

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Ольховик Е.О.¹, Десницкий В.В.²

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Постановка задачи: в статье рассмотрено современное состояние комплекса задач при оптимизации проектирования литейной технологии для изготовления фасонных стальных отливок ответственного назначения. Выделены основные перспективные направления для исследований – геометрическая и топологическая оптимизация элементов литейной технологии автоматизированными методами конечных элементов. Описаны основные подходы для выбора целевой функции оптимизации или их набора, что необходимо для направленного формирования высоких эксплуатационных (механических) свойств металла в отливке и для конструирования технологичных по питанию стальных отливок с высокими показателями сопротивлению внешним силовым нагрузкам. **Цель работы:** в качестве объекта для исследований выбрана стальная отливка корпуса запорной (обратной) арматуры судового и общепромышленного назначения, которая имеет конструктивные особенности исполнения – бесфланцевый вариант. **Используемые методы:** для ее оптимизации выбраны целевые функции – локальный параметр направленности затвердевания и группа расчетных критериев, отвечающих за местный дефицит подпитки жидким металлом. Разработанные методы предполагают выполнение итерационного моделирования затвердевания отливки в форме с применением метода контрольного объема, на каждой расчетной итерации выполняется изменение геометрии элементов литейной технологии (прибылей, литниково-питающей системы) в соответствии с назначенной целевой функцией. За несколько проходов производится постепенное изменение геометрии детали, при этом результаты каждого шага сравниваются с предыдущим до момента достижения приемлемого результата. Приведены результаты топологической оптимизации литого корпуса. **Практическая значимость:** выполнена переработка варианта литейной технологии, позволившая перейти к новой конструкции, при этом было обеспечено высокое качество отливки без снижения механических свойств литой стали, которые замерялись методом испытаний вырезанных образцов. По результатам расчетов и прямых механических испытаний бесфланцевый литой корпус показал высокие эксплуатационные свойства, включая необходимую жесткость запорного узла.

Ключевые слова: стальные отливки, топологическая оптимизация, геометрическая оптимизация, запорная арматура, литейная технология, жизненный цикл.

Введение

Изготовление стальных фасонных отливок ответственного назначения со стабильными механическими свойствами – хорошо известная научно-техническая проблема. Здесь в качестве отдельной задачи можно выделить разработку методов направленного формирования эксплуатационных (служебных) характеристик литых деталей. Решение данной задачи позволит в значительной мере расширить необходимую информацию о жизненном цикле отливки и уже на этапе проектирования принять необходимые мероприятия для оптимизации конструкторско-технологической части. В современной постановке решение данной задачи связано с системами компьютерного анализа и моделирования технологических процессов литейного производства. Здесь главным направлением сохраняется точный анализ применяемых технологических решений, обеспечивающих формирование качественного металла отливок.

Существующие методы моделирования литейных технологий [1] предполагают только детальный анализ температурных и производных от них полей, по результатам которого выполняется доработка средств технологического обеспечения качества. В работе [2] авторы рассматривают вопросы расчета температурных полей в системе отливка – литейная форма с целью прогнозирования механических и эксплуатационных свойств литого металла отливки. В работе [3] рассмотрены вопросы моделирования формирования усадочной пористости в стальных отливках энергомашиностроения, также для оценки изменения механических свойств литого металла. В последние годы возник новый класс задач, связанных с автоматизацией процесса разработки технологии, где в качестве основного метода используются принципы геометрической и топологической оптимизации конструкции детали. Данные принципы уже хорошо зарекомендовали себя для решения задач расчета общей прочности и разработки конструкций с наиболее оптимальной геометрией и формой.

Современное состояние вопроса исследования

Большинство исследований, связанных с геометрической или топологической оптимизацией конструкции высоконагруженных деталей, основано на анализе максимальной статической нагрузки [4]. При этом результатом оптимизации является, как правило, пошаговое удаление объемов материала конструкции, имеющих наибольшие коэффициенты запаса статической прочности. В несколько проходов (расчетных итераций) производится постепенное изменение геометрии детали, при этом результаты каждого шага сравниваются с предыдущим до момента достижения приемлемого результата.

Для оптимизации литейных технологий задача усложняется тем, что в технологической цепочке производства участвует уже группа материалов (литой металл, литейная форма, стержень и другие вспомогательные материалы), процесс формирования отливки в форме является нестационарным и происходит со значительным изменением как физических, так и механических свойств всех материалов. Также геометрическая оптимизация литейной технологии осложняется выбором целевой функции, поскольку их может быть несколько, в зависимости от типа поставленной задачи.

В работе [5] авторы приводят достаточно полный научный обзор методов топологической оптимизации различных конструкций, при этом выделяют четыре основных метода оптимизации, основанных на анализе: равномерности напряженно-деформированного состояния, граничных условий (метод вариации границ), формы конструкции (структурный или геометрический метод).

