

УДК 621.74

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.1017>

EDN

[OSTTDN](#)

Разработка цифровых моделей литейного процесса изготовления сложнофасонных отливок

А.О. Фирсин*, Р.А. Вдовин, Е.С. Гончаров, И.Д. Марканов

ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086, Россия

*E-mail: firsin.ao@ssau.ru

Аннотация: В статье представлены результаты исследований, направленные на разработку цифровых моделей литейного процесса для изготовления сложнофасонных отливок, используемых в аэрокосмической отрасли. На первом этапе был создан цифровой двойник существующего технологического процесса литья, включая конструкцию литниково-питающей системы (ЛПС), что позволило подтвердить наличие дефектов, выявленных в реальных плавках. На основе анализа результатов моделирования были предложены изменения в конструкции ЛПС и технологических режимах, что привело к значительному снижению усадочной пористости и других дефектов. Разработанные цифровые модели позволяют оптимизировать процесс литья, снизить объем натурных экспериментальных плавков и уменьшить долю литейного брака. В статье также представлены методические рекомендации по оптимизации технологических режимов и конструкций ЛПС, которые могут быть успешно внедрены в производственные процессы предприятий аэрокосмической отрасли.

Ключевые слова: СКМ ЛП «ПолигонСофт», цифровые модели, литниково-питающая система, анализ результатов, литейные дефекты, литье по выжигаемым моделям.

Development of digital models of the casting process for the manufacture of complex-face castings

A.O. Firsin*, R.A. Vdovin, E.S. Goncharov, I.D. Markanov

FSAEI HE "Samara National Research University named after academician S.P. Korolev", Moskovskoye Shosse Road 34, Samara, 443086, Russia

*E-mail: firsin.ao@ssau.ru

Abstract: The article presents the results of research aimed at developing digital models of the casting process for the manufacture of composite castings used in the aerospace industry. At the first stage, a digital twin of the existing casting process was created, including the design of the gate-feeding system (LPS), which made it possible to confirm the presence of defects identified in real smelts. Based on the analysis of the simulation results, changes in the LPS design and technological modes were proposed, which led to a significant reduction in shrinkage porosity and other defects. The developed digital models make it possible to optimize the casting process, reduce the volume of full-scale experimental smelts and reduce the proportion of foundry defects. The article also provides methodological recommendations for optimizing the technological modes and designs of LPS, which can be successfully implemented in the production processes of enterprises in the aerospace industry.

Keywords: PoligonSoft, digital models, spigot-feeding system, analysis of results, casting defects, burnout casting.

1. Введение

В настоящее время активно развиваются принципиально новые методы проектирования изделий двигателестроительной отрасли, основанные на 2D и 3D моделировании и расчете технологических процессов их изготовления. Это позволяет более точно рассчитать тепловые нагрузки и напряженно-деформированное состояние деталей, разрабатывать более совершенные конструкции отливок и внедрять ресурсосберегающие технологии, увеличивая при этом их качественные параметры, что в итоге позволяет значительно сокращать сроки проектирования новых двигателей.

Одной из главных задач развития научно-технического прогресса в двигателестроительной отрасли является широкое использование систем компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования технологических процессов. Однако, в настоящее время, несмотря на всеобщую компьютеризацию отечественных предприятий, проектирование и отработка технологий получения сложнофасонных отливок часто основываются на опыте практической работы технологов, сложившихся технологических традициях, использовании известных решений, а также трудоемком и металлоемком методе проб и ошибок.

Эффективное применение методов компьютерного моделирования в опытном и серийном литейном производстве невозможно без научно обоснованной методологии проектирования процессов литья. В практическом отношении, решение этой задачи позволяет в несколько раз сократить сроки освоения производства опытных отливок, эффективно применять современные технологии подготовки производства, объективно оценивать технологичность отливок и качество принятых технологических решений. В экологическом отношении происходит сокращение безвозвратных потерь энергии и материалов, уменьшение вредного воздействия на окружающую среду и человека.

2. Цель исследования

Целью работы является разработка цифровых моделей литейного процесса изготовления сложнофасонных отливок, включающих: проектирование электронных геометрических моделей и конструкций литниково-питающих систем отливок деталей; проектирование конечно-элементных моделей сложнофасонных отливок; разработку расчетной модели, учитывающей процессы задания граничных, начальных и контактных условий и анализ результатов компьютерного моделирования.

3. Методы и материалы исследования

Для достижения поставленных целей были разработаны цифровые модели литейного процесса с использованием системы компьютерного моделирования «ПолигонСофт». В рамках исследования были выбраны пять типов отливок: «Корпус с критическим сечением», «Фланец задний», «Фланец передний», «Фланец задний» и «Корпус с фланцами».

