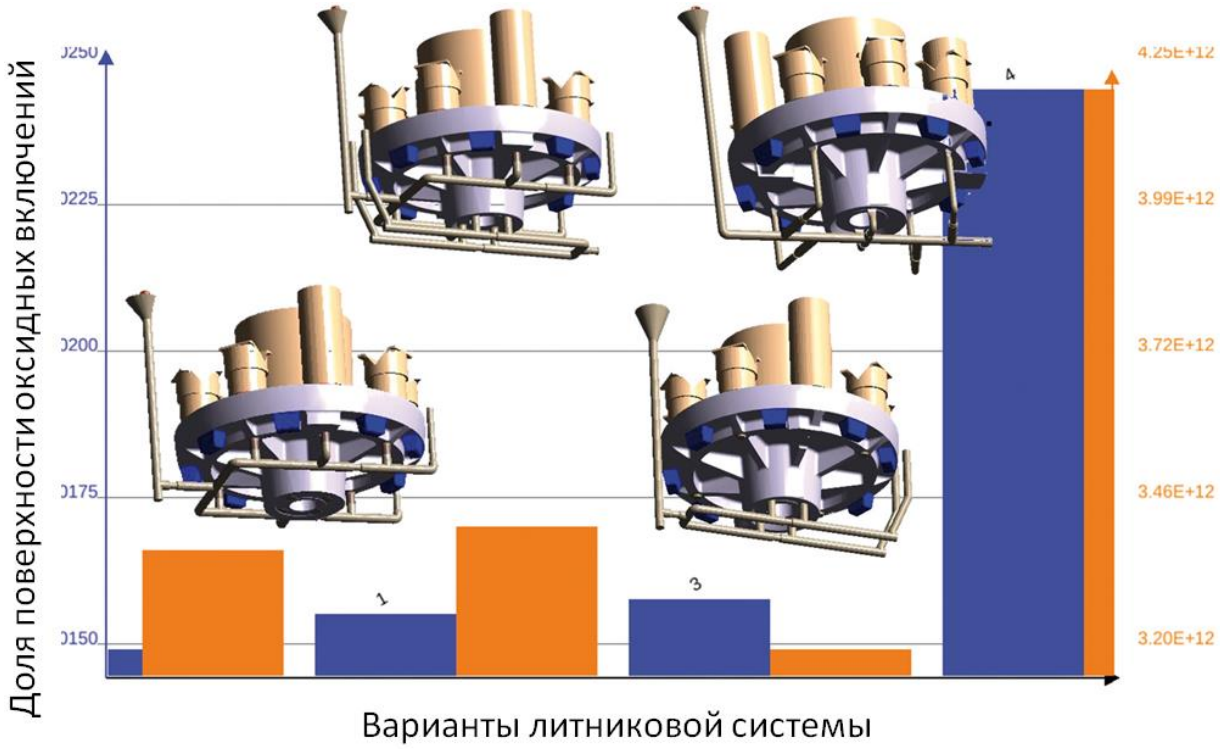


Рис. 4: Оценка качества поверхности и степени турбулентности в процессе заливки для 4 вариантов конструкции питателей

Оптимизация прибыли для водила планетарной передачи

Автоматическая оптимизация позволяет инженеру-литейщику локально оценить качество отливки, основываясь на количественных критериях качества. Сочетание их с возможностью гибкого изменения как параметров технологического процесса литья, так и геометрических параметров конструкции открывает неограниченный потенциал для определения наиболее значимых факторов, влияющих на качество литья, и создания оптимальной компоновки элементов для производства.

В этом примере оптимизируется конфигурация питающей системы водила планетарной передачи из высокопрочного чугуна (рис. 5). Питание критической области фланца (штриховая красная линия) обеспечивается комбинацией верхних прибылей и нескольких холодильников снаружи и ниже этой области. Дополнительная переменная – это толщина стенки в области ниже прибылей, приводящая к несколько отличающейся схеме.

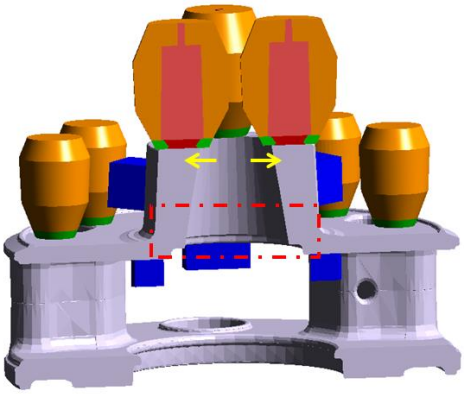


Рис. 5: Вид сечения водила планетарной передачи из высокопрочного чугуна, расположения прибылей и холодильников; красная штриховая линия описывает критическую область; желтые стрелки показывают, где толщина стенки отливки может быть увеличена.

Изменялось несколько параметров, чтобы оценить, какие из них оказывают наибольшее влияние на усадочную пористость в критической области. Конкретно было исследовано влияние размера прибылей, толщины стенки водила и конфигурации холодильников снаружи и ниже критической области. Это привело к ПЭ с тридцатью двумя вариантами расчета, которые программа выполнила в автоматическом режиме.

Результаты этого ПЭ (рис. 6) показывают влияние изменения каждого параметра на оцениваемый критерий качества – величину усадочной пористости во фланце. Каждый маркер в диаграмме рассеяния представляет один вариант расчета и его результат.

Результат показывает, что низкий уровень пористости может быть достигнут для всех изменяемых параметров. Абсолютно очевидно, что геометрия холодильников имеет значительное влияние на усадочную пористость. Компоновка с максимальным числом холодильников, справа на рис. 6, обеспечивает наименьшее количество усадочных дефектов, независимо от реализации других изменений. В этом отношении данное решение устойчиво по отношению к изменениям других условий производства. Как и ожидалось, возрастание размеров бобышки также сужает разброс в области дефектов, но это оказывает меньшее влияние, чем изменения в холодильниках.

