



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-14-22>  
УДК 004.94

Поступила 18.02.2025  
Received 18.02.2025

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА С СИСТЕМОЙ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «ПОЛИГОНСОФТ»

С. В. КОРЕНЮГИН, М. А. САДОХА, А. А. ФРАНЧУК, С. Д. ШАТИЛЛО, М. А. РИПИНСКИЙ,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.  
E-mail: korenugin@bntu.by

*В статье представлен анализ применения системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «ПолигонСофт» для оптимизации технологических процессов литейного производства. Рассмотрена визуализация заливки и распределения жидкой фазы, а также проведен анализ температурных полей и напряжений. Особое внимание уделено оценке кристаллизации сплава, мониторингу процентного содержания жидкой фазы и прогнозированию вероятности образования усадочных дефектов.*

**Ключевые слова.** СКМ ЛП «ПолигонСофт», численное моделирование литейных процессов, инновации в литейных технологиях.  
**Для цитирования.** Коренюгин, С. В. Оптимизация литейного производства с системой компьютерного моделирования «ПолигонСофт» / С. В. Коренюгин, М. А. Садоха, А. А. Франчук, С. Д. Шатилло, М. А. Рипинский // *Литье и металлургия*. 2025. № 2. С. 14–22. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-14-22>.

## FOUNDRY PRODUCTION OPTIMIZATION WITH POLYGONSOFT COMPUTER SIMULATION SYSTEM

S. V. KORENYUGIN, M. A. SADOKHA, A. A. FRANCHUK, S. D. SHATILLO, M. A. RIPINSKY, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: korenugin@bntu.by

*The article presents an analysis of the application of the casting process modeling system (CPMS) “PolygonSoft” for the optimization of technological processes in casting production. The study examines the visualization of pouring and liquid phase distribution, as well as the analysis of temperature fields and stresses. Special attention is given to the assessment of alloy crystallization, monitoring of the liquid phase percentage, and prediction of the probability of shrinkage defect formation.*

**Keywords.** CPMS “PolygonSoft”, numerical modeling of casting processes, innovations in casting technologies.  
**For citation.** Korenyugin S. V., Sadokha M. A., Franchuk A. A., Shatillo S. D., Ripinsky M. A. Foundry production optimization with PolygonSoft computer simulation system. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 2, pp. 14–22. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-2-14-22>.

### Введение

В прошлом производство литых деталей полностью зависело от опыта инженера-конструктора. Проверка изделий на наличие дефектов без дополнительных финансовых затрат была невозможна. Это становилось серьезной проблемой, поскольку ошибки на этапе производства могли приводить к значительным потерям.

Для решения данной проблемы многие компании начали разрабатывать системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), позволяющие провести моделирование заливки, кристаллизации и деформации литых деталей. Главное преимущество этих программ – возможность выявления и исправления дефектов на ранних стадиях, что значительно снижает производственные затраты.

Одна из таких программ, часто используемая в литейной промышленности, – СКМ ЛП «ПолигонСофт». Она обеспечивает точное воспроизведение всех этапов литейного процесса [1], позволяет визуализировать процессы заполнения формы, образования усадочных раковин, теплопередачи и кристаллизации. С помощью этой системы инженеры могут вносить изменения в конструкцию литых деталей и оптимизировать технологические параметры. Таким образом, внедрение СКМ ЛП значительно повышает качество продукции и снижает издержки на производство, минимизируя количество брака.

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» проведена работа по моделированию литейных процессов для отливки 3294.00.002–04 «Плита подвижная». Моделирование выполнено в условиях гравитационного литья

в форму из жидкого стекла с использованием сплава стали 110Г13Л. Специфика применения данной детали предъявляет повышенные требования к ее эксплуатационным характеристикам, которые, в свою очередь, напрямую зависят от качества отливки. Одним из ключевых параметров качества отливки при заданном уровне механических свойств применяемого материала является уровень усадочных дефектов, возникающих в процессе затвердевания отливки.

### Исходные данные

Форма – жидко-стекольная смесь марки кв 025 ЖС 5 плотностью 1523 кг/м<sup>3</sup>.

Размер формы – 2700 × 2500 × 700 мм.

Температура заливки для стали 110Г13Л – 1450 °С.

### Подготовка данных для компьютерного моделирования

Для осуществления высокоточного компьютерного моделирования литейных процессов необходима предварительная подготовка расчетной сетки, которая создается на основе геометрической модели, разработанной в САД-системе [2]. При создании расчетной сетки следует обращать внимание на значения и точность, поскольку они влияют на точность конечных результатов.

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» присутствует встроенный модуль генерации расчетной сетки, который значительно упрощает и ускоряет данный процесс. Этот модуль автоматизирует создание сетки, минимизируя ручные операции пользователя, и обеспечивает высокую гибкость настроек для адаптации сетки к особенностям конкретной задачи.

На рис. 1 представлена геометрическая модель, разработанная в САД-системе, на рис. 2 показаны преобразования геометрической модели в расчетную модель, сформированную с использованием встроенного модуля сеточной генерации.

