

УДК 621.74.043

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ: МЕТОДЫ, ПРИМЕНЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Свинцицкий Фёдор Станиславович

Студент 1 курса

кафедра «Литейные технологии»

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель: И.А. Коротченко,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»

Современное машиностроение требует повышения эффективности литейных процессов. Топологическая оптимизация (ТО) позволяет находить оптимальное распределение материала в деталях и литниковых системах. В работе рассмотрены основные методы ТО для твёрдых тел (SIMP, BESO) и течений расплавов (метод Бринкмана). Приведены примеры успешного применения ТО в литье: оптимизация прибылей (снижение пористости на 89,4%), литниковых систем (минимизация гидравлических потерь) и охлаждающих каналов пресс-формы (увеличение теплоотвода). Выявлены нерешённые проблемы: отсутствие учёта турбулентности, теплообмена в целевых функциях, недостаточный сравнительный анализ алгоритмов и программных средств. Сделан вывод о высоком потенциале автоматизации разработки технологии литья на основе ТО.

Топологическая оптимизация – эффективный инструмент проектирования облегчённых конструкций, однако её применение в литье металлов, в частности способом литья под высоким давлением (ЛПД) изучено недостаточно. Эмпирические методы проектирования литниковых систем не всегда обеспечивают оптимальные гидравлические и тепловые характеристики, что приводит к дефектам отливок и снижению стойкости оснастки.

Для твёрдых тел наиболее распространены методы SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) и BESO (Bi-directional Evolutionary Structural Optimization) [1, 2]. SIMP меняет плотность материала от 0 до 1, но возникают серые зоны с переменной плотностью. BESO даёт чёткое распределение, но обладает меньшей сходимостью. Для оптимизации течений расплавов применяется метод переменной пористости Бринкмана, где область расчёта рассматривается как пористая среда с проницаемостью, зависящей от параметра оптимизации γ (0 – жидкость, 1 – твёрдое тело) [3, 4]. Целевая функция обычно включает минимизацию гидравлических и/или тепловых потерь, для поиска оптимума используются методы MMA, OC, SQP и др. [5].

Примеры успешного применения ТО в литье разнообразны. Оптимизация геометрии прибыли с использованием преобразования срединного скелета (MAT) позволила снизить усадочную пористость на 89,4% [6]. Итоговая конфигурация литниковой системы обеспечивает минимальные гидравлические потери [4]. Для повышения эффективности охлаждения пресс-форм применяют ТО каналов охлаждения, изготовленная методом DMLS вставка снизила пористость отливки на 43% [7].

При ЛПД расплав движется с высокими скоростями, режим течения – турбулентный и дисперсный. Прямое численное моделирование (DNS) требует огромных ресурсов, поэтому на практике используют LES и RANS модели. Для инженерных задач чаще применяют RANS, дающий приемлемую точность при умеренных затратах [8].

Несмотря на успехи, применение ТО в ЛПД сдерживается рядом нерешённых вопросов: 1) в большинстве работ течение считается ламинарным, что не соответствует реальным условиям; 2) целевые функции часто игнорируют теплообмен; 3) отсутствует систематическое сравнение методов оптимизации (ММА, ОС, SQP) применительно к литью; 4) не проведён анализ программных комплексов (OpenFOAM, Ansys, COMSOL) для задач; 5) ТО без учёта технологических ограничений (уклоны, толщина стенок) порождает нереализуемую геометрию.

Топологическая оптимизация является мощным инструментом повышения эффективности разработки технологии изготовления отливок из алюминиевых сплавов методом литья под давлением. Примеры оптимизации в других способах литья, а именно прибылей, литниковых систем и охлаждающих каналов демонстрируют значительное улучшение качества отливок. Дальнейшие исследования должны быть направлены на учёт турбулентности, сопряжённого теплообмена и технологических ограничений, а также на выбор оптимальных алгоритмов и программных средств.

Литература

1. 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
2. Fanni, M.; Shabara, M.; and Alkalla, M. (2020) "A Comparison between Different Topology Optimization Methods.," Mansoura Engineering Journal: Vol. 38: Iss. 4, Article 4. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.103788>
3. Liu Q., Vasilyev O. V. A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries //Journal of Computational Physics. – 2007. – Т. 227. – №. 2. – С. 946-966. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.07.037>.
4. 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. – Т. 124. – С. 1393-1409. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.064>
5. Svanberg K. The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization //International journal for numerical methods in engineering. – 1987. – Т. 24. – №. 2. – С. 359-373. <https://doi.org/10.1002/nme.1620240207>.
6. Erber M. et al. Geometry-based assurance of directional solidification for complex topology-optimized castings using the medial axis transform //Computer-Aided Design. – 2022. – Т. 152. – С. 103394. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103394>
7. 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>
8. Lü X. et al. Improving the energy efficiency of buildings based on fluid dynamics models: A critical review //Energies. – 2021. – Т. 14. – №. 17. – С. 5384. <https://doi.org/10.3390/en14175384>