Вновь разрабатываемые методы топологической оптимизации [6–8] основаны на выборе комплекса целевых функций (многопараметрическая оптимизация) для решения сразу связанного набора задач, например повышение жесткости при определенном соблюдении баланса площади поперечных сечений детали и т.п.

В работе [9] предложены методы оптимизации литниково-питающей системы (ЛПС) для повышения качества отливок и снижения объема дефектов. В качестве целевой функции была выбрана зависимость объемной усадки от условий затвердевания металла в форме. С использованием профессионального программного обеспечения были исследованы гидродинамические особенности заполнения литейной формы, смоделирован процесс формирования усадочной пористости как наиболее распространенный дефект, возникающий вследствие неправильного проектирования ЛПС. В качестве решения авторы предложили оптимизированную систему питания отливки, которая на

практике позволила уменьшить объем пористости и снизить процент брака.

В работе [10] автор приводит сравнительный анализ программных продуктов (MAGMASoft (ФРГ), ProCAST (США, Швейцария), FLOW-3D (США), WinCAST (ФРГ), Poligon (Россия), LVMFlow (Россия)), наиболее распространенных на промышленных предприятиях Российской Федерации.

В работе [11] раскрыты возможности программного комплекса CastDesigner (разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана), предназначенного для конструирования технологичных по питанию стальных отливок.

В работе [12] выполнен анализ существующих математических моделей литейных процессов на предмет наиболее полного учета всех технологических и производственных факторов. Сформулированы рекомендации конструктору и технологу для выбора оптимальной схемы моделирования.

Автор [13] применил на практике методы топологической оптимизации рычага подвески грузового автомобиля, при этом был достигнут результат в виде снижения массы готового изделия.

В цикле работ [14–16] нами были предложены собственные разработки в области геометрической оптимизации стальных отливок ответственного назначения, при этом в качестве целевой функции – использование локального параметра направленности затвердевания, отвечающего за формирование плотного строения металла отливки. Для реализации расчетов разрабатывается специальное программное обеспечение, основанное на применении метода конечных элементов и распределенных вычислений.

Постановка и методы решения задачи

Основным направлением данного исследования является применение технологии топологической оптимизации с учетом всего жизненного цикла. Таким образом, общая задача представляет собой синтез двух решений: оптимизация литейной технологии и повышение общей конструктивной прочности изделия. Такая связь необходима для направленного формирования высоких эксплуатационных (механических) свойств металла в отливке за счет того, что литейная технология разрабатывается не только для обеспечения общих требований по качеству и отсутствию литейных дефектов, но и для создания более оптимальной конструкции с точки зрения сопротивления внешним нагрузкам. Такой подход был апробирован и предложен нами в работе [17].

В качестве объекта для исследований нами был рассмотрен корпус судовой запорной (обратной)

арматуры ДУ150 (материал – сталь 25Л, 08ГДНФЛ и т.п.) в двух вариантах – классический фланцевый и бесфланцевый под приварку, конструкции которых и расчетное напряженно-деформированное состояние приведены на **рис. 1**.

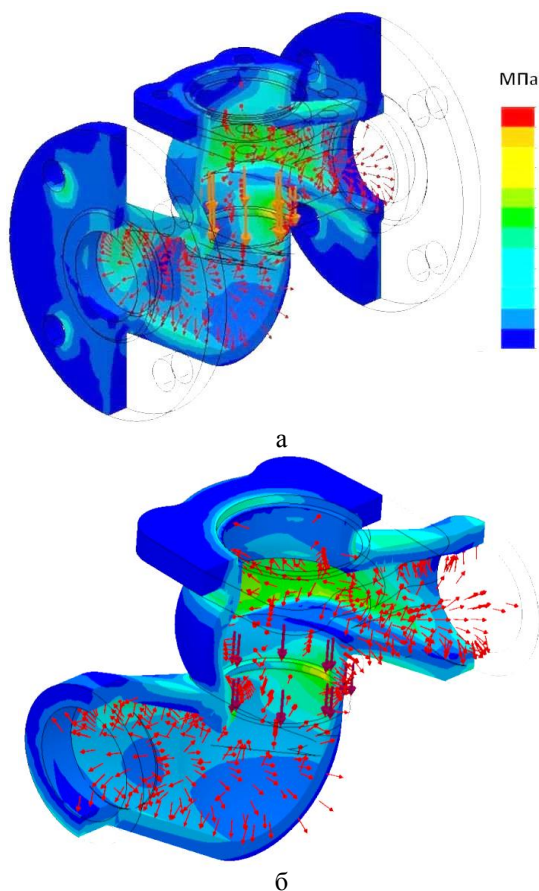


Рис. 1. Конструкция и расчетное напряженно-деформированное состояние корпуса судовой запорной арматуры (при внутреннем давлении 4,0 МПа и запирающем усилии на золотнике в 15кН), а – фланцевая конструкция; б – бесфланцевая конструкция