Для отливки «Корпус с фланцами» был создан цифровой двойник существующего технологического процесса литья, включая конструкцию ЛПС, используемую на предприятии. На рисунке 1 представлена электронная геометрическая модель отливки «Корпус с фланцами» с существующей конструкцией ЛПС. Для проведения численных расчетов была создана конечно-элементная сетка, включающая поверхностную и объемную сетки (рисунок 2) [1].

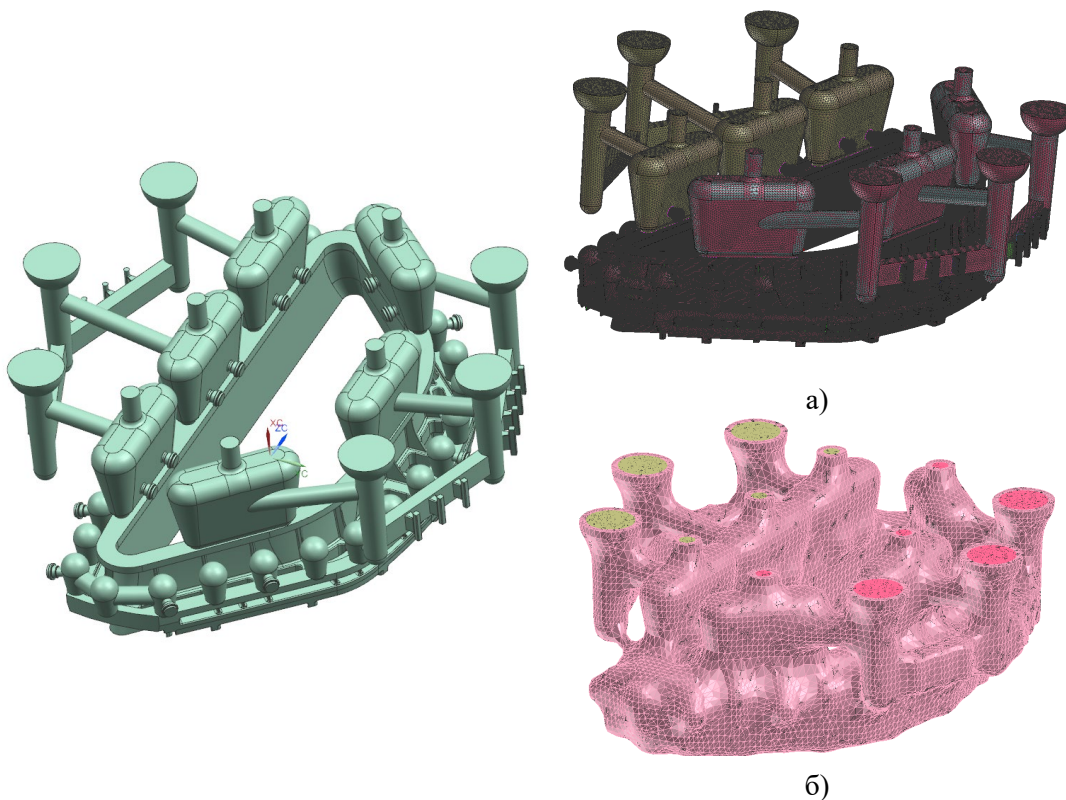


Рисунок 1. ЭГМ отливки детали «Корпус с фланцами».

Рисунок 2. Конечно-элементная сетка технологической системы:
а – поверхностная; б – объемная.

В модуле Мастер была выполнена подготовка модели к расчету: заданы граничные, контактные и начальные условия, соответствующие технологии литья по

выжигаемым моделям [2]. Это включало установку температуры расплава, температуры прогрева формы, создания керамической оболочки, выбор материалов формы и отливки, а также параметров теплопередачи и места подвода металла.

После проведения расчетов были проанализированы результаты моделирования, включая процесс заполнения формы расплавом (рисунок 3), кристаллизацию отливки (рисунок 4), образование рыхлот и пористости (рисунок 5), а также напряженно-деформированное состояние отливки [3].