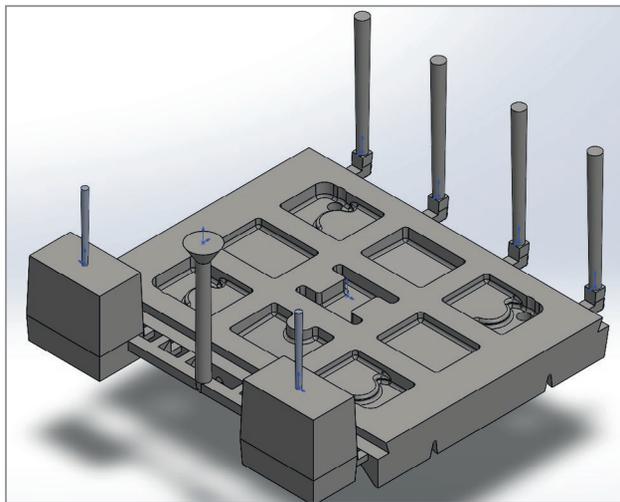


Рис. 1. Исходная геометрическая модель

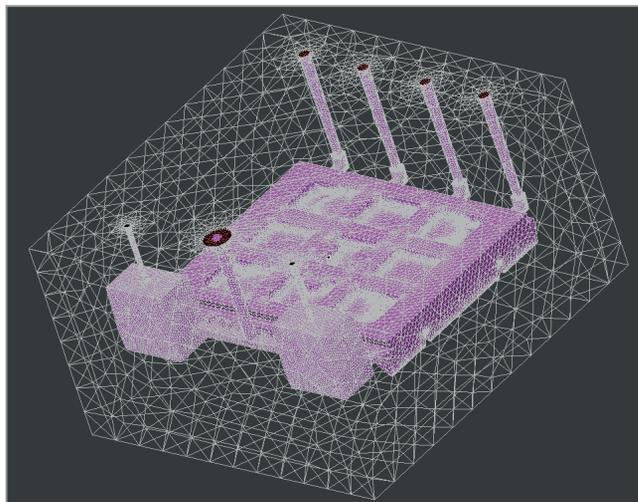


Рис. 2. Конечно-элементная сетка отливки

### Моделирование процесса литья

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» реализована возможность не только визуализации процесса заливки металла в литейную форму, но и анализа скорости его движения (рис. 3). Это важный инструмент для прогнозирования возможных дефектов, таких как размывы отдельных участков формы, вызванные высокой скоростью потока. Благодаря модели можно заранее выявить критические области конструкции формы и оперативно скорректировать процесс, обеспечив равномерное и контролируемое заполнение. Такая функциональность значительно снижает вероятность возникновения дефектов в готовой отливке, повышая общую эффективность литейного производства.

Еще одной значимой функцией СКМ ЛП «ПолигонСофт» является возможность моделирования и анализа распределения температуры в процессе заполнения литейной формы (рис. 4).

Моделирование распределения температуры позволяет идентифицировать зоны, где может происходить преждевременное затвердевание материала или, наоборот, перегрев, что в конечном итоге влияет на однородность структуры отливки. Благодаря этому инструменту инженеры могут заранее выявить и устранить потенциальные проблемы, такие как неполное заполнение формы или структурная неоднородность.