Данные расчеты (см. **рис. 1**) выполнялись с целью определения изменений конструктивной прочности корпуса в случае отказа от стандартных присоединительных фланцев с переходом к варианту корпуса под приварку. Расчет показал, что по критерию запаса прочности корпус не требует каких-либо значительных изменений конструкции. Было выполнено проектное увеличение толщины стенок в зоне запорного узла, поскольку его расчетная жесткость несколько ниже, чем в стандартном варианте с присоединительными фланцами. Наибольшие сложности возникли при разработке литейной технологии изготовления бесфланцевого корпуса.

Классическим вариантом литейной технологии для данной отливки является установка трех при-

былей – 2-х на присоединительных (боковых) фланцах и 1-й на среднем фланце, с сифонной литниковой системой и местом подвода в центральную часть корпуса. Такой вариант технологии широко известен и хорошо себя зарекомендовал. Бесфланцевая (под приварку) конструкция корпуса является достаточно новой и сопровождается сложностями при разработке литейной технологии. Практическая невозможность установки прибылей на боковые патрубки приводит к недостатку их питания и, как следствие, образованию пористости и локальному снижению механических свойств металла отливки. В связи с этим потребовалась оптимизация конструкции литого корпуса и разработка новых технологических решений.

За основу технологического решения (**рис. 2**) для бесфланцевого корпуса была принята технология с одной увеличенной прибылью на центральном фланце и подводом бокового питателя увеличенного диаметра в центральную часть корпуса.

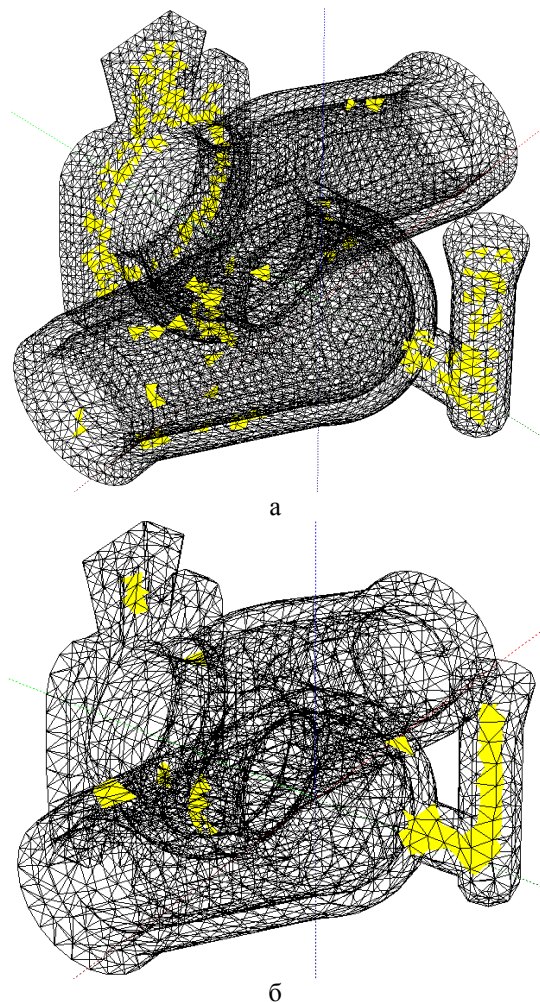


Рис. 2. Расчетные дефекты литейной технологии в бесфланцевом корпусе запорной судовой арматуры: а – дефекты по недостатку питания; б – дефекты в виде усадочной пористости

Результаты исследований

Для оценки качества разработанных литейных технологий в настоящее время используется большая группа расчетных критериев, таких как температурный градиент затвердевания, скорость затвердевания, градиент продолжительности затвердевания, критерий Ниямы, критерий Хью, критерий дефицита питания и др. Все они отвечают за формирование дефектов литого металла различной физической сущности и могут использоваться в качестве целевой функции при оптимизации геометрии отливки.

В качестве целевой функции для оптимизации литейной технологии отливки корпуса нами использовалась группа расчетных критериев, отвечающих за локальный дефицит подпитки жидким металлом. Стратегия оптимизации заключалась в выявлении участков с недостаточным питанием и постепенное уменьшение их объема до полного удаления или, в случае невозможности такого варианта, перемещении их за счет создания и добавления технологических средств направленного затвердевания. В качестве таких средств использовались методы увеличения объема прибыли, изменение ее конфигурации и места соединения (расположения) с отливкой, назначение напусков и др.

