

Обзор методов топологической оптимизации и применение их в литейном производстве

© Ф.С. Свинцицкий, И.А. Коротченко

МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Для современного машиностроения характерны растущие требования к эффективности и экономичности производственных процессов. Один из перспективных подходов, отвечающих этим вызовам, — топологическая оптимизация (ТО). Проведен комплексный анализ методов и прикладного применения ТО в технологическом процессе литья под давлением металлов (ЛПД). Рассмотрены фундаментальные алгоритмы ТО для твердых тел (SIMP, BESO) и потоков жидкости (метод переменной пористости Бринкмана), а также вспомогательные методы и алгоритмы оптимизации изменяемого параметра (ММА, ОС, SQP). Особое внимание уделено формулировке двух целевых функций для минимизации гидравлических и тепловых потерь в литниковых системах. На конкретных примерах продемонстрирована эффективность ТО для решения практических задач: оптимизации геометрии деталей и проектирования литниково-питающих систем. Показано, что внедрение данных методов позволяет существенно сократить материалоемкость, минимизировать литейные дефекты и повысить ресурс оснастки. В заключении сформулированы нерешенные проблемы и намечены перспективы применения ТО в литье под давлением.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, литье металлов под давлением, литниковая система, вычислительная гидродинамика, метод Бринкмана, технологичность отливки

Введение. На современном этапе развития машиностроительных технологий возрастают требования к оптимизации деталей и технологических процессов. В этом контексте метод топологической оптимизации (ТО) демонстрирует значительный потенциал для разработки высокоэффективных решений в отраслях промышленности. Однако, несмотря на успешное применение, с помощью подхода в проектировании облегченных конструкций его внедрение в область литейных технологий, например, в литье под давлением металлов (ЛПД) остается недостаточно изученным.

Актуальность настоящего исследования обусловлена наличием существенных ограничений у эмпирических методов проектирования литниковых систем и оснастки для ЛПД. Классические подходы зачастую приводят к недостаточно качественным решениям, результаты которых проявляются в повышенных гидродинамических потерях, возникновении технологических дефектов отливок и снижении эксплуатационного ресурса пресс-форм. Существующие научные работы, посвященные ТО потока расплава, как правило, фокусируются

на ламинарных режимах течения и не в полной мере учитывают специфику турбулентного и дисперсного режимов течений расплава по каналам формы, характерных для процессов ЛПД металлов.

Цель данной статьи — обзор применяемых методов ТО и формулирование на его основе перспективных тезисов для последующих исследований, направленных на решение актуальных проблем, связанных с ЛПД металлов.

Методы топологической оптимизации. Эти методы можно подразделить на две области оптимизации: твердых тел и потоков жидкостей, в частности расплавов металлов. Для твердых тел чаще всего применяют два метода: Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) и Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) [1, 2]. При использовании SIMP-метода решается дискретная задача распределения материала, где 0 соответствует полному отсутствию, а 1 — полностью заполненной ячейке. При этом могут появляться серые зоны, которые усложняют процесс анализа и требуют изменения расчетных параметров. В случае применения BESO-метода удаляются наименее нагруженные ячейки и получается черно-белое распределение материала без серых областей, к тому же этот метод обладает меньшей сходимостью, чем SIMP.

Самый распространенный метод оптимизации потоков жидкости, в частности расплавов металлов, — метод переменной пористости среды, который часто называют методом Бринкмана [3]. Он заключается в представлении тела как пористой среды с определенной проницаемостью. К его преимуществам можно отнести четкое определение ошибки расчета при заданном факторе наказания, наиболее точное решение достигается у границ формы при факторе наказания, равном 1, когда пористая среда превращается в непроницаемую стенку. При таком моделировании предъявляются менее строгие требования к используемой сетке и границам формы с расплавом, а также существенно сокращается продолжительность и объем вычислений при расчетах.

Для решения задач, связанных с ТО, необходимо задать функцию, участвующую в оптимизации. Для решения задач течения расплавов это уравнения Навье — Стокса как с учетом теплообмена и переменной пористости [4–7], так и без учета теплообмена, но с переменной пористостью [8–11]. В этом случае будет рассмотрена только задача ламинарного течения ньютоновской жидкости. Моделирование турбулентности значительно усложнит задачу и увеличит продолжительность расчетов на несколько порядков [12]. Расчет ламинарного течения подходит для анализа работы метода и сравнения различных программных пакетов с целью выявления наиболее удобного инструмента для оптимизации литниковых систем. В последующих работах

после первоначального сравнения турбулентный характер течения расплава металлов будет принят во внимание при моделировании.