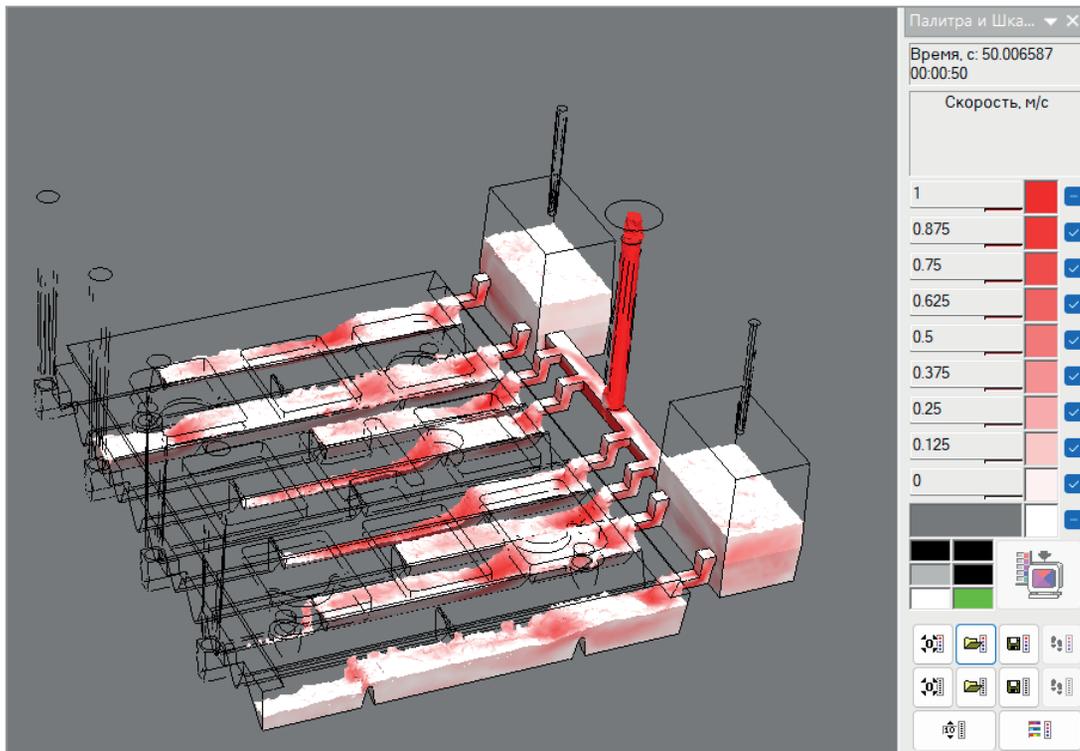


Рис. 3. Распределение скорости при заливке на 50-й секунде

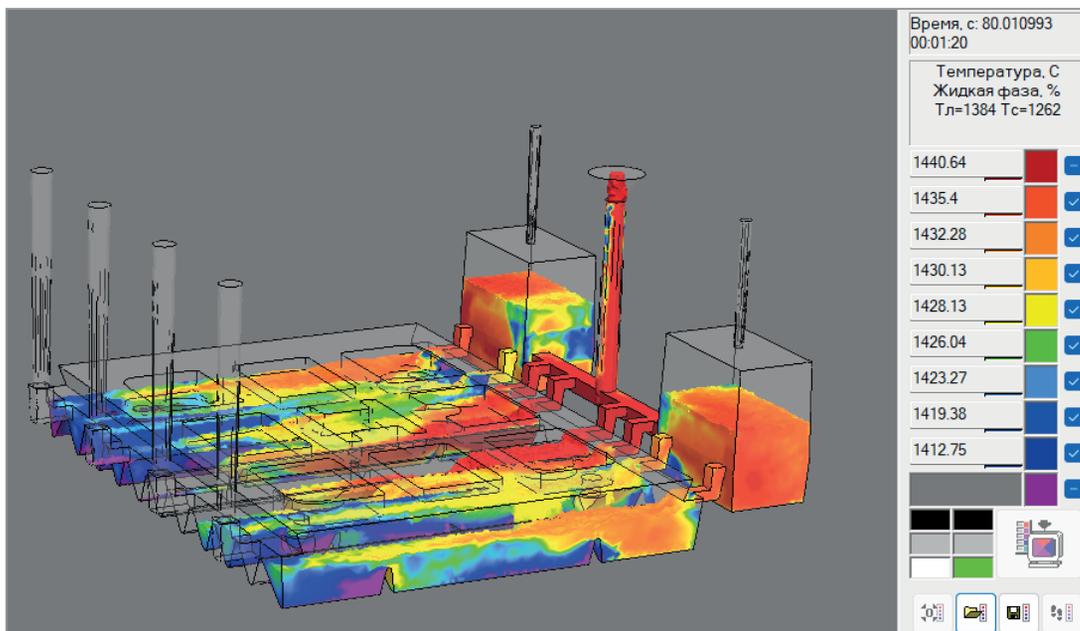


Рис. 4. Распределение температуры при заливке на 80-й секунде

Одним из ключевых аспектов функциональности программы является возможность мониторинга процентного содержания жидкой фазы материала в процессе кристаллизации (рис. 5, 6). Наблюдение за изменением процентного содержания жидкой фазы позволяет своевременно выявлять и предотвращать потенциальные дефекты, например, усадочные раковины, внутренние напряжения или неоднородности структуры материала. Это особенно важно для обеспечения высокого качества готовых изделий и минимизации производственных потерь. Кроме того, данная функция помогает оптимизировать технологический процесс. Инженеры могут корректировать параметры заливки, такие как температура расплава или скорость охлаждения, с целью достижения равномерного кристаллизационного процесса. Также появляется возможность усовершенствовать конструкцию литейной формы, обеспечивая наиболее эффективные условия для равномерного распределения тепловых потоков.

В приведенном примере видно, что процесс «перемерзания» питателей начинается на 658-й секунде (рис. 5), а к 1048-й секунде (рис. 6) подпитка плиты полностью прекращается. Это приводит к тому, что прибыль теряет возможность выполнять свою основную задачу. Как следствие, повышается риск образования усадочных раковин и внутренних дефектов в структуре материала, что негативно сказывается на качестве конечного изделия. Для предотвращения подобных ситуаций важно корректировать температуру и скорость заливки, а также оптимизировать конструкцию литниковой системы.