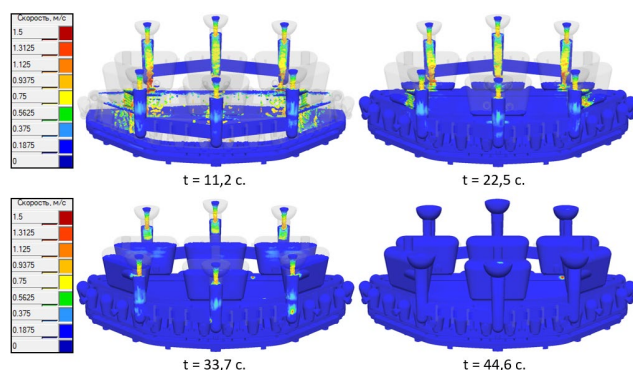


Рисунок 3. Анализ скорости течения расплава при заполнении полости формы

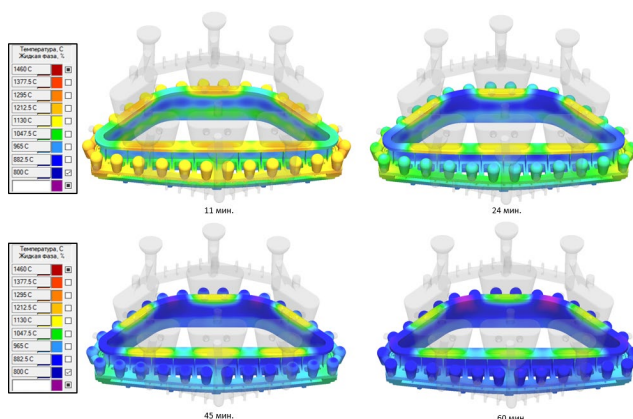


Рисунок 4. Характер распределения температурных полей в отливке в различные моменты времени в объеме

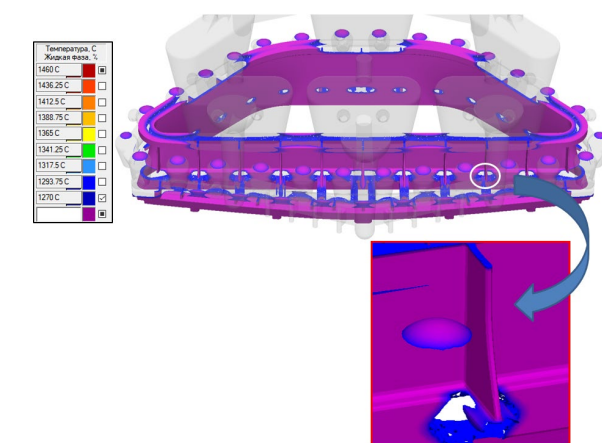


Рисунок 5. Характер образования рыхлот в процессе кристаллизации.

Результаты моделирования полностью подтвердили наличие дефектов, обнаруженных в процессе реальных плавок на предприятии (рисунок 6). Максимальное значение усадочной пористости в отдельных областях отливки достигает 40% [4].

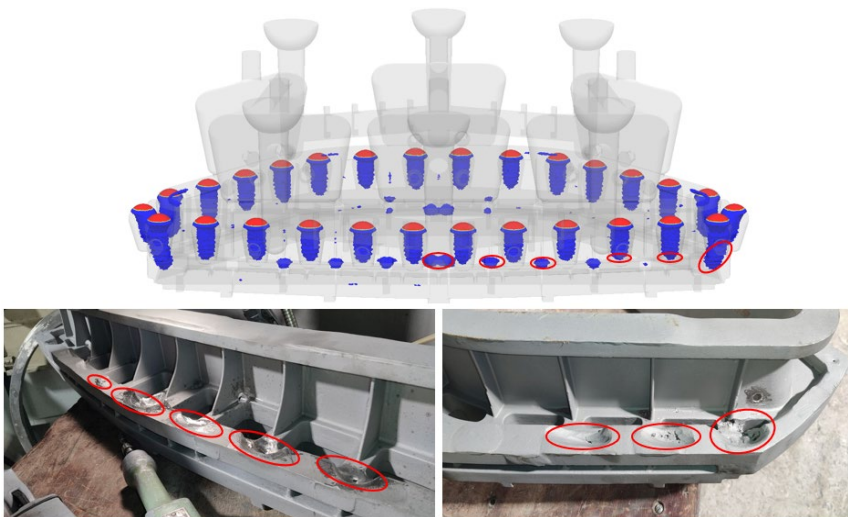


Рисунок 6. Дефекты в отливке детали.

На основании результатов компьютерного моделирования были предложены изменения в конструкции ЛПС для отливки «Корпус с фланцами». Было разработано восемь вариантов конструкций ЛПС, каждый из которых предлагал улучшения характеристик готового продукта. На рисунке 7 представлена итоговая электронная геометрическая модель отливки с обновленной конструкцией ЛПС.