Для течения расплава с переменной пористостью при учете теплообмена записываются четыре уравнения Навье — Стокса:

уравнение неразрывности жидкости

$$\nabla \cdot u = 0; \quad (1)$$

уравнение сохранения импульса

$$(u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla(p)}{\rho} + \nabla(2\nu D(u)) - \frac{\alpha(\gamma)}{\rho}; \quad (2)$$

сопряженный теплообмен

$$C_p u \cdot (\nabla T) = \nabla \cdot \left(\frac{k(\gamma)}{\rho} \nabla T \right) - \frac{Q}{\rho}; \quad (3)$$

тензор скоростей деформации

$$D(u) = \frac{1}{2}(\nabla(u) + \nabla(u)^T), \quad (4)$$

где ∇ — оператор Набла; u — вектор скорости; p — давление; ρ — плотность; $\nabla(u)^T$ — транспонирование дивергенции скорости; ν — кинематическая вязкость; γ — параметр оптимизации; $\alpha(\gamma)$ — пористость; C_p — удельная теплоемкость; $k(\gamma)$ — теплопроводность; Q — источник теплоты; T — температура [6].

Определяется переменная пористость $\alpha(\gamma)$ для уравнения (2):

$$\alpha(\gamma) = \alpha_{\text{ТВ}} - (\alpha_{\text{ТВ}} - \alpha_{\text{жид}})(1 - \gamma) \frac{1 + q}{1 + q - \gamma}. \quad (5)$$

Вычисляется переменная теплопроводность $k(\gamma)$ от пористости γ для уравнения (3):

$$k(\gamma) = k_{\text{жид}} + (k_{\text{ТВ}} - k_{\text{жид}})\gamma^P. \quad (6)$$

Здесь $\alpha_{\text{ТВ}}$, $\alpha_{\text{жид}}$ — значения пористостей для расплава и пресс-формы; q — параметр настройки, равный 0,1 [5, 6]; $k_{\text{жид}}$, $k_{\text{ТВ}}$ — значения теплопроводностей для расплава и пресс-формы [5–7]; P — константа наказания, равная 3 [2, 5, 6, 13].

При этом переменная γ находится в диапазоне $0 < \gamma < 1$, где 0 обозначает поток расплава, а 1 — полностью твердый материал. При моделировании также задаются дополнительные уравнения для контроля или фильтрации ошибочных расчетных параметров.

В модели принимается пористость для расплава $\alpha_{\text{жид}} \approx 0$, чтобы моделировать течение расплава, а пористость для твердых тел $\alpha_{\text{ТВ}} \approx \infty$, чтобы моделировать пресс-форму. Но значение $\alpha_{\text{ТВ}}$ не должно быть слишком большим, иначе могут произойти вычислительные ошибки при моделировании. Для удобства расчета принимаются коэффициенты $\alpha_{\text{жид}} \approx 10^{-5}$, $\alpha_{\text{ТВ}} \approx 10^5$ [7].

Целевая функция течения расплава $J_{\text{жид}}(u, p)$ заключается в том, чтобы минимизировать гидравлические потери в области Γ :

$$J_{\text{жид}}(u, p) = - \int_{\Gamma} \left(p + \frac{1}{2} |u|^2 \right) u \cdot n d\Gamma, \quad (7)$$

где n — единичный вектор, нормальный к области Γ .

Целевая функция теплообмена $J_{\text{тепл}}(u, T)$ заключается в минимизации тепловых потерь в области Γ :

$$J_{\text{тепл}}(u, T) = - \int_{\Gamma} (\rho C_p T) u \cdot n d\Gamma, \quad (8)$$

Минус перед целевой функцией обозначает минимизацию потерь, для задач максимизации знак изменился на плюс. Для того чтобы устранить возможные вычислительные ошибки функций, $J_{\text{жид}}$, $J_{\text{тепл}}$ нормализуются делением на их экстремум $J'_{\text{жид}}$, $J'_{\text{тепл}}$ соответственно:

$$\tilde{J}_{\text{жид}} = \frac{J_{\text{жид}}}{J'_{\text{жид}}}, \quad (9)$$

$$J_{\text{тепл}} = \frac{J_{\text{тепл}}}{J'_{\text{тепл}}}, \quad (10)$$

Если задать уравнения (1)–(10), можно определить оптимизируемую функцию, которую часто называют целевой. Для эффективной ТО в литье требуется последовательно оптимизировать два процесса: течение расплава в целях минимизации гидравлических потерь и теплообмен, направленный на минимизацию тепловых потерь. Достижение критерия оптимальности для одного из процессов приводит к ухудшению характеристик другого. Решение такой многофункциональной оптимизации заключается в нахождении компромиссных параметров, а окончательное решение о выбранных параметрах принимает человек [7]. Целевую функцию для минимизации $F(u, p, T)$ можно записать следующим образом:

$$F(u, p, T) = (1 - \omega) \tilde{J}_{\text{жид}} + \omega J_{\text{тепл}}, \quad (11)$$

где ω — коэффициент влияния (0;1).

Имея уравнения (1)–(11), можно сформулировать задачу ТО для минимизации гидравлических и тепловых потерь:

Для минимизации функции $F(u, p, T)$ (11) параметр γ в уравнениях (5), (6) изменяется и подставляется в выражения (1)–(4). Зная значение γ , можно рассчитать коэффициенты, которые следует подставить в дополненные уравнения Навье — Стокса. На основе полученных параметров u , p и T вычисляется целевая функция, и ее значения сравниваются с исходными значениями. Оптимальным считается решение, соответствующее минимальному значению F , которое затем запускается в программах для моделирования литейных процессов.

