ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ С ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ УЗЛАМИ ДЛЯ БЕЗДЕФЕКТНОГО ЛИТЬЯ СЛОЖНЫХ РЕШЕТЧАТЫХ МАКРОСТРУКТУР: ИНТЕГРАЦИЯ CAD-ПАРАМЕТРИЗАЦИИ И CAE-ВЕРИФИКАЦИИ

Н. Н. Романюк

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В. А. Жаранов

Для устранения брака (до 30 %) при литье тонкостенных и решетчатых структур предложен алгоритм CAD/CAE-проектирования литниковых систем. Оптимизация их геометрии и применение пенокерамических фильтров (30 ppi) снижают скорость расплава (< 0,5 м/с). Это исключает турбулентность, захват воздуха и неметаллические включения.

Ключевые слова: литниковая система, пенокерамические фильтры (ПКФ), CAD-параметризация, CAE-моделирование, число Рейнольдса, решетчатые макроструктуры.

Развитие технологий литья по выжигаемым 3D-печатным моделям дает возможность производить решетчатые макроструктуры с перемычками 0,5–1,5 мм. Однако традиционное проектирование литниковых систем неприменимо для таких деталей: брак достигает 20–30 % [1], а сложная геометрия исключает устранение дефектов механообработкой.

Цель работы – разработка интегрированного CAD/CAE-подхода к оптимизации литниковых систем с узлами фильтрации. Метод обеспечивает бездефектное заполнение форм и переход от принципа «отлить и проверить» к предварительной виртуальной верификации перед производством.

Тонкостенные перемычки решетчатых макроструктур отличаются высокой площадью контакта с расплавом (рис. 1). Это ускоряет отвод тепла и быстро повышает вязкость металла при заливке. Одновременно гидродинамические удары разрушают элементы формы, а захваченный ячейками воздух формирует газовые раковины и недоливы. Данные дефекты абсолютно необратимы.

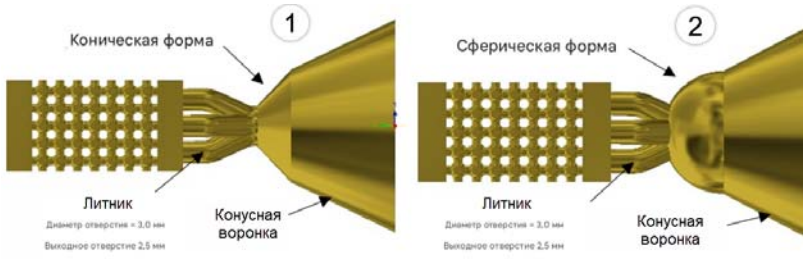


Рис. 1. Варианты геометрии переходного узла литниковой системы для подвода расплава к решетчатой макроструктуре:
1 – коническая форма; *2* – сферическая форма

Кроме того, качество изделий критически снижают неметаллические включения (НМВ) – частицы шлака, оксиды и продукты эрозии. Присутствие НМВ недопустимо в нагруженных ответственных деталях, где нормативы ограничивают наличие НМВ десятками миллиграммов на килограмм.

При литье черных металлов (до 1600 °C) основной причиной дефектов становится высокотемпературная кинетическая эрозия формы, порождающая экзогенные шлаковые включения.

Для цветных (алюминиевых, магниевых) сплавов механика иная. При скорости расплава свыше 0,5 м/с поверхность теряет устойчивость, формируя двойные оксидные пленки. Попадая в отливку, они действуют как готовые микротрещины, критически снижая усталостную прочность и пластичность детали. Во избежание образования двойных оксидных пленок скорость течения цветных сплавов (рис. 2) во всех сечениях литниковой системы строго не должна превышать 0,5 м/с.

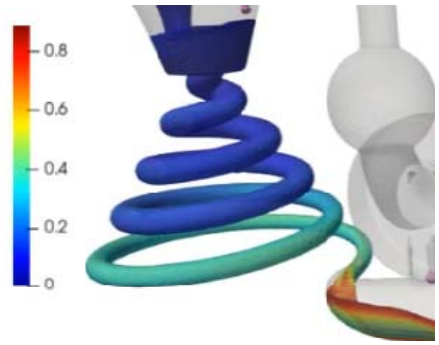


Рис. 2. Пример литниковой системы в виде спирали, экстремально снижающей турбулентность потока, и вероятность образования оксидных пленок

В литниковых системах применяются фильтры трех поколений (эволюция от 2D- к 3D-геометрии):

• I поколение (сеточные). Работают по ситовому механизму. Имеют минимальное гидравлическое сопротивление, но не гасят скорость потока и пропускают мелкие оксиды. КПД очистки: 30–40 %.