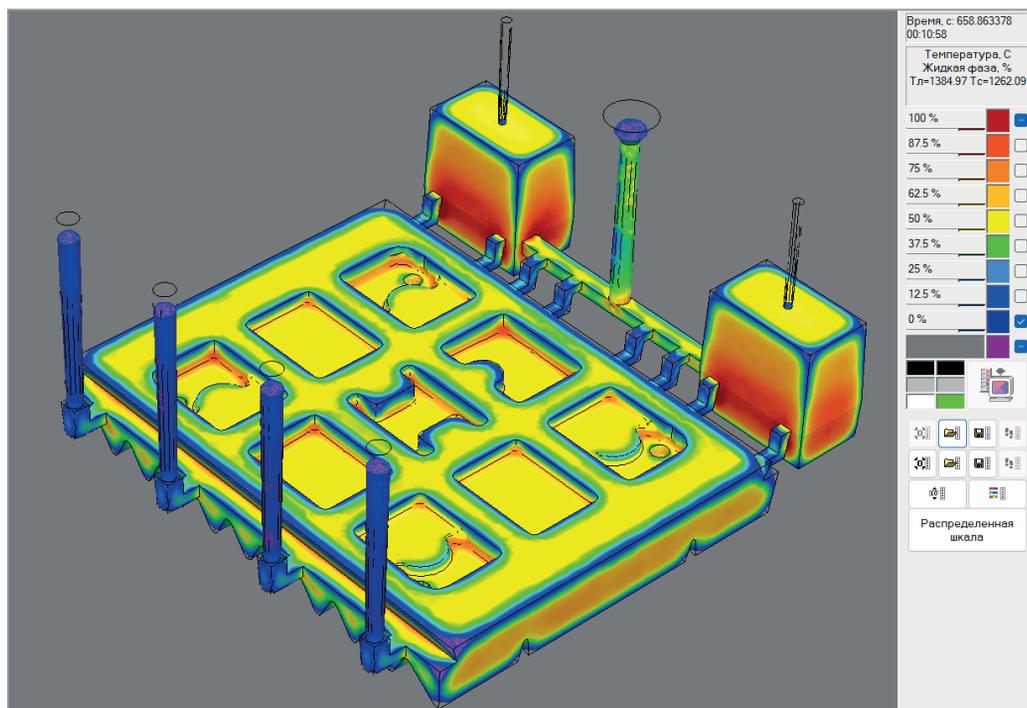


Рис. 5. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 658-й секунде

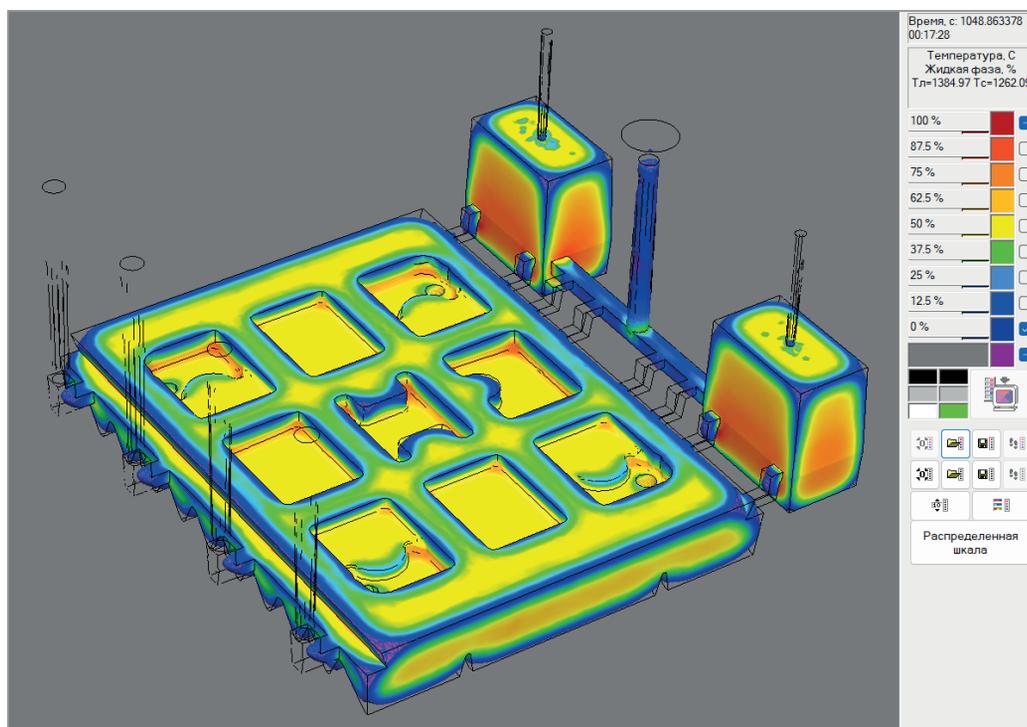


Рис. 6. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 1048-й секунде

Из рис. 7, 8 видно, что жидкая фаза завершает кристаллизацию в центральной части плиты, что может стать причиной ряда потенциальных проблем. В первую очередь это приводит к образованию

усадочных раковин в центральной области из-за недостаточной компенсации объема материала при его затвердевании. Такие дефекты значительно ухудшают механические свойства плиты, снижая ее прочность и долговечность.

Кроме того, неравномерная кристаллизация вызывает возникновение внутренних напряжений в материале, способных привести к деформации или трещинам как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации изделия.