Использование автоматического ПЭ позволяет определить, какие параметры оказывают значительное влияние на качество отливки, и на чем инженер-литейщик должен сосредоточить свое внимание (в данном случае на конфигурации холодильников), чтобы найти окончательную и оптимальную конфигурацию.

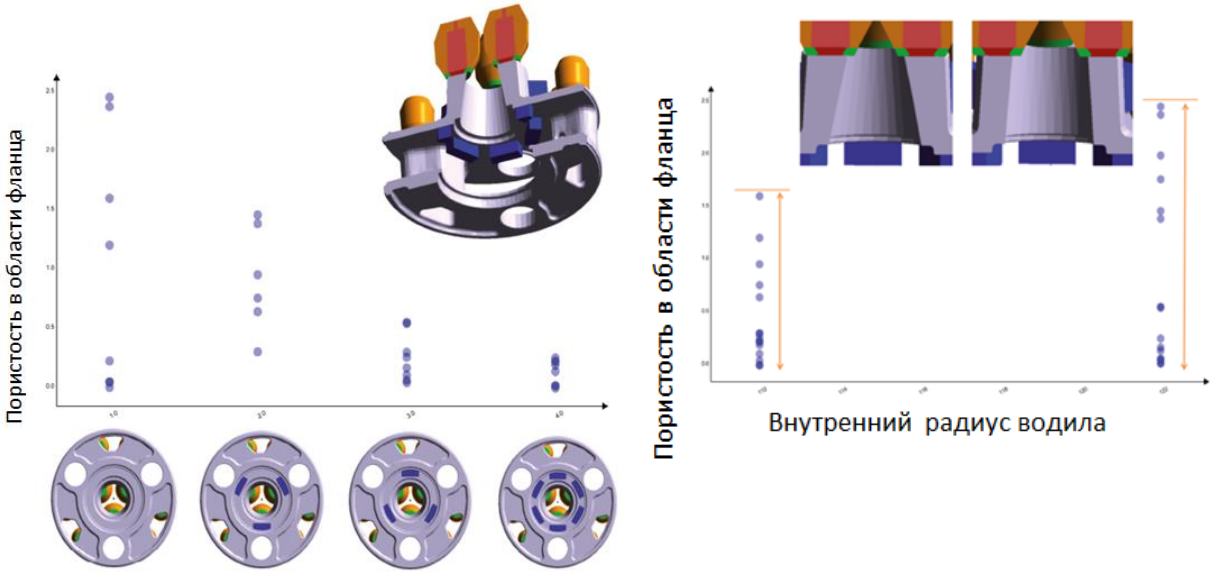


Рис. 6: Влияние конфигурации холодильников (слева) и бобышки (справа) на усадочную пористость в критической области

Схема устойчивого процесса литья алюминия в землю

В производстве крупных отливок особо важно постоянно удовлетворять требованиям качества. Параметры процесса могут меняться или дрейфовать по времени. Ввиду сложного взаимодействия между этими параметрами процесс литья всегда осуществляется в области допустимых параметров (окне процесса). Внешние факторы, например, химический состав металла или вариации формовочной смеси, влияют на процесс литья и могут сдвигать его от рабочей точки.

Автоматическое ПЭ и оптимизация предоставляют количественную информацию о связи между параметрами процесса и качеством литья. Кроме того, они несут важную информацию о том, как изменяются критерии качества, когда параметры процесса или другие факторы флуктуируют. Это означает, что применение автоматической оптимизации не только помогает определить наилучшую конфигурацию литейного процесса, но также предоставляет информацию о том, насколько устойчив предполагаемый режим литья.

Следующий пример представляет выбор конфигурации прибыли в процессе литья алюминия в землю [3] (рис. 7). Литье производится в шестигнездную форму.

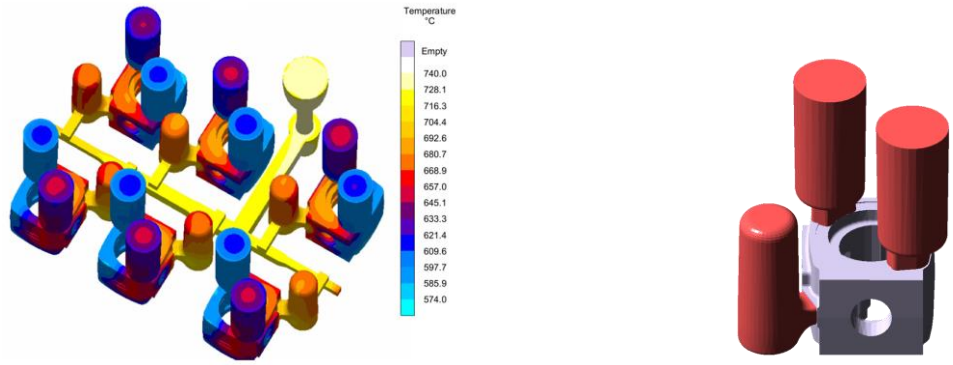


Рис. 7: Литниковая система с шестью отливками – температурное распределение в конце заполнения (слева) и исходная конфигурация для одной детали (справа)

На первом этапе оптимизируются форма и размер «горячей» прибыли. После заполнения формующей полости температурное распределение у разных отливок заметно различается. Каждая отливка заполняется через «горячую» прибыль. Кроме того две «холодных» прибыли размещаются сверху каждой отливки. Была выполнена автоматическая оптимизация с целевыми функциями «минимум усадочной пористости внутри отливки» и «минимальный объем прибыли». Было выполнено 45 вариантов расчета (для каждого считались заполнение и затвердевание). Расчеты выполнялись в автоматическом режиме и заняли меньше 8 часов. Диаграмма рассеяния на рис. 8 приведена в координатах «объем прибыли - усадочная пористость». Зеленым цветом показана конфигурация, наилучшим способом удовлетворяющая обеим целям. Она свободна от пористости и имеет наименьший объем прибыли. График также показывает, что существует множество других вариантов получения отливки, свободной от пористости (горизонтальная группа маркеров вблизи оси абсцисс), но все они приводят к уменьшению выхода годного из-за увеличенной «горячей» прибыли.