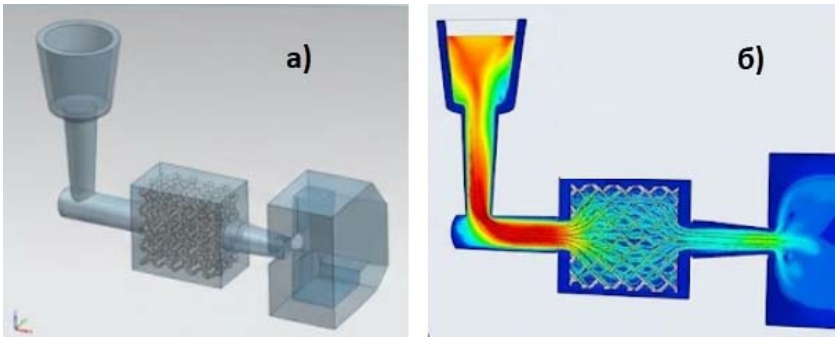
• II поколение (экструдированные сотовые). Выпрямляют и ламинаризуют поток в прямых параллельных каналах. Оптимальны для чугуна и стали, но улавливают лишь те частицы, которые случайно контактируют со стенками. КПД: 50–70 %.

• III поколение (пенокерамические фильтры – ПКФ). «Золотой стандарт» для ответственного цветного литья. Трехмерная губчатая структура реализует глубинную фильтрацию (рис. 3). Лабиринт пор заставляет расплав петлять, осаждая на керамических ребрах частицы размером 5–10 мкм (удерживаются силами Ван-дер-Ваальса). КПД ПКФ класса 30 ppi достигает 90–98 %.



Рис. 3. Развитие поколений фильтровальных элементов: переход к сложной 3D-структуре (III поколение) обеспечивает максимальную эффективность очистки, улучшение гидродинамики потока и появление сорбционных свойств

Вместе с тем использование ПКФ сопряжено с главным инженерным компромиссом: данные фильтры создают высокое гидравлическое сопротивление. Без компенсации падения давления расчетными методами расплав, лишенный кинетической энергии, не способен пролиться в тонкие перемычки решетчатой отливки. Это делает применение ПКФ невозможным без точного CAE-расчета гидравлических потерь и соответствующей компенсации сечений на этапе создания CAD-модели (рис. 4).



а) *б*)

Рис. 4. Компьютерное моделирование гидродинамики
экспериментальной литниковой системы:
а – исходная 3D-модель (CAD-геометрия) литникового хода с интегрированным
ячеистым (пенокерамическим) фильтром; *б* – результаты численного
моделирования (CFD): распределение скоростей потока расплава
и визуализация линий тока при прохождении через фильтрующий элемент

Для решетчатых структур фильтр позиционируется до первой точки разветвления потока. Параметрическое проектирование в САПР (NX, SolidWorks, КОМПАС-3D) создает адаптивные фильтровальные гнезда: изменение диаметра стояка автоматически перестраивает всю геометрию узла. Применяется «правило площадей» (Стояк : Зумпф : Фильтр : Питатель = 1 : 2 : 2 : 2–4). Канал перед фильтром расширяется в 2–4 раза, а обязательный элемент зумпф гасит энергию падающего расплава.

CAE-пакеты (ProCAST, LVMFlow) решают гидродинамику без отрисовки геометрии каждой поры (что потребовало бы миллиарды расчетных ячеек). Фильтр задается макроскопически как гомогенная пористая среда на основе уравнения Дарси–Форхгеймера: падение давления вычисляется через динамическую вязкость, плотность расплава и табличные коэффициенты проницаемости (K) и инерции ($C2$) для конкретного типа фильтра (например, 30 ppi).

Результаты и алгоритм оптимизации. Гашение турбулентности: базовый расчет (без фильтра) дает $v \approx 3{,}5$ м/с ($Re > 2300$), провоцируя захват воздуха и формирование пленок. Интеграция ПКФ гасит скорость в 10 раз – до $v \approx 3$ м/с ($Re < 100$). Устанавливается ламинарный поток, захват воздуха исчезает, эрозия формы падает на 95 %.

Ввод виртуальных оксидных маркеров подтверждает, что сетчатые и сотовые фильтры задерживают (см. таблицу) лишь 30–50 % включений. Пенокерамический фильтр (ПКФ) благодаря извилистому лабиринту пор обеспечивает осаждение частиц с КПД 90–98 %.

Сравнительная матрица литейных фильтров по ключевым эксплуатационным характеристикам

Параметр	Сетчатые (прессованные)	Сотовые (экструдированные)	Пенокерамические (ПКФ)
Принцип очистки	Поверхностный ситовый эффект (Cake Filtration)	Адгезия на гладких стенках прямых каналов	Глубинная многократная адгезия (Deep Bed Filtration)
Гидравлическое сопротивление	Низкое	Минимальное (сохраняют напор)	Высокое (требует компенсации в CAD)
Эффективность улавливания НМВ	~30–40 %	~50–70 %	90–98 %
Минимальный размер улавливания частиц	> размера ячейки сетки	Частицы, контактирующие со стенкой	5–10 мкм (меньше поры)
Ламинаризация потока	Практически отсутствует	Высокая (прямые каналы)	Максимальная ($Re < 100$)
Оптимальное применение	Массовое, недорогое литье	Чугун, крупногабаритная сталь	Цветные сплавы, решетчатые макроструктуры, аэрокосмическое литье
Защита от бифилмов (Al, Mg)	Отсутствует	Частичная	Полная – скорость ниже 0,5 м/с

Итерационный цикл оптимизации (CAD → CAE → корректировка): осуществляется базовая CAD-генерация → CAE-проверка на турбулентность → выбор и встраивание фильтра в CAD → CAE-верификация (лагранжева трассировка). *Критерии успеха алгоритма*: скорость расплава < 0,5 м/с; режим $Re < 100$; КПД очистки > 85 %; отсутствие недоливов.