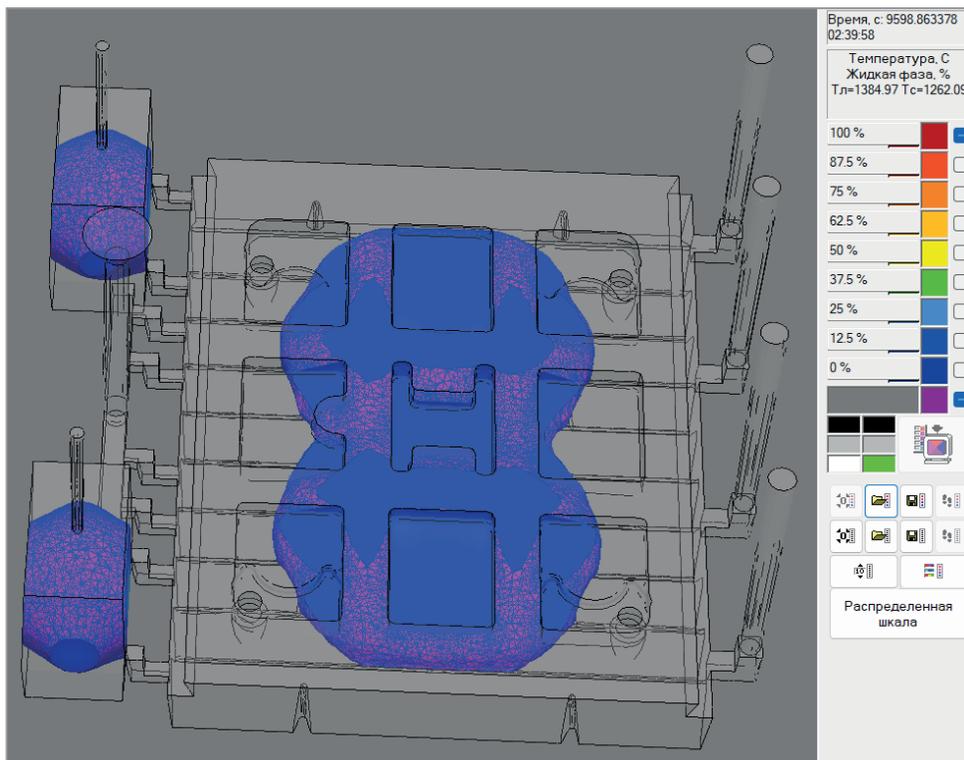


Рис. 7. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 9598-й секунде

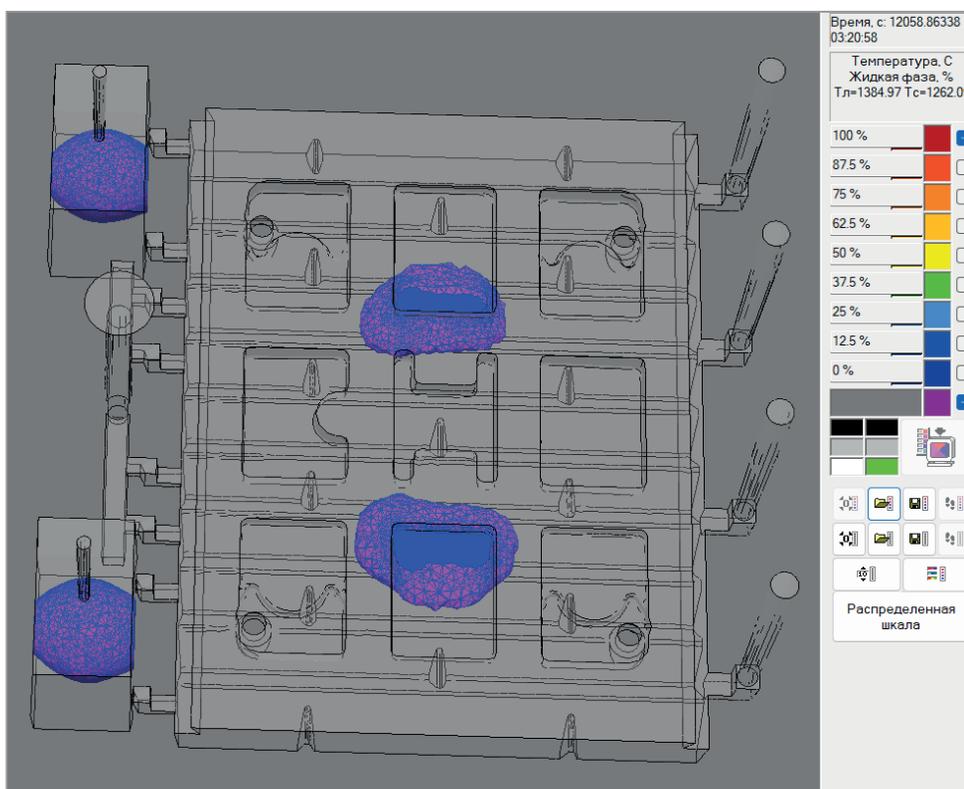


Рис. 8. Распределение жидкой фазы во время кристаллизации на 12058-й секунде

Как видно из рис. 9, наибольшее скопление усадочной пористости наблюдается в тех областях, где процесс кристаллизации сплава завершился последним. Однако вероятность возникновения усадочной пористости в данной зоне оценивается всего в 2%, что указывает на достаточно низкий риск появления сосредоточенной усадочной раковины в этом конкретном месте. Тем не менее данная информация может быть полезна для дальнейшей оптимизации процесса. Анализ таких данных позволяет инженерам удостовериться в надежности применяемых решений и поддерживать стабильное качество продукции (рис. 10).