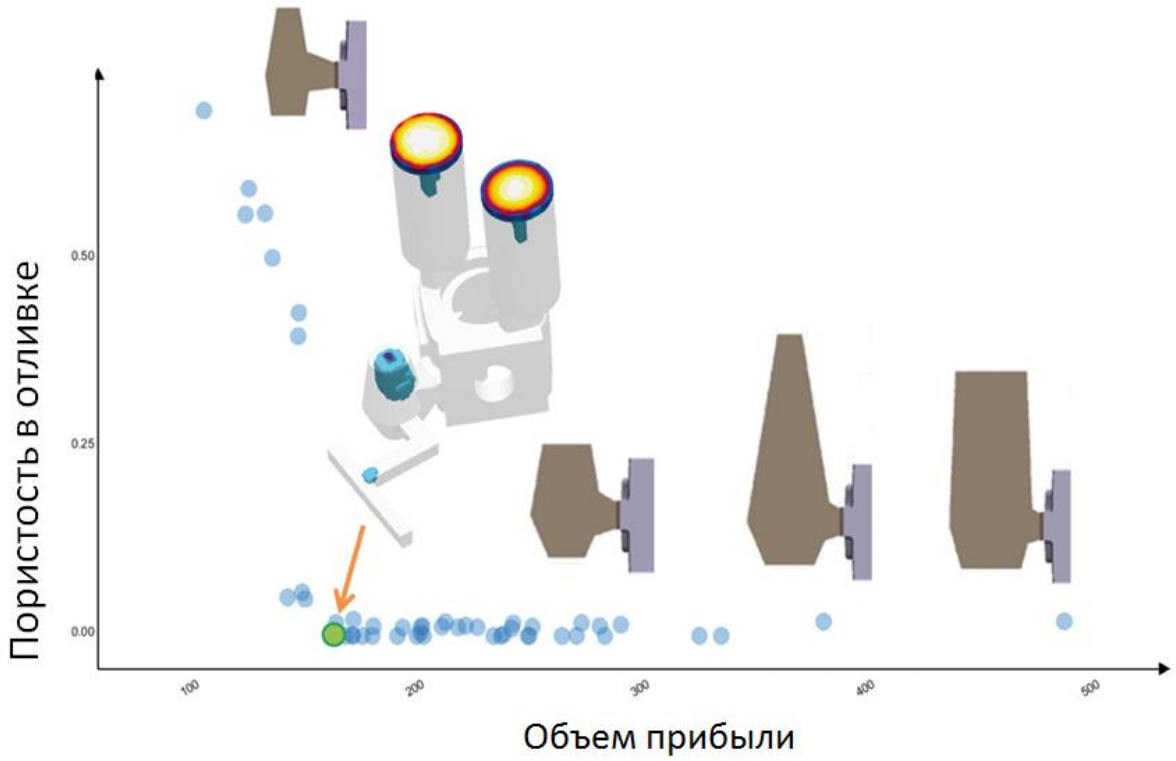


Рис. 8: Влияние формы и размера горячей прибыли на пористость отливки и прибыли, представленное на диаграмме рассеивания (зеленая точка - наилучший вариант).

Указанный оптимальный вариант представляет собой наилучшую комбинацию, при которой отливки свободны от дефектов во всех гнездах и имеют наименьшую цену. При этом предполагается, что другие параметры процесса находятся в соответствующей рабочей точке. При оценке всех вариантов с бездефектными отливками можно оценить, насколько выбранная конфигурация прибыли будет надежна в производстве. Программа предусматривает введение дополнительных критериев качества, с помощью которых ранее рассчитанная конфигурация процесса может быть оценена и может быть вынесено заключение относительно надежности процесса. Критерий качества выявляет те части отливки, которые надо подпитывать наиболее длительное время. Если индикация этого критерия распространяется в отливку из прибыли, то возникает опасность того, что даже небольшие флуктуации параметров процесса приведут к пористости в отливке.

Рис. 9 показывает прогнозируемое распределение пористости (слева) совместно с результатом «критичная для подпитки область» (посередине) как оценку качества подпитки для варианта, охарактеризованного как наилучший. Как и ожидалось, отливка свободна от пористости, и индикация критерия видна только в прибылях. С другой стороны, для этой конфигурации критерий «критичная для подпитки область» распространяется в отливку со стороны «горячей» прибыли. Теперь видно, что пользователю удобно выбрать другую конструкцию прибыли, которая будет удовлетворять обоим критериям. В этом

случае достаточно только слегка увеличить в размерах, по сравнению с лучшим вариантом, «горячую» прибыль, чтобы иметь уверенность в том, что индикатор критерия «критичная для подпитки область» не попадет в отливку (рис.9, справа) и тем самым будет обеспечена более надежная схема процесса [3].

Рис. 9: Результаты прогнозируемой пористости и критерия «критичная для подпитки область» для оптимизированной схемы (слева) и более надежная ситуация для слегка увеличенной прибыли.

Одновременная автоматическая оптимизация литниковой системы и режима заливки в постоянную форму.