Таким образом, сделаем следующие выводы:

1. При литье цветных металлов (Al, Mg) интеграция ПКФ (30 ppi, КПД 90–98 %) обязательна для ламинаризации потока и исключения неисправимых дефектов. Для чугуна/стали достаточен сотовый экструдированный фильтр (КПД 50–70 %).

2. CAD-параметризация мгновенно пересчитывает узлы, гарантируя соблюдение «правила площадей» без утечек.

3. CAE-расчет (пористая среда по Дарси–Форхгеймеру + метод Лагранжа) заменяет дорогие физические тесты точной виртуальной верификацией, делая гидродинамику управляемой.

Литература

1. Беляев, С. В. Основы металлургического и литейного производства : учеб. пособие / С. В. Беляев, И. О. Леушин. – Ростов-н/Д : Феникс, 2016. – 207 с. – URL: https://www.iprbookshop.ru/59404.html (дата обращения: 08.05.2026).
2. Campbell, J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design / J. Campbell. – 2nd ed. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2015. – 1128 p.
3. Некрасов, Г. Б. Основы технологии литейного производства. Плавка, заливка металла, кокильное литье : учеб. пособие для студентов учреждений высш. образования по специальностям «Машиностроительные технологии», «Оборудование и технология сварочного производства» / Г. Б. Некрасов, И. Б. Одарченко. – Минск : Выш. шк., 2014. – 287 с.

4. Open-cell ceramic foam filters for melt filtration: Processing, characterization, improvement and application / Y. Dai, C. Voigt, E. Storti [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2024. – Vol. 32. – P. 3402–3422. – DOI 10.1016/j.jmrt.2024.08.167

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ЛОМА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА СОСТАВА И СВОЙСТВ

С. С. Колесник

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель В. А. Жаранов

Исследование посвящено минимизации тепловых потерь в дуговых сталеплавильных печах, где 20–25 % энергии теряется с отходящими газами. Предложена концепция интеллектуальной системы адаптивного подогрева шихты, интегрирующая методы компьютерного зрения, анализаза волновой (звуковой) проницаемости шихты и цифровых двойников на базе моделирования. Алгоритм управления в реальном времени картирует морфологию лома, вычисляя параметры пористости и эквивалентного диаметра для прецизионной настройки тепловых потоков. Промышленное внедрение позволит обеспечить снижение угара металла в 2–3 раза, экономию природного газа на подогрев на 10–15 % и рост средней температуры подогрева лома на 150–200 °С.

Ключевые слова: ДСП, подогрев лома, цифровой двойник, Industry 4.0, энергоэффективность, моделирование, рециклинг.

Электросталеплавильное производство обеспечивает около 28 % мирового выпуска стали, при этом основным потребителем электрической энергии в цикле плавки является период расплавления металлической завалки в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). В структуре энергетического баланса современных ДСП суммарное потребление тепла составляет 640–680 кВт · ч/т, из которых 340–360 кВт · ч/т генерируется за счет электрической дуги, остальное – экзотермические реакции и тепло от работы топливно-кислородных горелок [1]. Потери с отходящими газами при этом достигают 143–205 кВт · ч/т (22–32 %), а температура газового потока на выходе из рабочего пространства составляет 1000–1200 °С [2, 3].

Технология предварительного подогрева шихты (ВПШ) представляет собой наиболее результативный из известных методов интенсификации ДСП-процесса: по данным сравнительного анализа ее вклад в снижение удельного расхода электроэнергии достигает 20–22 % от суммарного потенциала технологических мероприятий, тогда как применение топливно-кислородных горелок обеспечивает 12 %, вдувание кислорода в ванну – 10 %, использование жидкого чугуна – 10 % [1, 4]. Эмпирически установлено, что каждые 100 °С нагрева лома обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии на 13–15 кВт · ч/т [3, 5]. Вместе с тем практическая реализация высокотемпературного ВПШ (свыше 500–600 °С) сдерживается интенсивным окислением железа и образованием полихлорированных дибензодиоксинов и фуранов при термическом разложении органических загрязнений лома [6]. Среднетемпературный диапазон 300–500 °С признается оптимальным компромиссом, обеспечивающим значимый энергетический эффект при ограниченных экологических рисках и потерях металла от угара [5, 6].