Применяются также вспомогательные методы и условия, которые ускоряют время расчетов или улучшают сходимость полученных результатов. К таким методам относятся:

Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE) [14] — алгоритм решения основных уравнений вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD);

Medial Axis Transform (MAT) [15, 16] — метод преобразования геометрии;

Karush—Kuhn—Tucker conditions (KKT) [17] — условие для нахождения оптимального значения изменяемого параметра;

Proportional Integral Derivative controller (PID) [18] — контроллер для регулировки и устранения ошибок.

Для определения следующего оптимального параметра пористости при расчетах применяют специальные методы: Method of Moving Asymptotes (MMA) [4, 5, 19, 20], Sequential Convex Programming (SCP) [21, 22], Sequential Quadratic Programming (SQP) [20], Optimality Criteria (OC) [20, 21, 23], Generalized Optimality Criteria (GOC) [23], Hybrid Cellular Automaton (HCA) [20, 24].

Всего было рассмотрено 29 источников, из которых лишь в 8 представлены методы поиска (или определения) оптимальных параметров, а в остальных — примеры применения ТО. При этом методы MMA, SCP, SQP [25, 26] позволяют работать с значительно большим количеством ограничений, чем OC, GOC, HCA.

Методы OC, HCA подходят для решения задач оптимизации деталей и обладают высокой скоростью вычислений. Для случаев с большим количеством ограничений можно использовать GOC, MMA, SCP, SQP [20], которые подходят для решения любых задач данного класса и являются универсальными методами. Однако для них требуется больше вычислительного времени по сравнению с другими методами.

Методы моделирования турбулентных потоков. При численном моделировании ЛПД течение расплава является дисперсным и турбулентным, что принципиально отличает его от ламинарного

режима своей стохастической и неупорядоченной природой. Это вносит существенные осложнения в математическое описание процесса. Высокая нестационарность и широкий спектр вихревых структур делают прямое численное решение полных уравнений Навье — Стокса для инженерных задач практически нереализуемым из-за колоссальных вычислительных затрат.

В связи с перечисленными трудностями в научной и инженерной практике для адекватного моделирования турбулентных течений получили распространение специализированные подходы, которые позволяют реализовать различные пути осреднения и параметризации турбулентности [12]. К числу наиболее широко применяемых методологий относятся такие вычислительные стратегии, как прямое численное моделирование (DNS), моделирование крупных вихрей (LES) и осреднение по Рейнольдсу (RANS), каждое из которых отличается своей областью адекватности и компромиссом между точностью и требуемыми вычислительными ресурсами. Характеристики всех моделей приведены в таблице. В частности, метод RANS и его модификации нашли широкое применение в прикладных инженерных расчетах благодаря удовлетворительной точности при относительно умеренных затратах машинного времени.

Характеристики моделей

Характеристика	Метод		
	DNS	LES	RANS
Симуляция физики	Полная	Высокая	Низкая
Размер расчетной сетки	$Re^{9/4}$	$Re^{9/5}$	$\log(Re)$
Время расчетов	$\geq Re^3$	$Re^2 - Re^{2.5}$	Слабо зависит от Re

Модель DNS не удастся реализовать на обычном персональном компьютере, LES-модель не подойдет для сравнения моделей из-за низкой скорости расчетов. Изменения выходного или входного канала потребует новых долгих расчетов. Также можно использовать гибридную модель RANS/LES, где у краев стенок применяется LES-модель, а в остальных областях — RANS.

Использование топологической оптимизации в литье металлов. Этот метод применяют для оптимизации литниковых систем [27, 28], систем охлаждения многоразовых металлических литейных форм, конфигурации прибылей и технологичности изготовления отливок. Литниковую систему можно проектировать не только для минимизации гидравлических и тепловых потерь, но и для создания направленной кристаллизации, изменением положения и формы прибыли. Более подробно эффективность ТО прибылей рассмотрена в оригинальной

статье [15]. На рис. 1 представлен конечный результат оптимизации литниковой системы с использованием МАТ-метода, а также показана область, в которой анализируют усадочную пористость.

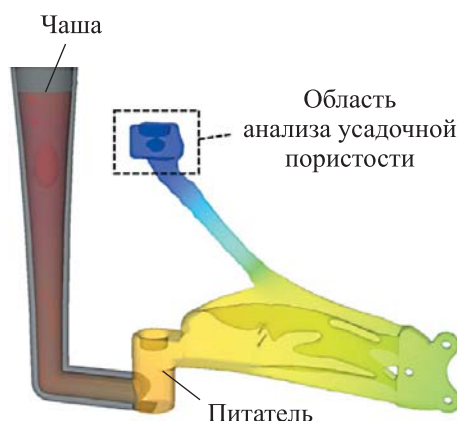


Рис. 1. Конечный результат оптимизации

В статье [15] утверждают, что после ТО удалось добиться в отливке направленной кристаллизации снизу вверх. При использовании такого подхода удалось добиться уменьшения усадочной пористости на 89,4 %. Он позволил оптимизировать расположение прибыли для создания направленного затвердевания. Благодаря этому можно получить направленное затвердевание отливки в любом направлении, для управления ее кристаллической структурой и механическими свойствами.