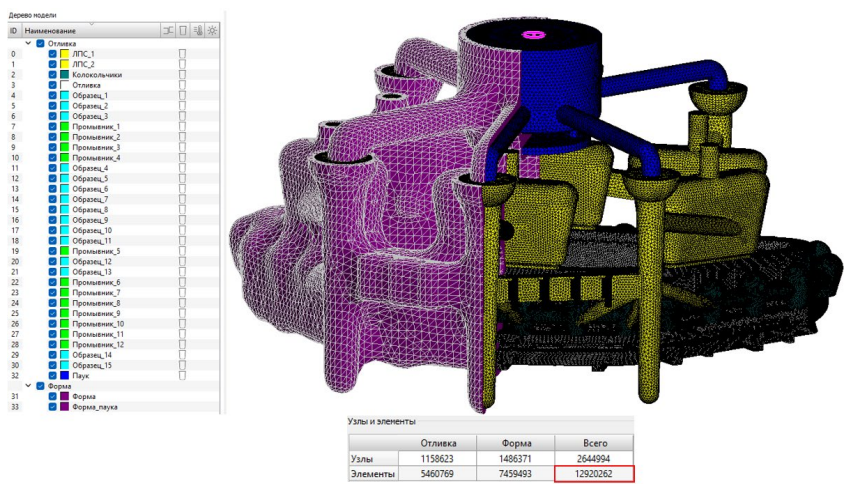


Рисунок 7. Отливка детали «Корпус с фланцами» с оптимизированной конструкцией ЛПС.

После внесения изменений в конструкцию ЛПС и технологические режимы был создан новый цифровой двойник технологического процесса литья. Максимальные единичные значение усадочной пористости в отдельных областях отливки не превышает 0,18% (рисунок 8), в то время как в исходном варианте данные значения доходили до отметки в 40%.

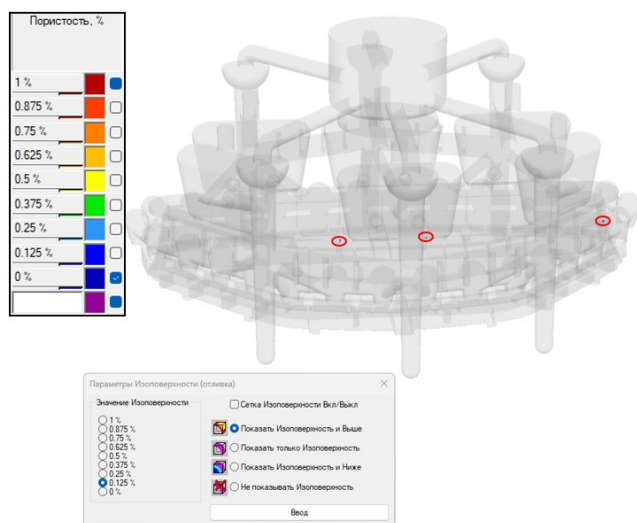


Рисунок 8. Характер распределения усадочной пористости в отливке с оптимизированной конструкцией ЛПС.

4. Полученные результаты

В результате выполнения проекта были разработаны цифровые модели литейного процесса изготовления сложнофасонных отливок, которые позволяют:

- оптимизировать технологические режимы и конструкции ЛПС;
- снизить объем натурных экспериментальных плавов;
- уменьшить долю литейного брака;
- повысить точность и качество отливок.

На основании результатов исследования были разработаны методические рекомендации по оптимизации технологических режимов и конструкций ЛПС для сложнофасонных отливок. Основные рекомендации включают:

1. увеличение температуры заливки сплава ВХ4Л до 1520 ± 100 °С;
2. пересмотр схемы литейного блока для обеспечения равномерной кристаллизации;
3. дополнительная теплоизоляция или прокладка технологической системы;
4. изменение конструкции центральных стояков для снижения скорости течения металла.

5. Выводы

Использование разработанных в проекте цифровых моделей литейного процесса изготовления сложнофасонных отливок в производственных условиях потенциального пользователя предположительно позволит:

- в кратчайшие сроки (примерно 3 месяца) в среднем на 5-10% снизить производственные затраты, связанные с браком;
- на 10% повысить эффективность и загрузку используемого оборудования (уменьшить простой оборудования);
- в 2 раза сократить время выхода конкурентоспособного готового продукта на рынок;
- провести технологическое перевооружение производственных мощностей предприятия;
- более чем на 10 % повысить объемы производства существующей номенклатуры изготавливаемых изделий за счет сокращения длительности технологического цикла производства каждого изделия;
- увеличить спрос и расширить номенклатуру выпускаемых изделий и перспективных разработок предприятия.

Список литературы

1. Вдовин, Р. А. Компьютерное моделирование технологического процесса литья деталей двигателей в модуле Visual-Mesh программного продукта ProCast: учеб. пособие / Р. А. Вдовин. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 108 с.
2. Фирсин, А.О. Использование системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПолигонСофт» при изготовлении отливки детали «Колесо турбины рабочее» / А.О. Фирсин, Р.А. Вдовин // Международная научно-техническая конференция «Машиностроительные технологические системы». – 2023. – С. 199-206.
3. Монастырский, В. П. Моделирование напряженно-деформированного состояния отливки при кристаллизации / В. П. Монастырский, А. И Александрович, А. В. Монастырский [и др.] // Литейное производство. – 2007. – № 8. – С. 46-48.
4. Лакедемонский, А. В. Литейные дефекты и способы их устранения / А. В. Лакедемонский, Ф. С. Кваша, Я. И. Медведев. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.