Компьютерный анализ литейной технологии бесфланцевого корпуса выполнялся с использованием собственного программного обеспечения на основе метода конечных элементов (МКЭ), основанного на решении задачи нестационарной теплопроводности методом контрольного объема. Полученная информация о расчетных температурных полях для элементов металла и формы дает возможность сформировать поле продолжительности затвердевания (время полного затвердевания каждого элемента) и распределение локального параметра [18] степени направленности затвердевания в отливке. Расчет локального параметра направленности затвердевания для каждого элемента дискретизации отливки выполняется по следующей формуле (1/м):

$$G = \frac{(\tau_2 - \tau_1)}{\Delta l \cdot \tau_1}, \quad (1)$$

где τ_1 , τ_2 – продолжительность затвердевания металла соответственно в исследуемой точке отливки и в точке, отстоящей на расстояние Δl в направлении питания.

Величина локального параметра направленности затвердевания в таком виде отражает качество питания элементов отливки, и тогда распределение параметра направленности затвердевания можно

использовать в качестве целевой функции для геометрической и топологической оптимизации литейной технологии.

На **рис. 2** представлены результаты расчета расположения дефектов в отливке корпуса, вариант *a* – по критерию недостатка питания, вариант *b* – по критерию локального параметра направленности затвердевания G . Значения параметра $G[1/м]$ можно рассматривать как некоторые уровни, каждый из которых определяет работу питающих каналов. В простейшем случае можно выделить в отливке питаемые и питающие элементы. Серия собственных экспериментов [14, 15, 18], а также литературные данные по исследованию образования усадочной пористости позволили выявить условия, позволяющие достичь высокой плотности низколегированной стали в отливках с толщиной стенки в пределах 15–80 мм. Таким условием является следующее соотношение: $10 > G[1/м] > 1$, меньшие значения G приводят к локальному недостатку питания в отливке, а следовательно, к образованию усадочных пор и местному снижению механических свойств металла.

Исходная конструкция корпуса принимается как неизменяемая, топологической оптимизации подвергались только элементы, относящиеся к литейной технологии, – стояк и прибыли. При решении фиксируется расположение подводов металла к телу отливки, в качестве исходной выделяется информация о количестве стояков и прибылей, их позиция и геометрическая форма. Элементы сетки МКЭ помечаются отдельными маркерами, для участков, принадлежащих отливке, – Θ_C^i , литейной технологии (стояки, прибыли) – Θ_F^i и форме – Θ_M^i . Далее выполняется расчет затвердевания металла отливки в форме, результатом которого является расчетное распределение усадочной пористости как выбранной целевой функции для самой отливки (Π_C^i) и элементов технологии (Π_F^i). Прогнозный объем пористости в теле отливки (Π_C^i) может быть представлен как недостаток подпитки жидким металлом из области прибыли Θ_F^i . Таким образом, задача сводится к постепенному увеличению объема прибыли на известную величину – Π_C^i . Нарращивание прибыли производится в автоматическом режиме за несколько итераций, в каждой из которых элементы, принадлежащие форме Θ_M^i на границе с металлом прибыли, переводятся в прибыль Θ_F^i , при этом за каждую итерацию происходит увеличение объема прибыли примерно на

0,2–0,3%. Выбор элементов формы для переноса их в состав прибыли или стояка производится по следующему принципу: сначала выделяются наиболее разогретые элементы формы (рис. 3), граничащие с прибылью и близкие к термической оси стояка или прибыли, их добавление способствует увеличению гидростатического давления и объема питающего металла. Затем постепенно происходит расширение в горизонтальной плоскости, что позволяет увеличивать объем прибыли и время ее работы за счет того, что металл в ядре прибыли большее время остается в жидком и разогретом состоянии. После каждой итерации по наращиванию прибыли выполняется повторный расчет затвердевания отливки уже с измененной геометрией литейной технологии, пересчитываются объемы Θ_C^i , Θ_F^i , Π_C^i , Π_F^i . Критерием окончания процесса оптимизации литейной технологии является отсутствие изменений целевой функции Π_C^i , т.е. дальнейшее увеличение объема прибыли никак не влияет на уменьшение объема усадочной пористости в теле отливки. Такой подход не вызывает резкого изменения объема прибыли, каждая итерация направленно формирует и расширяет питающий канал отливки.