При разработке конструкции литниковой системы и выборе параметров процесса литья в постоянную форму следует учитывать, что они тесно связаны. Геометрия литников и динамика заполнения полости формы должны соответствовать друг другу. В качестве примера здесь приводится исследование влияния одновременного изменения конструкции литниковой системы и режима заполнения на качество отливок в четырехгнездной форме.

Размер сечения литниковой системы при литье под высоким давлением тем меньше, чем дальше оно находится от пресс-остатка. В этом примере (рис.10) литниковая система оптимизируется изменением положения места, с которого сечение литника уменьшается (см. сплошную и штриховую красные линии на рис. 10). Это положение оказывает значительное влияние на характер заполнения отливок, в частности, на равномерность заполнения. Это важное предварительное условие воспроизводимости высокого качества отливок в производстве.

Рис. 11 показывает локальное время заполнения для двух различных вариантов изменения сечения литниковой системы. В связи с симметрией показана только правая сторона. Вариант слева демонстрирует значительную разницу во времени заполнения между верхней и нижней отливками. Вариант

справа значительно лучше в этом отношении, так как полости заполняются почти идентично.
Для одновременного исследования влияние изменений в геометрии литника и ускорения пресс-плунжера при впрыске на характер заполнения, синхронно менялись положение места уменьшения сечения литника и продолжительность стадии ускорения пресс-плунжера от малой скорости к высокой.

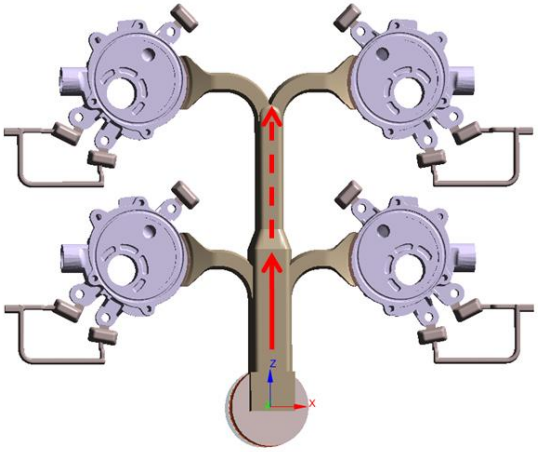


Рис. 10: Перемещение места изменения поперечного сечения литника.

Выполнялось автоматическое ПЭ - 98 вариантов расчета, в которых геометрия и изменение кривой впрыска автоматически генерировались, рассчитывались, а затем оценивались.

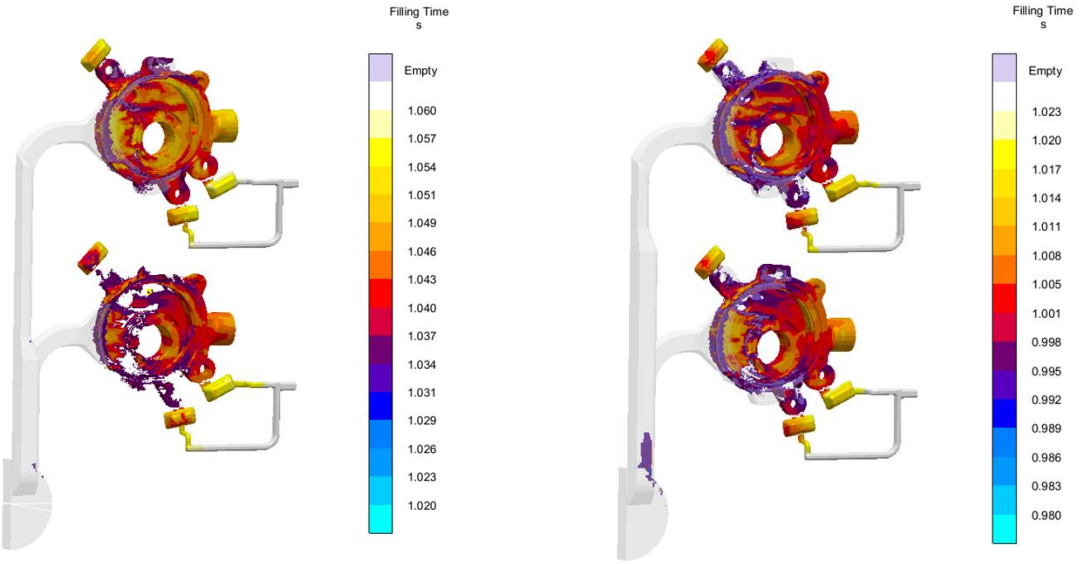


Рис. 11: Локальное время заполнения для двух различных литниковых систем. (Ввиду симметричности системы приводится только ее половина.)

В верхней части рисунка 12 представлен график скорости пресс-плунжера. Для исследованных вариантов время начала фазы ускорения всегда располагалось между вертикальными зеленой и синей линиями. В нижней части рисунка 12 представлена диаграмма главного эффекта, представляющая влияние изменения начальной фазы ускорения (верхняя диаграмма) и влияние перемещения места изменения сечения (нижняя диаграмма) на разницу между временем заполнения различных полостей формы. Чем меньше эта разница, тем равномернее заполняются полости. Каждый маркер на этой диаграмме представляет среднее значение результатов всех вариантов ПЭ, соответствующих фиксированной точке начала ускорения или фиксированному месту изменения сечения. Наклон линии соответствует степени влияния соответствующего параметра процесса на выбранный способ измерения качества: круче наклон - сильнее влияние.

Эти результаты показывают, что более позднее переключение ускорения приводит к увеличению разницы по времени в заполнении полостей. В сравнении с этим, эффект перемещение места изменения сечения проявляется слабо. Перемещение места уменьшения сечения вверх делает заполнение полостей более однородным

Этот пример показывает, что изменение одного параметра процесса всегда оказывает влияние на другие условия процесса или на решения относительно конструкции отливки или оснастки.