Еще один пример использования ТО — оптимизация конструкции отливки для поворотной цапфы автомобиля Toyota Corolla [13]. Данная деталь относится к категории особенно ответственных, поэтому должна выдерживать нагрузку до 330 кг. Классический метод ее изготовления — литье по выжигаемым моделям. Для создания модели был выбран метод печати на фотополимерном 3D-принтере (быстрое прототипирование). Одним из критериев анализа являлась экологичность процесса, для оценки которой использовалось специализированное программное обеспечение, позволяющее определить затраты времени, ресурсов и энергии. С помощью ТО удалось уменьшить время изготовления на 7 %, стоимость — на 31 % и вред окружающей среде — на 27 %. Кроме того, была уменьшена масса детали, в результате чего предполагается, что может снизиться расход бензина.

Необходимо также учитывать технологичность отливки при разработке технологии ее изготовления, использование ТО без ограничений не позволит добиться оптимальной конфигурации отливки [16]. Для этого применим метод вписанных сфер или правило Чворина.

Можно представить, что в деталь вписывают сферы, которые должны располагаться таким образом, чтобы вышележащие сферы были больше, чем нижележащие сферы. Иначе это можно сформулировать так: для отливки вышележащая часть должна быть прибылью для нижележащей. Использование данного правила позволит повысить технологичность детали. После ТО применение МАТ метода позволит увеличить технологичность и повысить автоматизацию процесса. Оптимизированная 3D-деталь сначала преобразуется в четырехугольные ячейки (тела), а затем — в САД-модель. Далее модель преобразуется в Т-сплайны, математическую модель для определения поверхностей свободной формы, а после этого в параметрическую САД-модель. Такие шаги дают возможность повысить технологичность отливки и автоматизировать процесс получения готовой 3D-модели.

Применение топологической оптимизации при литье пластмасс под давлением. Пример использования ТО для литниковой системы в литье под давлением пластмасс представлен в работе [5]. Подробный анализ литниковых систем приведен в цитируемой статье. С помощью метода Бринкмана удалось оптимизировать литниковую систему для обеспечения минимальных гидравлических потерь. На рис. 2, а изображена оптимизированная литниково-питающая система, на рис. 2, б — стандартная.

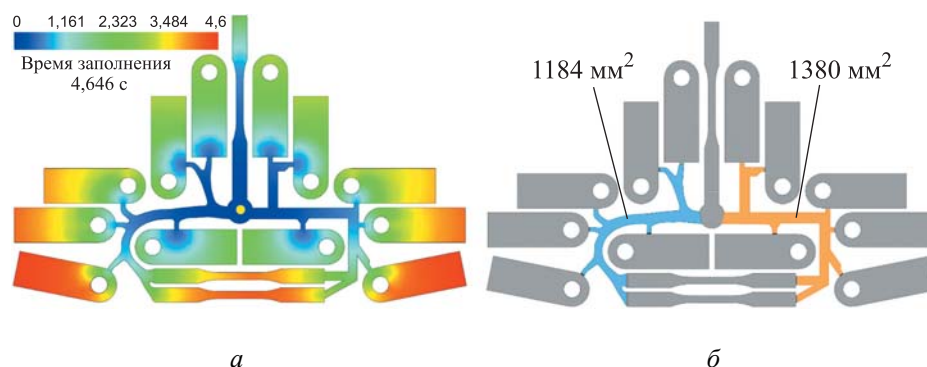


Рис. 2. Результат оптимизации для оснастки термопласт автомата

Применение ТО охлаждающих каналов многофазовых металлических форм при литье металлов позволяет увеличить теплоотвод от формы в момент кристаллизации и снизить загрязнение каналов мелкими частицами [29]. Пример охлаждающего канала представлен на рис. 3. Благодаря оптимальной конфигурации этот канал обеспечивает максимальный теплоотвод. Его изготовили на металлическом 3D-принтере по технологии DMLS, что позволило добиться снижения пористости в теле отливки на 43 %.