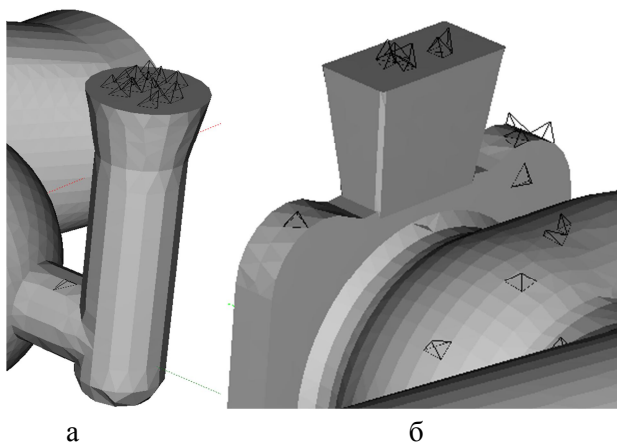


Рис. 3. Расчетные итерации по изменению литниково-питающей системы (ЛПС) (а – стояка, б – питающей прибыли)

В работах [19, 20] авторы предлагают назначать прибыли стандартного типоразмера исходя из предварительных расчетов недостатка объема питания и расположения локальных термических центров в исследуемых деталях. При этом одиночная прибыль или их группа должны располагаться непосредственно на вертикальной оси термических центров отливки, что, в свою очередь, позволяет минимизировать расстояние между питаемым и питающими элементами. Такой подход к оптимизации также является весьма перспективным, поскольку позволяет достаточно

быстро разработать литейную технологию в эскизном варианте для дальнейшей проработки.

Здесь наибольшей сложностью является необходимость многократного моделирования процесса затвердевания после каждой итерации по изменению геометрии ЛПС. Поскольку количество итераций составляет несколько десятков, то процесс оптимизации может занимать значительной время – несколько дней. Для этого была разработана специальная методика расчета, предусматривающая использование параллельных и распределенных вычислений на основе метода контрольного объема, более подробно она описана в работе [21]. Наиболее перспективным подходом для высокопроизводительных вычислений является применение технологии CUDA, которая может быть адаптирована и для решения задач нестационарной теплопроводности (моделирования затвердевания отливки в форме) по схеме, предложенной в работах [22, 23]. Каждая расчетная итерация приводит к изменению общего темпа затвердевания корпуса, что демонстрируется на рис. 4. Здесь видно, что постепенное увеличение объема прибыли приводит к расширению последней фазы кристаллизации (75–100% образования твердой фазы), где и необходима постоянная подпитка жидким металлом из прибыли. Всего за 25–35 итераций ЛПС была увеличена примерно на 15%, а ее эффективность (по сравнению с базовым вариантом) возросла на 50% (по объему элементов, имеющих недостаточное питание в отливке).

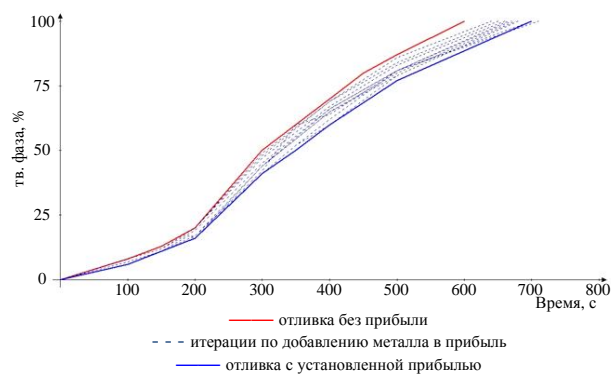


Рис. 4. Изменение темпа затвердевания при итерационной топологической оптимизации литейной технологии по увеличению объема прибыли

Следует отметить, что такой метод, хотя и является весьма эффективным, но в случае, когда начальное положение ЛПС назначено в участках, не имеющих непосредственного влияния на управление ходом кристаллизации, итерации по увеличению ЛПС не смогут дать ожидаемого результата.

Второй вариант схемы топологической опти-

мизации связан с созданием условий для направленного затвердевания металла отливки в форме и перераспределением структуры ЛПС с добавлением технологических припусков. Для этого по критерию продолжительности затвердевания определяются термические центры в отливке и в дальнейшем в качестве целевой функции используется локальный параметр направленности затвердевания. Вертикальные оси термических центров отливки используются как направляющие для постепенного наращивания прибылей, горизонтальные оси используются как точки подвода ЛПС, отличием здесь является то, что на каждой расчетной итерации добавление (перераспределение) элементов литейной технологии выполняется по нарастающей до 5% по объему, что и обеспечивает необходимые условия для направленного затвердевания. Такая методика сходна с работами [19, 20] и позволяет на самом начальном этапе определить площадь сечения в основании прибыли по размерам термических центров, но имеет преимущества, поскольку объем прибыли формируется поэтапно, а не из стандартных типоразмеров. На **рис. 5** представлен результат топологической оптимизации (автоматизированной разработки) литейной технологии по второму методу. Отличием здесь было использование двух разнесенных прибылей на центральном фланце, которые позволили более качественно запитать как сам фланец, так и радиусные переходы входного и выходного патрубков.