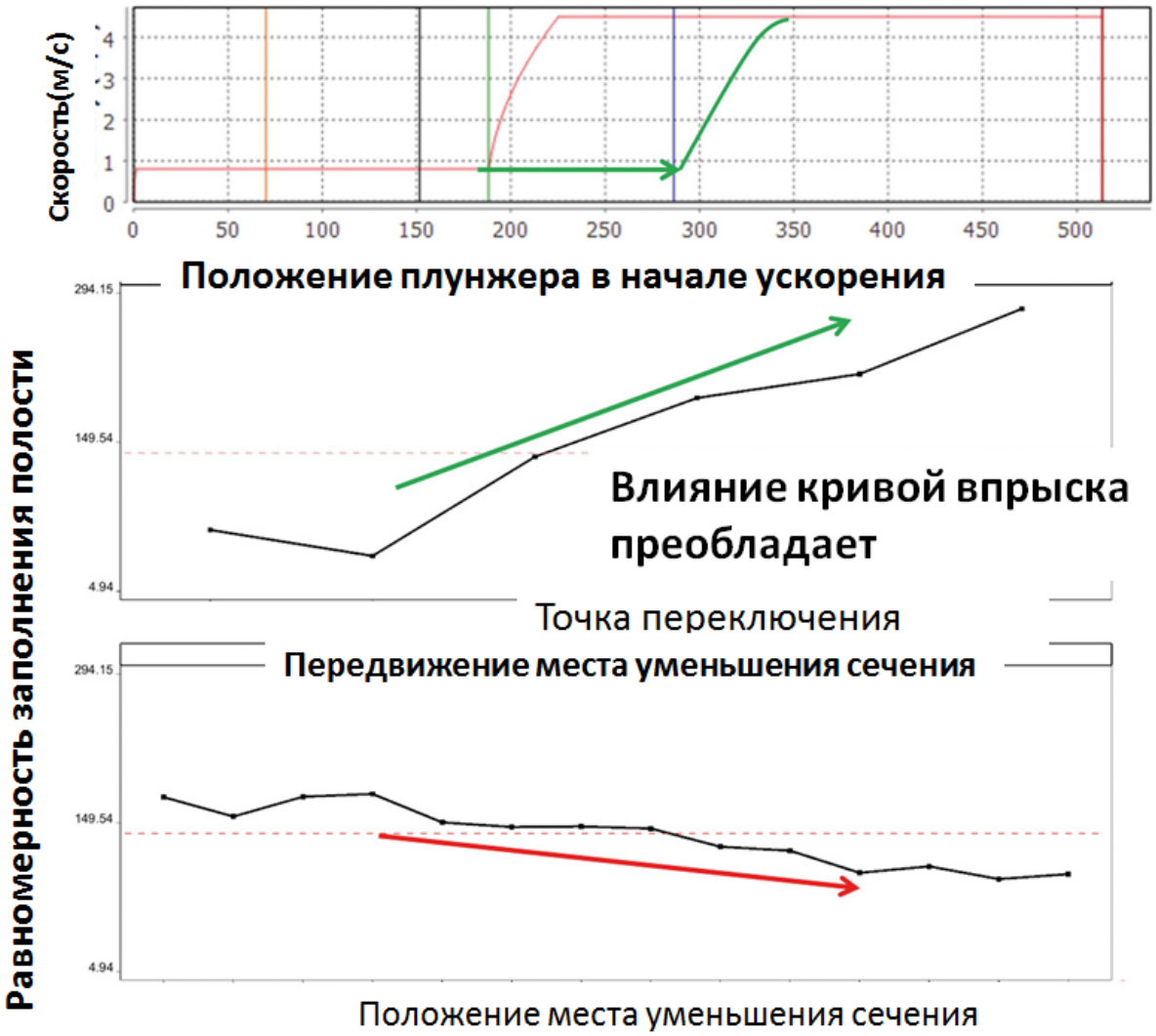


Рис. 12: Изменение кривой заполнения (вверху) и диаграммы главного эффекта влияния времени переключения режима при заливке (посередине) и высоты уменьшения сечения (внизу) на равномерность заполнения полостей.

Автоматическая оптимизация опорной рамы при термообработке конструкционного литья [4]

С помощью расчета процесса литья можно прогнозировать уровень остаточных напряжений и искажения геометрии отливки после окончания всего производственного процесса, причем включая процесс термообработки. Данный пример иллюстрирует, что автоматическое ПЭ и оптимизацию можно использовать с целью минимизации искажения формы достаточно сложной конструкционной детали, получаемой литьем под давлением.

Закалка на твердый раствор является для алюминиевых сплавов первым этапом режимов термообработки T6/T7. Вследствие низкой прочности этих материалов вблизи температуры солидуса и воздействия гравитации на отливку в тонкостенных конструкционных отливках на этом этапе процесса всегда существует опасность появления пластической деформации. Рис. 13 иллюстрирует количественную связь различных показателей температуры и

времени закалки с рассчитанным искажением геометрии конструкционного автомобильного литья. Очевидна ясная тенденция к увеличению деформации с увеличением времени закалки при той же самой температуре. Следовательно, виртуальные эксперименты не только обеспечивают посредством количественной оценки понимание составляющих технических условий, но также предоставляют возможность определения надежных условий процесса и экономии энергии при разработке изделия.