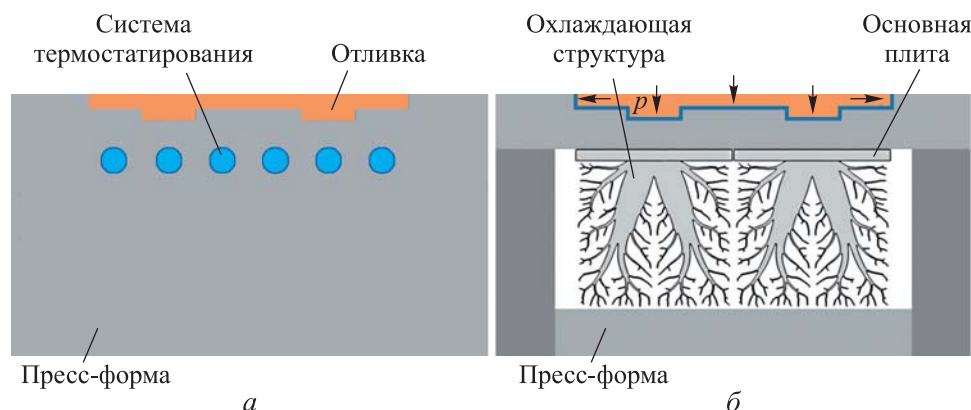


Рис. 3. Металлическая вставка для охлаждения:

а — стандартная система термостатирования; б — ТО металлической вставки

По результатам моделирования классическая система охлаждения жидкостью показала результаты хуже, чем у оптимизированной металлической вставки.

Характерные проблемы при литье металлов под высоким давлением. Проведенный анализ литературных источников показал, что ТО наиболее активно применяется для разработки технологии изготовления литых заготовок литьем в песчано-глинистые смеси и для литья пластмасс. Однако для ЛПД данный метод не является распространенным. Тем не менее авторы полагают, что применение ТО может способствовать решению ключевых проблем, присущих технологии литья под давлением металлов.

К основным проблемам при ЛПД можно отнести следующие особенности технологического процесса: пресс-форма в процессе ЛПД подвергается большим механическим и тепловым нагрузкам, что значительно уменьшает срок ее службы. Использование ТО приведет к увеличению срока службы пресс-формы, а значит, и к сокращению затрат производства и снижению себестоимости отливки, так как не придется тратить время и финансовые средства на изготовление новой пресс-формы. Снижение тепловых потерь позволит производить заливку с меньшим перегревом, благодаря чему повышаются механические свойства отливки и снижается вероятность возникновения литейных дефектов. Также при снижении температуры заливки уменьшится тепловой удар расплава металла о пресс-форму, что существенно увеличит срок ее службы. Падение скоростей течения расплава по каналам пресс-формы позволит понизить размывание отдельных участков пресс-формы, что приведет к увеличению ее ресурса работы.

При ЛПД во время заполнения расплавом полости отливки в пресс-форме происходит захват воздуха расплавом. Поскольку пресс-форма является металлической, воздух не может полностью

выйти, и в отливке формируется пористая структура, напоминающая губку. Это накладывает ограничения на механическую обработку: при удалении плотного поверхностного слоя нарушается структурная целостность отливки, что приводит к значительному ухудшению механических свойств детали. Снижение количества воздуха в теле отливки — одна из ключевых проблем ЛПД.

При стандартном проектировании литниковой системы для изготовления отливки при ЛПД используются четыре эмпирических коэффициента, которые не учитывают гидравлические и тепловые факторы. Это приводит к повышенным гидравлическим и термическим нагрузкам, что существенно сокращает срок службы пресс-формы. Учет этих факторов позволит оптимизировать литниковые системы и процесс их проектирования.

При литье под давлением различают четыре режима заполнения расплавом формы: ламинарный, дисперсный, турбулентный и смешанный. Ламинарный режим, достигаемый при низких скоростях заполнения, трудно реализуем на практике и применяется преимущественно для толстостенных отливок. Турбулентного режима, как правило, избегают из-за повышенного риска захвата газов. Наиболее качественные отливки в современных условиях получаются при дисперсном режиме.

Обеспечение дисперсного режима является именно той задачей, которую можно решить с использованием методов ТО литниковых систем. Следует отметить, что в рассмотренных в обзоре работах характер движения расплава при проведении ТО, как правило, не учитывался. Течение везде моделировалось как ламинарное, тогда, как было отмечено ранее, для ЛПД характерен преимущественно дисперсный режим.

Заключение. Проведенный обзор литературных источников показал, что ТО пока редко применяется в литье металлов. Работам по ТО для способа ЛПД посвящено всего несколько статей. Авторы настоящей статьи видят перспективы применения ТО для литья под высоким давлением металлов и планируют развивать данную тематику в следующих работах.

В настоящее время в литье металлов под высоким давлением существуют проблемы проектирования литниковых систем, качества отливок, повышения ресурса эксплуатации пресс-форм. Эти проблемы могут быть решены с помощью ТО и вспомогательных методов.

1. При ТО литниковых систем не учитывается турбулентный и дисперсный характер движения потока расплава по каналам литейной формы. В ЛПД из-за высоких скоростей расплава формируется дисперсный и турбулентный поток. Использование ламинарных моделей течения в ТО может приводить к искажению финального результата. Поэтому для получения моделей, приближенных к реальным условиям

ЛПД, при моделировании необходимо учитывать характер заполнения расплавом формы.

2. При задании целевой функции для потоков жидкости применяются только гидравлические потери, без учета теплообмена. Рассмотрение теплопереноса при литье металлов является одной из важных задач. Без оценки тепловых потерь невозможно определить пригодность литниковой системы.