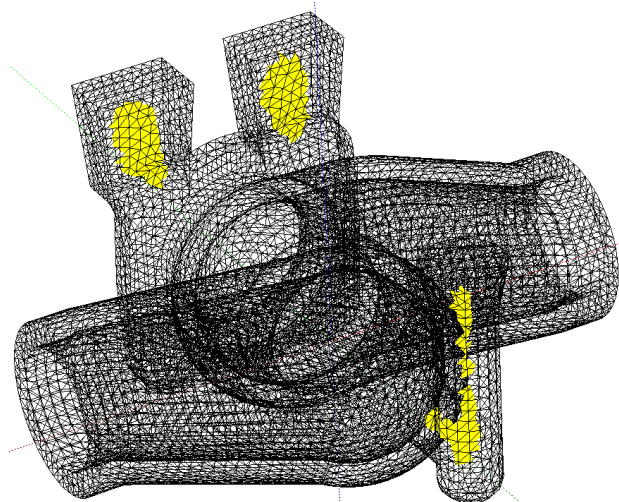


Рис. 5. Расчетная литейная технология для бесфланцевого корпуса судовой запорной арматуры

Исследование механических свойств литой стали экспериментальной отливки выполнялось путем разделения ее на темплеты с последующей вырезкой стандартных образцов для механических испытаний, при этом прочностные и пластические свойства металла были на достаточном уровне, без явных провалов. Бесфланцевая конструкция литого корпуса обладает достаточной жесткостью для реализации запорного узла по предложенной в работе [24] схеме уплотнения «металл»-«металл», что является необходимым условием для нормальной и длительной работы арматуры.

Выводы

В данной статье обсуждаются некоторые задачи, связанные с использованием методов топологической оптимизации при конструировании высоконагруженных корпусных деталей и при разработке их литейных технологий. Предложен способ автоматизированной оптимизации геометрических параметров и размеров прибылей для стальных фасонных отливок. Данный вид оптимизации может быть выполнен на предварительной стадии проектирования, когда ЛПС еще окончательно не выбрана или не определены ее геометрические параметры. Представленный метод был апробирован и может в дальнейшем развиваться как инструмент для проектирования технологий изготовления стальных отливок.

При выполнении работы использовалось программное обеспечение, разработанное автором и зарегистрированное в ФГБУ ФИПС:

Ольховик Е.О. Программа для ЭВМ – «Подготовка составной конечно-элементной модели для моделирования задачи нестационарной теплопроводности методом контрольного объема» №2014662705, зарегистрирована 05.12.2014г.

Ольховик Е.О. Программа для ЭВМ – «Моделирование технологического процесса затвердевания металла отливки в форме» №2014662447, зарегистрирована 01.12.2014г.

Ольховик Е.О. Программа для ЭВМ – «Моделирование дендритной кристаллизации сплава железо-углерод методом фазового поля» №2015613657, зарегистрирована 20.03.2015г.

В следующей статье будут приведены результаты непосредственного исследования механических свойств образцов литой стали, вырезанных из экспериментальных отливок корпуса судовой запорной арматуры для сравнения вариантов различных литейных технологий.