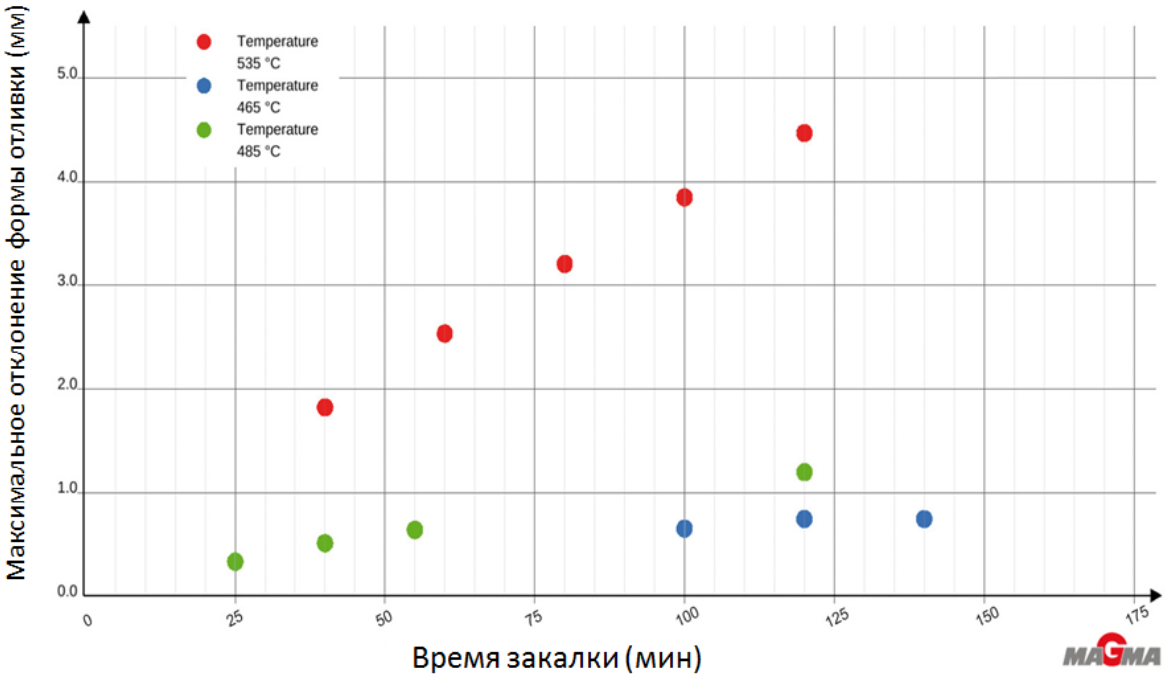


Рис. 13: Исследование зависимости максимальной деформации отливки конструкционной детали от температуры и продолжительности закалки на твердый раствор

Во время термообработки отливка расположена на опоре. Нахождение соответствующих контактных точек опоры и отливки чрезвычайно важно для достижения устойчивости измерений. Сначала выбирались наилучшие показатели температуры и продолжительности закалки, а затем оптимизировалось отклонение от размеров выбором контактных точек между отливкой и опорой. Виртуальный план экспериментов был составлен так, чтобы оценить различные варианты расположения контактных точек (рис. 14). Рис. 15 показывает результаты деформации отливки для выбранных вариантов. Отчетливо видно искажение формы детали за счет гравитации. Первый вариант опоры (слева вверху) показывает отклонение в 3,2 мм в левой передней части отливки. Кроме того, дополнительная поддержка левого переднего угла (справа вверху на рис. 15) приводит к значительному улучшению. Следующий вариант (слева внизу) показывает, что перемещение одной из опор спереди почти не дает эффекта. На представленных вариантах

опоры передвижение левой опоры в обратном направлении и даже больше налево, приводит к небольшим искажениям, около 0,5 мм (внизу справа).

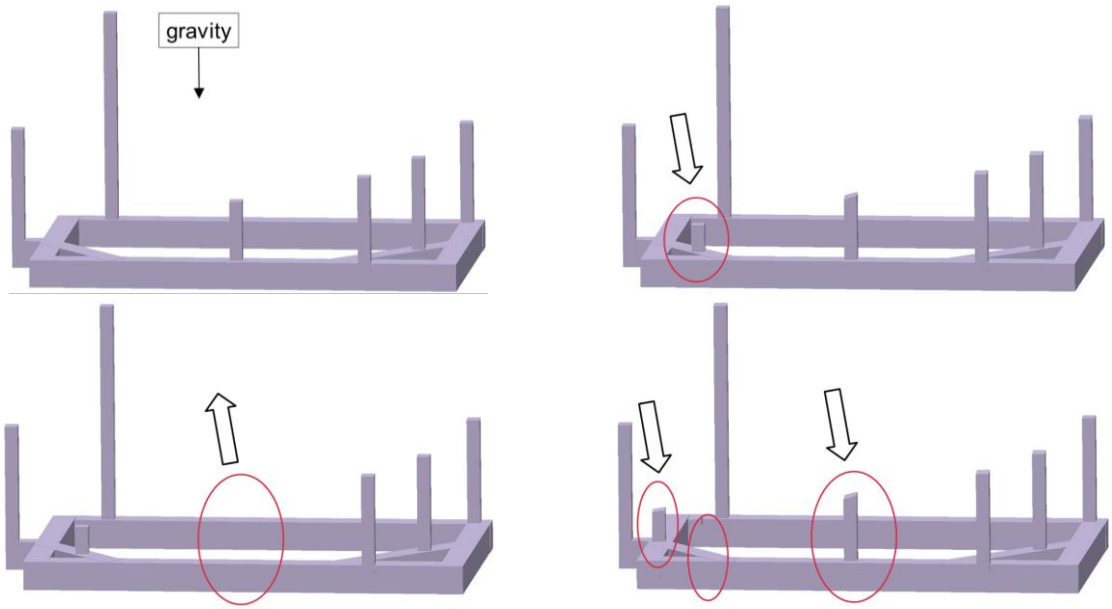


Fig. 14: Четыре различных варианта опоры отливки для исследования отклонений при термообработке.