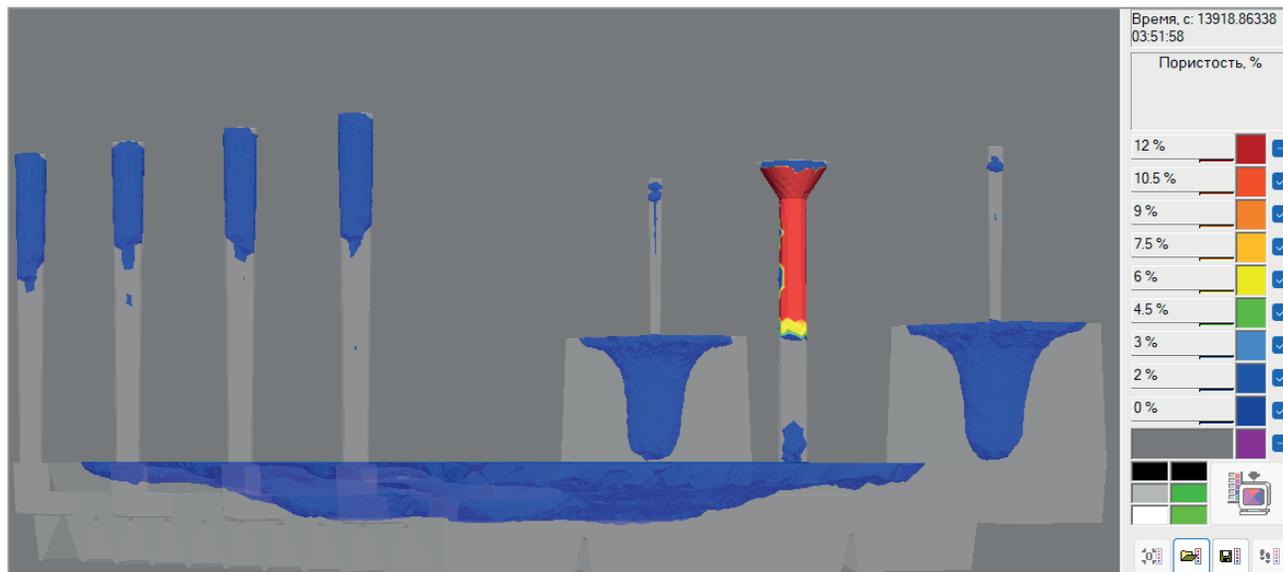


Рис. 9. Вероятные места образования усадочной пористости в пределах 2%

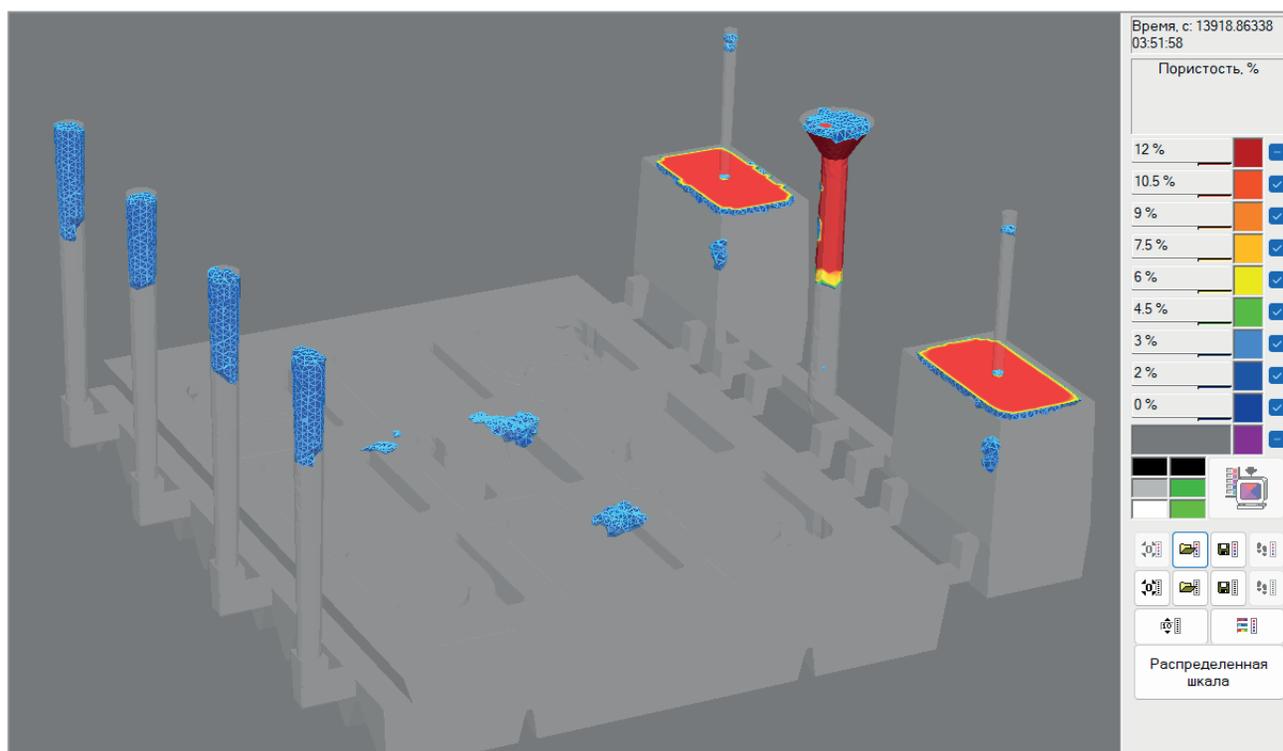


Рис. 10. Вероятные места образования усадочной пористости более 3%

Анализ напряжений в процессе охлаждения и после его завершения является важным этапом для оценки качества и надежности готового изделия (рис. 11). В литейной промышленности напряжения часто возникают из-за неравномерного теплового распределения и различий в скорости охлаждения разных участков отливки. Эти факторы могут приводить к образованию внутренних напряжений, которые, в свою очередь, вызывают деформации, трещины или снижение эксплуатационных характеристик изделия.