Список литературы

1. Анализ причин брака при производстве стальных корпусных отливок посредством СКМ ЛП LVM FLOW / Сушко Т.И., Леднев А.С., Пашнева Т.В., Руднева И.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. № 1. С. 26–29.
2. Колокольцев В.М., Синицкий Е.В., Савинов А.С. Моделирование температурных полей при получении отливок // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 3 (51). С. 39–43.
3. Ольховик Е. О. Исследование влияния усадочной пористости и параметров структуры на изменение механических свойств в отливках ответственного назначения из углеродистой стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2005.
4. Филимонов И.Е., Гордич А.Г., Прокудин П.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенных корпусных деталей с учетом литейных дефектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2011. № 31 (258). С. 44–48.
5. Deaton J. D., Grandhi R. V. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000 // Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, vol. 49(1), pp. 1–38. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>.
6. Allaire G., Jouve F., Michailidis G. Casting constraints in structural optimization via a level-set method // 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Orlando, United States, 2013.
7. Jain A. Design of an Aluminum Alloy Swingarm and its Weight minimization using Topology Optimization // SAE Technical Paper, 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-1356>.
8. Doctor Y.N., Patil B.T., Darekar A.M. Review of Optimization Aspects for Casting Processes // International Journal of Science and Research (IJSR), 2015, vol. 4(3), pp. 2364–2368.
9. Swapnil A.A., Dr. Jaju S.B. A Review on Optimization of Gating System for Reducing Defect // International Journal of Engineering Research and General Science, 2014, vol. 2(1), pp. 93–98.
10. Вольнов И.Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов-состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. 2007. № 6. С. 14–17.
11. Компьютерное конструирование технологичных по питанию стальных отливок / Поляков С., Куцый О.Я., Коротченко А.Ю., Коровин В.М., Баст Ю. // Литейное производство. 2014. № 2. С. 16–20.
12. Проблемы моделирования литейных процессов / Десницкая Л.В., Ольховик Е.О., Пирайнен В.Ю., Глебов С.М., Семенова Ю.М., Матвеев И.А. // Литейное производство. 2010. № 8. С. 25–28.
13. Вдовин Д.С., Котиев Г.О. Топологическая оптимизация рычага подвески грузового автомобиля // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 3. С. 20–23.
14. Десницкий В.В., Ольховик Е.О. Разработка методов автоматизированного проектирования литейной технологии изготовления отливок // Заготовительные производства в машиностроении. 2006. № 4. С. 7–10.
15. Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Разработка методов автоматизированного проектирования литейной технологии стальных отливок арматуры нефтегазопроводов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 12. С. 40–43.
16. Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Исследование влияния размерной точности отливки боковой рамы тележки грузового железнодорожного вагона на ее прочность // Вестник машиностроения. 2014. № 10. С. 47–49.
17. Ol'khovik E.O. Development process design with effects of technology quality // Applied Mechanics and Materials, 2015, vol. 770, pp. 419–423. Available at: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.419>.
18. Ol'khovik E. O. Study of the Effect of Shrinkage Porosity on Strength Low Carbon Cast Steel // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, vol. 91, pp. 012–022. Available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/91/1/012022>.
19. Tavakoli R., Davami P. Automatic optimal feeder design in steel casting process // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2008, vol. 197(9), pp. 921–932. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2007.09.018>.
20. Tavakoli R., Davami P. Optimal riser design in sand casting process with evolutionary topology optimization // Structural and multidisciplinary optimization, 2009, vol. 38(2), pp. 205–214. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-008-0282-z>.
21. Ol'khovik E.O., Butsanets A.A., Ageeva A.A. Use of the distributed computing at the castings solidification simulation // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/meacs.2015.7414905>.
22. Klimeš L., Štětina J. A Rapid GPU-Based Heat Transfer and Solidification Model for Dynamic Computer Simulations of Continuous Steel Casting // Journal of Materials Processing Technology, 2015, vol. 226, pp. 1–14. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.016>.
23. Michalski G., Sczygiol N. Using CUDA architecture for the computer simulation of the casting solidification process // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2014, vol. 2, pp. 933–937.
24. Ольховик Е.О., Резник Ю.А. Разработка технологии лазерной сварки сильфонных сборок для судовой трубопроводной арматуры // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 3 (25). С. 119–122.

Материал поступил в редакцию 07.04.16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-27-35

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN THE DEVELOPMENT OF CASTING PROCESSES

Evgeniy O. Ol'khovik – Ph.D. (Eng.), Associate Professor

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: olhovick@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9305-0784>

Vladimir V. Desnitskii – D.Sc. (Eng.), Professor

Department of Casting Materials, Processes and Equipment, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia.

Abstract

Problem Statement: This article analyses the current state of optimization tasks in designing casting processes for the production of shaped steel castings intended for critical applications. The main areas of potential research include geometrical and topological optimization of casting technology with the help of finite element methods. The article also describes some basic approaches to the selection of objective function and a set of functions for optimization, which is necessary in order to obtain excellent mechanical properties in steel castings and to design technological castings with high resistance to external loads. **Objectives:** The cast body of a flangeless check valve designed for ship industry and for common industrial use was chosen as the object of this research. **Methods Applied:** The objective functions applied for the optimization included the local parameter of the direction of solidification and a set of calculated criteria responsible for the local deficiency of liquid metal feed. The methods developed are based on iterative simulation of the solidification process and the control volume method. A different geometry of ingot tops and the gating system was used for each iteration depending on the assigned objective function. A series of passes was performed, with each pass slightly changing the geometry of the part. The result of each new pass was compared with the previous one until the satisfactory result was achieved. The article describes the results of topological optimization done to the casting. **Practical Relevance:** The casting process was modified, which resulted in a new design ensuring a high-quality casting with no deterioration of the mechanical properties. The mechanical properties were tested with the help of samples. The calculations and the results of direct mechanical testing show that the flangeless cast body can offer a high performance and the required rigidity.

Keywords: Steel castings, topological optimization, geometrical optimization, shut-off valves, casting technology, life cycle.