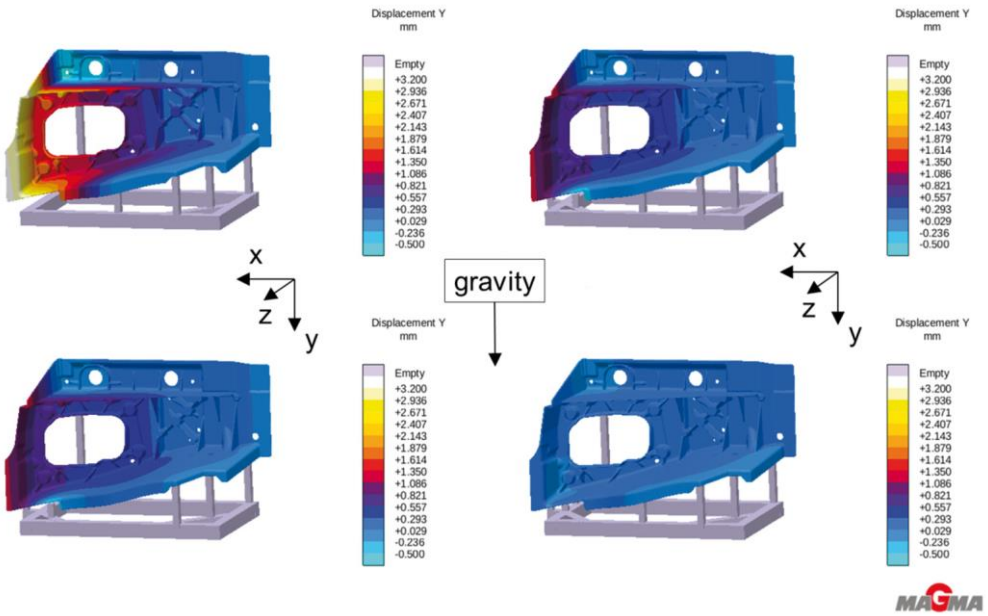


Рис. 15: Отклонение формы конструкционной отливки во время закалки для четырех различных вариантов опоры, показанных на рис. 14

Автоматическая оптимизация температуры нагревательных элементов в стержневых ящиках

Срок службы стержневых ящиков в значительной мере зависит от теплового баланса оснастки и циклических напряжений, создаваемых температурными изменениями в процессе изготовления стержней. Поэтому желательно

минимизировать температурные изменения при эксплуатации стержневых ящиков в процессе изготовления стержней, а также сохранять однородность температуры, насколько это возможно, для всего объема стержневого ящика. Полный процесс изготовления стержней, включающий стадию пескострела, отверждения связующего и изменения температуры в процессе цикла работы стержневого ящика, можно проанализировать, используя расчет и автоматическую оптимизацию.

Рис. 16 показывает мгновенную картину температурного распределения в обеих частях стержневого ящика в процессе рабочего цикла. Уровень температуры областей, соответствующих частям с самыми толстыми стенками стержня, очень низок. Это приводит к высоким циклическим напряжениям, уменьшающим срок службы стержневого ящика.

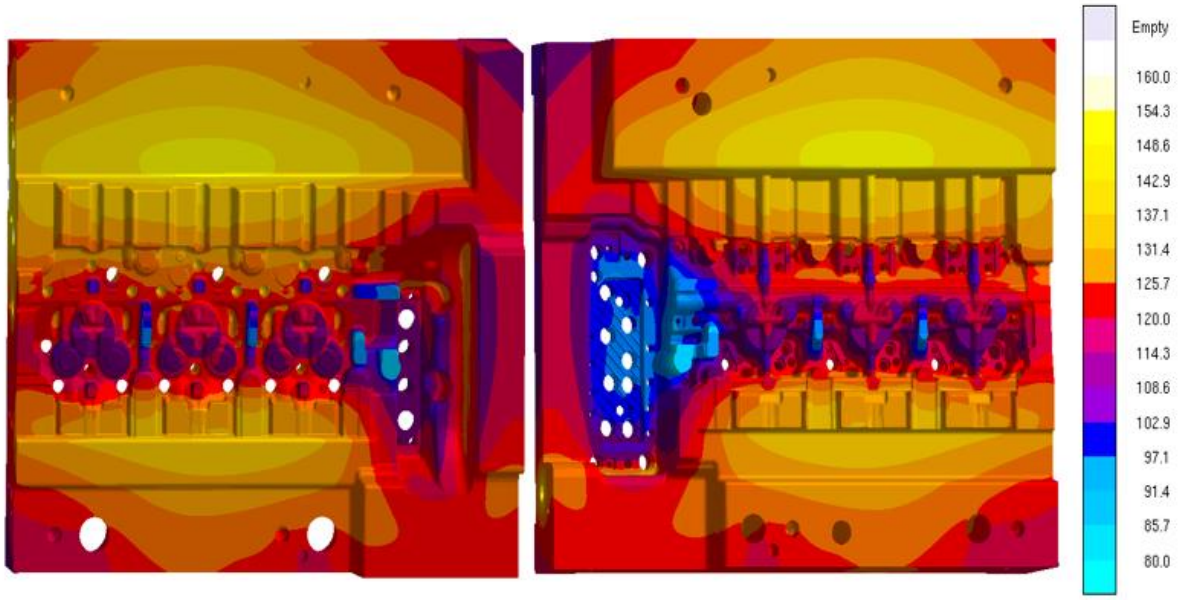


Рис. 16: Температурное распределение в обеих частях стержневого ящика в течение производственного цикла