3. В проанализированных источниках отсутствует сравнительный анализ методов оптимизации изменяемого параметра для задач оптимизации потоков жидкости. Не определен критерий выбора того или иного подхода с учетом специфики литья. Помимо времени расчетов необходимо учитывать сходимость алгоритма для внедрения в процесс оптимизации и на производстве. Для внедрения в производственный цикл необходим метод, сочетающий высокую скорость сходимости с устойчивостью к погрешностям численного моделирования многофазного течения. Без четких критериев выбора алгоритма расчета ТО могут быть допущены ошибки в расчетах, что, в свою очередь, может привести к значительным затратам машинного времени и необходимости проведения повторного моделирования для достижения приемлемого результата.

4. В проанализированных источниках также отсутствует сравнительный анализ программных комплексов и их возможностей для оптимизации потоков жидкости. Не специалисту может быть не совсем понятно, какое ПО лучше всего подходит для проведения расчетов ТО при различных способах литья металлов.

5. При моделировании не учитываются ограничения, определяемые технологией изготовления отливок тем или иным способом литья. Без технологических ограничений ТО может привести к формированию геометрии литейной оснастки, которую невозможно изготовить стандартными методами механической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] SIMP Topology Optimization Study. *SOLIDWORKS 2026 Help*. URL: https://help.solidworks.com/2026/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm (дата обращения: 07.02.2026).
- [2] Косых П.А., Азаров А.В. Теория и анализ методов топологической оптимизации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 4 (136), с. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-4-2264
- [3] Liu Q., Vasilyev O. V. A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries. *Journal of Computational Physics*, 2007, vol. 227, no. 2, pp. 946–966. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.07.037>
- [4] Dilgen S.B., Dilgen C.B., Fuhrman D.R., Sigmund O., Lazarov B.S. Density based topology optimization of turbulent flow heat transfer systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 1905–1918. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1967-6>

- [5] Kurkin E., Quijada Pioquinto J.G., Kurkina E., Pechenik E., Chertykovtseva V. Heuristic algorithm for the topological optimization of runner system for the thermoplastics injection molding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 124, pp. 1393–1409. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.064>
- [6] Şenol N. *Development of computational fluid dynamics (CFD) based topology optimization codes in OpenFOAM: Master Degree Diss.* Middle East Technical University (Turkey), 2018.
- [7] Subramaniam V., Dbouk T., Harion J. L. Topology optimization of conjugate heat transfer systems: A competition between heat transfer enhancement and pressure drop reduction. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, vol. 75, pp. 165–184. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.002>
- [8] Alexandersen J. A detailed introduction to density-based topology optimisation of fluid flow problems with implementation in MATLAB. *Structural and Multi-disciplinary Optimization*, 2023, vol. 66, no. 1, p. 12. DOI: 10.1007/s00158-022-03420-9
- [9] Boscolo G., Lanzoni S., Peruzzo P. Scaling strategies for Brinkman penalization in fluid topology optimization. *Physics of Fluids*, 2025, vol. 37, no. 7. <https://doi.org/10.1063/5.0280584>
- [10] Kever N. *Topology optimization in OpenFOAM using a continuous adjoint framework: Master Degree Diss.* Universitat Politècnica de Catalunya, 2023.
- [11] Li H. et al. A mini review on fluid topology optimization. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 18, p. 6073. <https://doi.org/10.3390/ma16186073>
- [12] Lü X. et al. Improving the energy efficiency of buildings based on fluid dynamics models: A critical review. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 17, p. 5384. <https://doi.org/10.3390/en14175384>
- [13] Almonti D., Salvi D., Mingione E., Vesco S. Lightweight and Sustainable Steering Knuckle via Topology Optimization and Rapid Investment Casting. *J. Manuf. Mater. Process.*, 2025, vol. 9, p. 252. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080252>
- [14] Khawaja H., Moatamedi M. *Semi-implicit method for pressure-linked equations (SIMPLE) – solution in MATLAB®*, 2018. DOI: 10.21152/1750-9548.12.4.313
- [15] Erber M. et al. Geometry-based assurance of directional solidification for complex topology-optimized castings using the medial axis transform. *Computer-Aided Design*, 2022, vol. 152, p. 103394. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103394>
- [16] Wang T., Wang Y., Hu H. Topological approach for optimization of liquid cooled plate with different inlet/outlet parameters. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, p. 106201. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106201>
- [17] Mayer J., Denk M., Wartzack S. (2023) Reconstruction of Topology Optimized Geometry with Casting Constraints in a Feature-Based Approach. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED23), Bordeaux, France, 24–28 July 2023*. DOI: 10.1017/pds.2023.302
- [18] Gordon G., Tibshirani R. Karush-kuhn-tucker conditions. *Optimization*, 2012, vol. 10, no. 725/36, p. 725.
- [19] Li Z. Review of PID control design and tuning methods. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, vol. 2649, no. 1, p. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/2649/1/012009
- [20] Fanni M., Shabara M., Alkalla M. A Comparison between different topology optimization methods. *Mansoura Engineering Journal*, 2020, vol. 38, iss. 4, article 4. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.103788>
- [21] Mojiri S., Shafiei A., Nourollahi A. Topological optimization of structures with thermomechanical loading under compliance constraints for 3D printing applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 30, pp. 4192–4211. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.135>