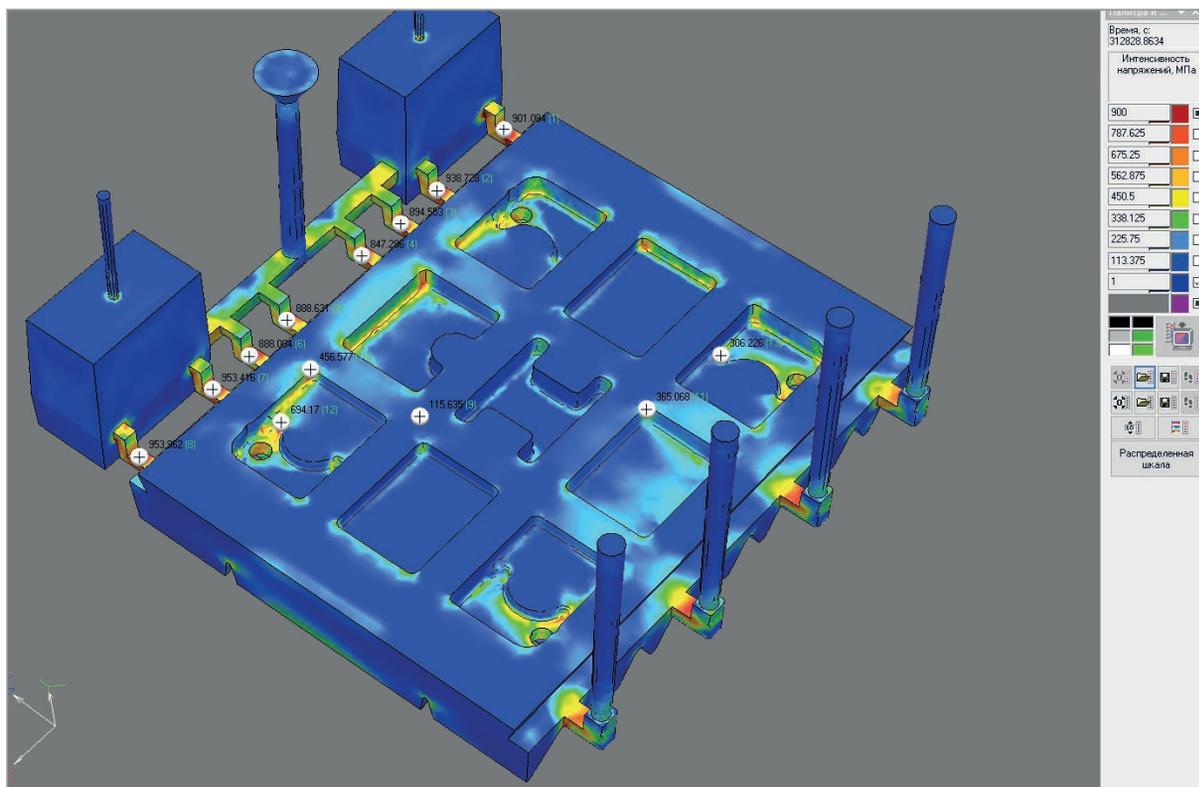


Рис. 11. Интенсивность напряжений отливок

Во время охлаждения с помощью компьютерного моделирования можно отслеживать изменения напряжений в реальном времени. Это позволяет определить критические зоны, в которых наиболее вероятно появление дефектов. Анализ напряжений дает возможность прогнозировать такие проблемы, как возникновение остаточных напряжений или концентрация напряжений в определенных областях (рис. 12, 13).

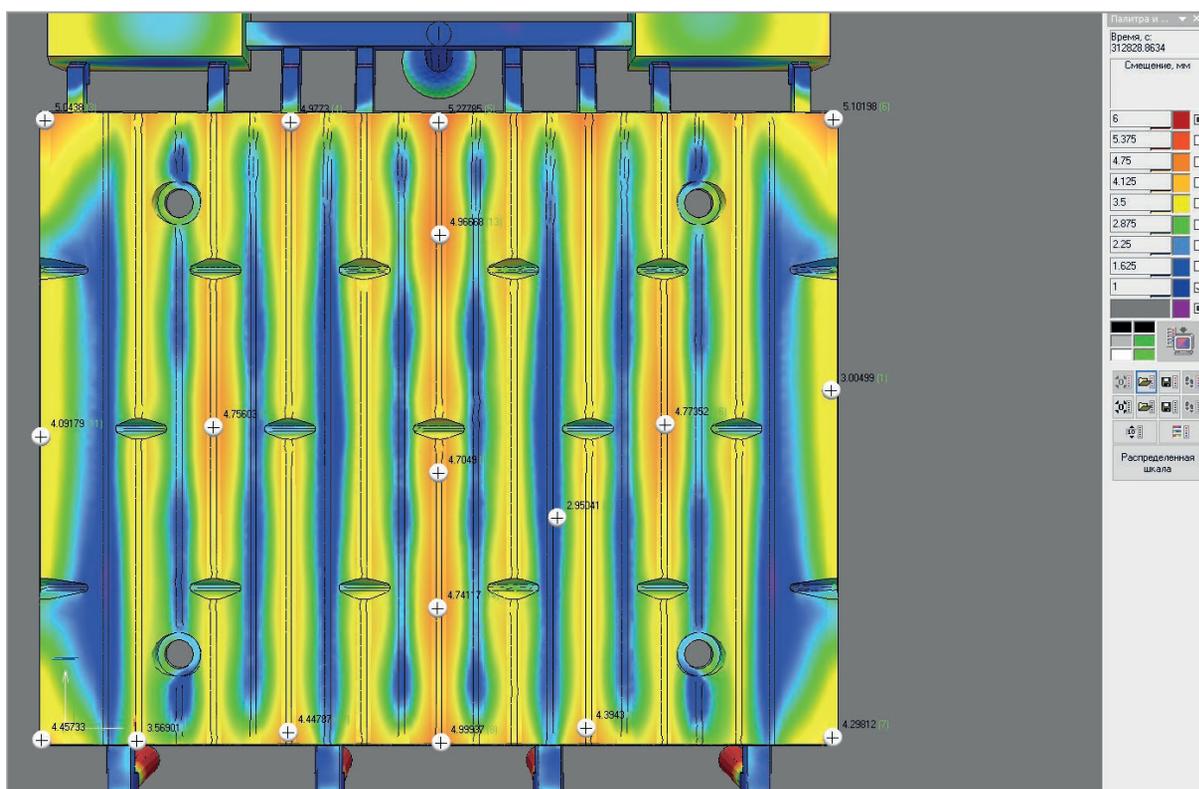


Рис. 12. Отклонение размеров (вид снизу)