References

1. Sushko T.I., Lednev A.S., Pashneva T.V., Rudneva I.G. Analysing the causes of failures in the manufacture of steel castings with the help of LVM Flow. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012, no. 1, pp. 26–29.
2. Kolokoltsev V.M., Sinititskiy E.V., Savinov A.S. Modelling of temperature profiles when producing castings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3 (51), pp. 39–43.
3. Ol'khovik E.O. *Issledovaniye vliyaniya usadochnoy poristosti i parametrov struktury na izmeneniye mekhanicheskikh svoystv v otlivkakh otvetstvennogo naznacheniya iz uglerodistoy stali: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* [Studying the effect of shrinkage porosity and structure parameters on the mechanical properties of carbon steel castings intended for critical applications. Extended abstract of Ph.D. dissertation]. Saint-Peterburg, 2005.
4. Filimonov I.E., Gordich A.G., Prokudin P.A. Modeling of the stress-strain state of thin-walled body parts accounting for casting defects. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mechanical engineering]. 2011, no. 31 (258), pp. 44–48.
5. Deaton J.D., Grandhi, R.V. A survey of structural and multi-disciplinary continuum topology optimization: post 2000. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, vol. 49(1), pp. 1–38. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>.
6. Allaire G., Jouve F., Michailidis G. Casting constraints in structural optimization via a level-set method. 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization. Orlando, United States, 2013.
7. Jain A. Design of an Aluminum Alloy Swingarm and its Weight minimization using Topology Optimization. SAE Technical Paper, 2015. URL: <http://dx.doi.org/10.4271/2015-01-1356>.
8. Doctor Y.N., Patil B.T., Darekar A.M. Review of Optimization Aspects for Casting Processes. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015, vol. 4(3), pp. 2364–2368.
9. Swapnil A.A., Dr. Jaju S.B. A Review on Optimization of Gating System for Reducing Defect. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2014, vol. 2(1), pp. 93–98.
10. Vol'nov I.N. Automated systems for modelling casting processes – current state, problems, prospects. *Liteyshchik Rossi* [Russian foundry worker]. 2007, no. 6, pp. 14–17.
11. Polyakov S., Kutsyi O.Ya., Korotchenko A.Yu., Korovin V.M., Bast Y. Computer-aided design of easily feedable steel castings. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry]. 2014, no. 2, pp. 16–20.
12. Desnitskaya L.V., Ol'khovik E.O., Pirainen V.Yu., Glebov S.M., Semenova Yu.M., Matveev I.A. The problems of casting process simulation. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry]. 2010, no. 8, pp. 25–28.
13. Vdovin D.S., Kotiev G.O. Topological optimization of a truck suspension level. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2014, no. 3, pp. 20–23.
14. Desnitskiy V.V., Ol'khovik E.O. Developing methods for computer-aided design of casting processes. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii* [Blank production in machine industry]. 2006, no. 4, pp. 7–10.
15. Ol'khovik E.O., Desnitskiy V.V. Developing methods for computer-aided design of the casting process for fittings used in oil and gas pipelines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Russian Universities. Ferrous Metallurgy]. 2006, no. 12, pp. 40–43.
16. Ol'khovik E.O., Desnitskiy V.V. Studying the relationship between the dimensional accuracy and the strength of railway bogie solebar castings. *Vestnik mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research]. 2014, no. 10, pp. 47–49.
17. Ol'khovik E.O. Development process design with effects of technology quality. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 419–423. URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.770.419>.
18. Ol'khovik E.O. Study of the Effect of Shrinkage Porosity on Strength Low Carbon Cast Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 91, pp. 12–22. Available at:

- <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/91/1/012022>.
19. Tavakoli R., Davami P. Automatic optimal feeder design in steel casting process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, vol. 197(9), pp. 921–932. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2007.09.018>.
 20. Tavakoli R., Davami P. Optimal riser design in sand casting process with evolutionary topology optimization. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2009, vol. 38(2), pp. 205–214. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-008-0282-z>.
 21. Ol'khovik E.O., Butsanets A.A., Ageeva A.A. Use of the distributed computing at the castings solidification simulation. *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, 2015. Available at: <http://dx.doi.org/10.1109/meacs.2015.7414905>.
 22. Klimeš L., Štětina J. A Rapid GPU-Based Heat Transfer and Solidification Model for Dynamic Computer Simulations of Continuous Steel Casting. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 226, pp. 1–14. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.016>.
 23. Michalski G., Sczygiol N. Using CUDA architecture for the computer simulation of the casting solidification process. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2014, vol. 2, pp. 933–937.
 24. Ol'khovik E.O., Reznik Yu.A. The development of a laser welding technology for bellows used in ship pipeline fittings. *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admirala S.O. Makarova* [Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping]. 2014, no. 3 (25), pp. 119–122.

Received 07/04/16

Ольховик Е.О., Десницкий В.В. Применение методов топологической оптимизации при разработке литейной технологии // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 27–35. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-27-35

Ol'khovik E.O., Desnitskii V.V. Topological optimization in the development of casting processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 27–35. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-27-35