- [22] Куркин Е.И., Кишов Е.А., Лукьянов О.Е., Эспиноса Барсенас О.У. Топологическая оптимизация конструкций из короткоармированных композитов с учетом анизотропии материала, определяемой расчетом их литья под давлением. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2020, vol. 22, № 5, с. 114–119. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-5-114-119>
- [23] Kim N.H. et al. Generalized optimality criteria method for topology optimization. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 7, p. 3175. <https://doi.org/10.3390/app11073175>
- [24] Penninger C.L., Watson L.T., Tovar A. et al. Convergence analysis of hybrid cellular automata for topology optimization. *Struct Multidisc Optim*, 2010, vol. 40, pp. 271–282. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0360-x>
- [25] Svanberg K. The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 1987, vol. 24, no. 2, pp. 359–373. <https://doi.org/10.1002/nme.1620240207>
- [26] Zillober C. A globally convergent version of the method of moving asymptotes. *Structural Optimization*, 1993, vol. 6, pp. 166–174. <https://doi.org/10.1007/BF01743509>
- [27] Зарубина О.А., Зарубин А.М., Коротченко А.Ю. Цифровая оптимизация литниковых систем при литье под давлением. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2025, т. 23, № 3, с. 103–107. DOI: 10.36652/1684-1107-2025-23-3-103-107
- [28] 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
- [29] Djabraian S., Teichmann F., Müller S. Thermo-Mechanical Optimization of Die Casting Molds Using Topology Optimization and Numerical Simulations. *Materials*, 2024, т. 17, № 9, с. 2114. <https://doi.org/10.3390/ma17092114>

Статья поступила в редакцию 17.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Свиницкий Ф.С., Коротченко И.А. Обзор методов топологической оптимизации и применение их в литейном производстве. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 5. EDN YLNHGI

Свиницкий Федор Станиславович — студент-магистр кафедры «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: svintsitskiyfs@student.bmstu.ru

Коротченко Игорь Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: korotigor@bmstu.ru

A Review of Topology Optimization Methods and Their Application in Foundry Production

© F.S. Svintsitskiy, I.A. Korotchenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Modern mechanical engineering is characterized by growing demands for the efficiency and cost-effectiveness of production processes. One promising approach addressing these challenges is Topology Optimization (TO). This work provides a comprehensive analysis of the methods and practical application of topology optimization in the die casting process. Fundamental TO algorithms for solids (SIMP, BESO) and fluid flows (the Brinkman penalization method for variable porosity), as well as auxiliary methods and algorithms for optimizing the design variable (MMA, OC, SQP), are considered. Particular attention is paid to the formulation of objective functions for minimizing hydraulic and thermal losses in runner systems. Using specific examples, the effectiveness of TO for solving practical problems is demonstrated: optimizing part geometry and designing runner and gating systems. It is shown that the implementation of these methods allows for a significant reduction in material usage, minimization of casting defects, and an increase in tooling service life. In conclusion, unresolved issues are formulated, such as the need to account for turbulence and manufacturing constraints, which define directions for future research. The conducted analysis confirms the high potential of topology optimization for automating and increasing the efficiency of die casting processes.

Keywords: topology optimization, die casting, gating system, computational fluid dynamics (CFD), Brinkman method, castability

REFERENCES

- [1] SIMP Topology Optimization Study. *SOLIDWORKS 2026 Help*. Available at: https://help.solidworks.com/2026/english/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm (accessed February 7, 2026).
- [2] Kosykh P.A., Azarov A.V. Teoriya i analiz metodov topologicheskoy optimizatsii [Theory and analysis of topology optimization methods]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 4 (136), p. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-4-2264
- [3] Liu Q., Vasilyev O. V. A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries. *Journal of Computational Physics*, 2007, vol. 227, no. 2, pp. 946–966. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.07.037>
- [4] Dilgen S. B., Dilgen C. B., Fuhrman D. R., Sigmund O., Lazarov B. S. Density based topology optimization of turbulent flow heat transfer systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2018, vol. 57, no. 5, pp. 1905–1918. <https://doi.org/10.1007/s00158-018-1967-6>
- [5] Kurkin E., Quijada Pioquinto J. G., Kurkina E., Pechenik E., Chertykovtseva V. Heuristic algorithm for the topological optimization of runner system for the thermoplastics injection molding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 124, pp. 1393–1409. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.064>
- [6] Şenol N. *Development of computational fluid dynamics (CFD) based topology optimization codes in OpenFOAM. Master's Dissertation*. Ankara, Middle East Technical University (Turkey), 2018.
- [7] Subramaniam V., Dbouk T., Harion J. L. Topology optimization of conjugate heat transfer systems: A competition between heat transfer enhancement and