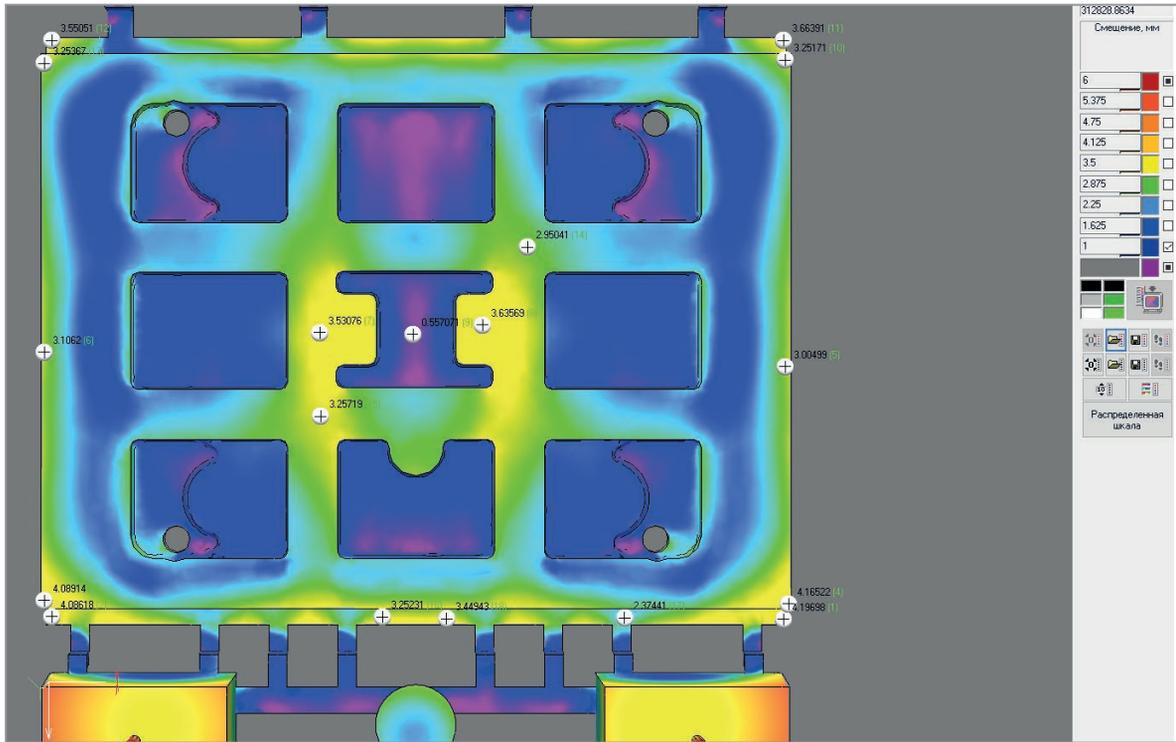


Рис. 13. Отклонение размеров (вид сверху)

Как видно из рис. 14, 15, изготовленная на производстве плита полностью соответствует проектным геометрическим характеристикам и демонстрирует высокую точность технологического процесса. Это свидетельствует о том, что все этапы производства – от формирования заготовки до окончательной обработки – выполнены в строгом соответствии с заданными параметрами, что обеспечивает стабильность размеров и формы изделия.



Рис. 14. Плита после механической обработки (вид сбоку)



Рис. 15. Плита после механической обработки (вид сверху)

### Выводы

1. В проведенном исследовании с использованием комплекса СКМ ЛП «ПолигонСофт» продемонстрировано, что интеграция современных СКМ позволяет существенно повысить эффективность контроля литейных процессов. Преобразование CAD-модели в расчетную сетку обеспечивает высокую точность симуляций, что является важным для детального анализа таких параметров, как динамика заполнения формы, распределение температуры, процентное содержание жидкой фазы в процессе кристаллизации, а также изменений напряжений в ходе охлаждения.

2. Проведенное моделирование выявило, что критические участки, где наблюдаются задержки в кристаллизации (например, в центральной части плиты), могут служить потенциальными источниками дефектов, таких как усадочная пористость. Несмотря на то что оценка вероятности образования усадочной пористости в данных зонах составляет всего около 2%, такой показатель требует внимания при оптимизации технологических параметров и конструктивных решений литейной формы. Дополнительный анализ распределения температур и мониторинг напряжений позволяют своевременно корректировать режимы заливки и охлаждения, минимизируя риск возникновения внутренних напряжений и последующих механических дефектов.

3. Применение СКМ ЛП «ПолигонСофт» способствует созданию цифрового двойника литейного процесса, что позволяет не только прогнозировать и предотвращать технологические дефекты, но и вносить конструктивные и технологические корректировки для повышения эффективности производства. Полученные результаты являются важным этапом на пути к совершенствованию литейных технологий и могут служить основой для дальнейших исследований в этой области.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Монастырский, А.В.** PoligonSoft для литейного производства / А.В. Монастырский, Ю.Б. Власов // *Литье и металлургия*. – 2022. – № 3. – С. 40–47.
2. **Монастырский, А.В.** Развитие системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПОЛИГОНСОФТ» / А.В. Монастырский, Ю.Б. Власов // *Литейное производство и металлургия 2021*. Беларусь: тр. 29-й Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 41–47.

### REFERENCES

1. **Monastyrskij A. V., Vlasov Ju. B.** PoligonSoft dlja litejnogo proizvodstva [PoligonSoft for foundry]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 3, pp. 40–47.
2. **Monastyrskij A. V., Vlasov Ju. B.** Razvitie sistemy komp'yuternogo modelirovaniya litynyh processov «POLIGONSOFT» [Development of the system of computer modeling of foundry processes «POLYGNOSOFT»]. *Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2021. Belarus' = Foundry production and metallurgy 2021. Belarus*. Minsk, BNTU Publ., 2021, pp. 41–47.