Более однородное температурное распределение достигается целенаправленным регулированием нагревательных элементов в стержневом ящике. Каждый такой элемент оказывает свое влияние на распределение температуры в оснастке во время производственного цикла. В реальности, выявление воздействие каждого отдельного элемента на температурное поле в стержневом ящике потребовало бы широкого ряда измерений. Поэтому автоматическая оптимизация является идеальным средством оценки конфигурации множества нагревательных элементов и их индивидуального влияния на температурное поле во время производственного цикла. В этом примере влияние каждого нагревателя на температурное поле в критической области можно увидеть на главной диаграмме влияния (рис. 17). Нагреватель №6 имеет наибольшее влияние на температуру в той области стержневого ящика, которая считалась слишком холодной. Это демонстрируется крутым

наклоном соответствующей линии. В противоположность этому, почти горизонтальная линия для нагревателя №3 показывает, что этот элемент почти не имеет влияния на температуру холодной области.

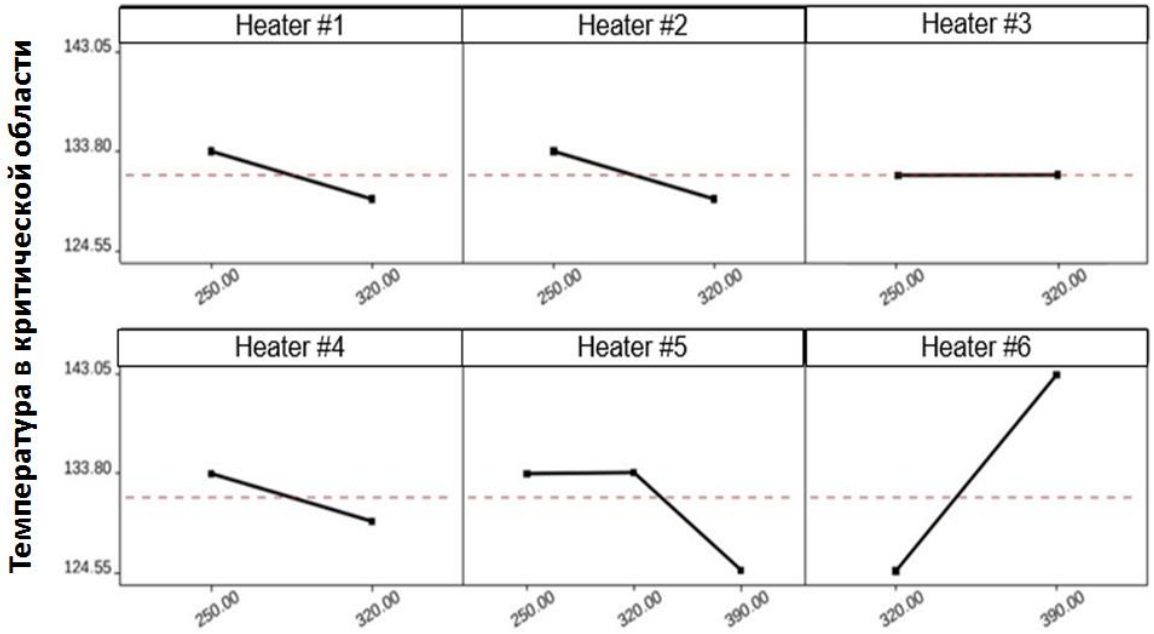


Рис. 17: Влияние отдельных нагревательных элементов на среднюю температуру термопары, расположенной в критической области.

Резюме

Эти несколько примеров были приведены для демонстрации полной интеграции автоматической оптимизации в аппарат расчета процесса литья металлов. ПО MAGMA[5] может быть использовано для обеспечения оптимизации, надежности спроектированного технологического процесса и коридора технологических параметров ранее того момента, когда пройдет первая заливка. Программа находит наилучшие возможные параметры технологического процесса и подбирает для этого процесса оптимальные размеры и расположение литниковой системы и питателей, а также размеры и расположение прибылей и холодильников. Инженеры-литейщики могут использовать автоматическую оптимизацию как виртуальную экспериментальную площадку для достижения самых разных целей, связанных с повышением качества продукции и сокращения производственных расходов одновременно.

Цель сохранения удобных для пользователя средств расчета была достигнута путем реализации возможностей создания параметрической геометрии и автоматического изменения параметров совместно со средствами статистического анализа автоматического планирования эксперимента и генетического алгоритма автоматической оптимизации. Совместная оценка полученных результатов дает возможность инженеру-литейщику легко

сравнивать результаты расчетов и делать из них выводы. Зависимости между конструкцией и переменными процесса, критериями качества и целевыми функциями легко визуализируются.
Через тридцать лет после начала эры расчета процессов литья инженеры-литейщики, наконец, получили возможность комбинировать отдельный расчет, автоматическое ПЭ и автоматическую оптимизацию для того, чтобы лучше понимать процесс и создавать надежные литейные технологии, обеспечивающие производство качественных отливок при наименьшей стоимости.

Литература

[1] Hahn, I., Sturm, J.C.: Versuchspläne in der gießtechnischen Simulation, GIESSEREI 96 (2009), Nr. 7

[2] Bramann, H., Pavlak, L.: Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozess-Simulation. GIESSEREI 102 (2015), Nr. 2

[3] Dieckhues, G., Gummersbach, T., Schmidt, D.: Feeder Design for an Aluminium Sand Casting, presentation at the International MAGMA User Meeting, Potsdam, Germany, October 2014

[4] Gaspers, H.J., Thorborg, J.: Design Optimization of Heat Treatment Support Frames for Aluminium Alloy Structural Cast Parts using Virtual Experimentation, European Conference on Heat Treatment (2015), Venice, Italy, May 2015.