- pressure drop reduction. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, vol. 75, pp. 165–184. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.01.002>
- [8] Alexandersen J. A detailed introduction to density-based topology optimisation of fluid flow problems with implementation in MATLAB. *Structural and Multi-disciplinary Optimization*, 2023, vol. 66, no. 1, p. 12. DOI: 10.1007/s00158-022-03420-9
- [9] Boscolo G., Lanzoni S., Peruzzo P. Scaling strategies for Brinkman penalization in fluid topology optimization. *Physics of Fluids*, 2025, vol. 37, no. 7. <https://doi.org/10.1063/5.0280584>
- [10] Kever N. *Topology optimization in OpenFOAM using a continuous adjoint framework. Master's Dissertation*. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2023.
- [11] Li H. et al. A mini review on fluid topology optimization. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 18, p. 6073. <https://doi.org/10.3390/ma16186073>
- [12] Lü X. et al. Improving the energy efficiency of buildings based on fluid dynamics models: A critical review. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 17, p. 5384. <https://doi.org/10.3390/en14175384>
- [13] Almonti D., Salvi D., Mingione E., Vesco S. Lightweight and Sustainable Steering Knuckle via Topology Optimization and Rapid Investment Casting. *J. Manuf. Mater. Process*, 2025, vol. 9, p. 252. <https://doi.org/10.3390/jmmp9080252>
- [14] Khawaja H., Moatamedi M. *Semi-implicit method for pressure-linked equations (SIMPLE)–solution in MATLAB®*. 2018. DOI: 10.21152/1750-9548.12.4.313
- [15] Erber M. et al. Geometry-based assurance of directional solidification for complex topology-optimized castings using the medial axis transform. *Computer-Aided Design*, 2022, vol. 152, p. 103394. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103394>
- [16] Wang T., Wang Y., Hu H. Topological optimization of liquid cooled plate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, p. 106201. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106201>
- [17] Mayer J., Denk M., Wartzack S. (2023) Reconstruction of Topology Optimized Geometry with Casting Constraints in a Feature-Based Approach. In: *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED23)*. Bordeaux, France, 24–28 July 2023. DOI:10.1017/pds.2023.302
- [18] Gordon G., Tibshirani R. Karush-kuhn-tucker conditions. *Optimization*, 2012, vol. 10, no. 725/36, p. 725.
- [19] Li Z. Review of PID control design and tuning methods. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2023, vol. 2649, no. 1, p. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/2649/1/012009
- [20] Fanni M., Shabara M., Alkalla M. A Comparison between Different Topology Optimization Methods. *Mansoura Engineering Journal*, 2020, vol. 38, iss. 4, article 4. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.103788>
- [21] Mojiri S., Shafiei A., Nourollahi A. Topological optimization of structures with thermomechanical loading under compliance constraints for 3D printing applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 30, pp. 4192–4211. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.135>
- [22] Kurkin E.I., Kishov E.A., Lukyanov O.E., Espinosa Barsenas O.U. Topologicheskaya optimizatsiya konstruktsiy iz korotkoarmirovannykh kompozitov s uchetom anizotropii materiala, opredelyaemoy raschetom ikh litya pod davleniem [Topology optimization of structures made of short-fiber-reinforced composites considering material anisotropy determined by injection molding simulation]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk — Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2020, vol. 22, no. 5, pp. 114–119. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-5-114-119>

- [23] Kim N.H. et al. Generalized optimality criteria method for topology optimization. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, vol. 7, p. 3175. <https://doi.org/10.3390/app11073175>
- [24] Penninger C.L., Watson L.T., Tovar A. et al. Convergence analysis of hybrid cellular automata for topology optimization. *Struct Multidisc Optim*, 2010, vol. 40, pp. 271–282. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0360-x>
- [25] Svanberg K. The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 1987, vol. 24, no. 2, pp. 359–373. <https://doi.org/10.1002/nme.1620240207>
- [26] Zillober C. A globally convergent version of the method of moving asymptotes. *Structural Optimization*, 1993, vol. 6, pp. 166–174. <https://doi.org/10.1007/BF01743509>
- [27] Zarubina O.A., Zarubin A.M., Korotchenko A.Yu. Digital optimization of gating systems in pressure casting. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii — Blank Production in Mechanical Engineering*, 2025, vol. 23, no. 3, pp. 103–107. <https://doi.org/10.36652/1684-1107-2025-23-3-103-107>
- [28] Olkhovik E.O., Desnitsky V.V. Application of topology optimization methods in the development of casting technology. *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
- [29] Djabraian S., Teichmann F., Müller S. Thermo-Mechanical Optimization of Die Casting Molds Using Topology Optimization and Numerical Simulations. *Materials*, 2024, vol. 17, no. 9, p. 2114. <https://doi.org/10.3390/ma17092114>

Svintsitskiy F.S., Master's student, Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: svintsitskiyfs@student.bmstu.ru

Korotchenko I.A., Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Casting Technology, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: korotigor@bmstu.ru